



TRABALHO FINAL

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA

Clínica Universitária de Oftalmologia

Fisiologia da acomodação. Métodos de avaliação

Gonçalo Abreu Mesquita Borges de Almeida

Dezembro'2016



TRABALHO FINAL

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA

Clínica Universitária de Oftalmologia

Fisiologia da acomodação. Métodos de avaliação

Gonçalo Abreu Mesquita Borges de Almeida

Orientado por:

Prof. Doutor Carlos Marques Neves

Dezembro'2016

RESUMO

O objectivo desta tese consiste em fazer uma revisão dos processos fisiológicos que tornam possível a realização da acomodação, das alterações fisiológicas da acomodação ao longo da vida e ainda dos métodos actualmente disponíveis para a avaliação da mesma. Para a sua elaboração procedeu-se a uma revisão bibliográfica baseada na consulta de livros de texto de Oftalmologia e de artigos científicos publicados na Pubmed.

O termo “acomodação” designa a capacidade que o olho tem de alterar o seu poder dióptrico de modo a focar os objectos a diferentes distâncias. Existem diversas teorias explicativas do fenómeno da acomodação, sendo a teoria de Helmholtz (1855) a que reúne claramente maior consenso entre a comunidade científica. Semelhante variedade de pontos de vista pode ser encontrada no tema da presbiopia, um declínio fisiológico da acomodação com a idade de provável origem multifactorial, podendo envolver alterações no cristalino e na sua cápsula, bem como no músculo ciliar e nos ligamentos suspensores. Do ponto de vista médico, salienta-se ainda a importância da medição da acomodação, a qual pode ser realizada com recurso a uma avaliação subjectiva ou objectiva, estando a última associada a resultados mais fidedignos.

Palavras-chave: Acomodação, Presbiopia, Avaliação objectiva e subjectiva.

The aim of this thesis is to make a review of the physiological mechanisms which enable accommodation, the age-related changes in accommodation and also the available methods for its evaluation. Its conception was made by a theoretical review based on Ophthalmology textbook and scientific article published on Pubmed search.

The term “accommodation” refers to the ability of changing the refractive power of the eye in order to focus objects at different distances. There are several explaining theories for the accommodation phenomenon, being Helmholtz’s (1855) the one which gathers most support among scientists. Similar range of different opinions can be found regarding presbyopia, the physiologic and age-related loss of accommodation of probable multifactorial origin, involving changes in the crystalline lens and its capsule, as well as in the ciliary muscle and zonular fibers. From a medical point of view, it is also worth mentioning the importance of accommodation measurement, which can be done by making a subjective or objective evaluation, the latter being associated to better results.

Keywords: Accommodation, Presbyopia, Objective and Subjective evaluation.

O Trabalho Final exprime a opinião do autor e não da FML.

ÍNDICE

Resumo	2
Introdução	4
1. Contextualização histórica	5
2. Fisiologia da acomodação	7
2.1. Reflexo da acomodação	7
2.2. Mecanismo ocular da acomodação	8
2.3. Teorias alternativas da acomodação	11
3. Alterações fisiológicas da acomodação	13
3.1. Presbiopia	13
3.2. Alterações do aparelho da acomodação atribuíveis à idade	13
3.2.1. Cápsula do cristalino	13
3.2.2. Dimensões do cristalino	14
3.2.3. Rigidez do cristalino	15
3.2.4. Músculo ciliar	17
3.2.5. Ligamentos suspensores do cristalino	19
3.3. Teorias explicativas da presbiopia	19
4. Métodos de avaliação da acomodação	21
4.1. Avaliação subjectiva	21
4.2. Avaliação objectiva	21
4.3. Avaliação objectiva vs subjectiva	28
Agradecimentos	33
Bibliografia	34
Notas finais	37

INTRODUÇÃO

Para obtenção de uma acuidade visual correcta (dado que acuidade visual é diferente de óptica) é necessária do ponto de vista do sistema óptico a convergência dos raios luminosos paralelos que atravessam o globo ocular num ponto focal, situado ao nível da retina e coincidente com a mácula lútea. Essa convergência requer a existência e correcto funcionamento de estruturas responsáveis pela refração dos raios luminosos, nas quais se incluem a córnea, o cristalino, o humor vítreo e o humor aquoso (fig.1). É graças ao contributo destas estruturas que o olho consegue alterar o seu poder dióptrico de modo a ver com nitidez objectos deslocados de longas para curtas distâncias, num processo que ficou conhecido pelo nome de “acomodação” [1], [2].

O objectivo desta tese consiste assim em fazer uma revisão dos processos fisiológicos que possibilitam a realização da acomodação, das alterações fisiológicas da acomodação ao longo da vida e ainda dos métodos actualmente disponíveis para avaliação da mesma.

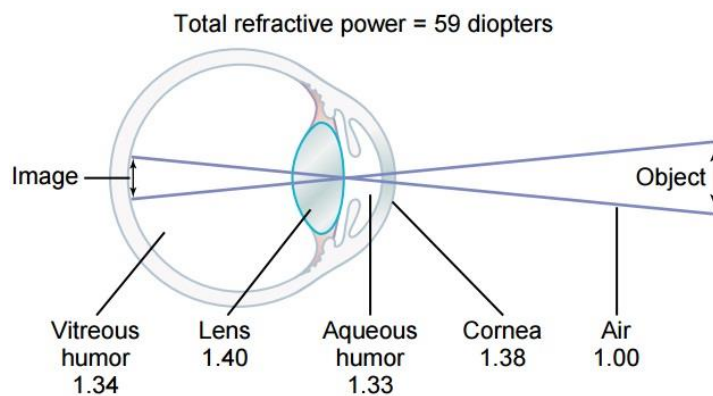
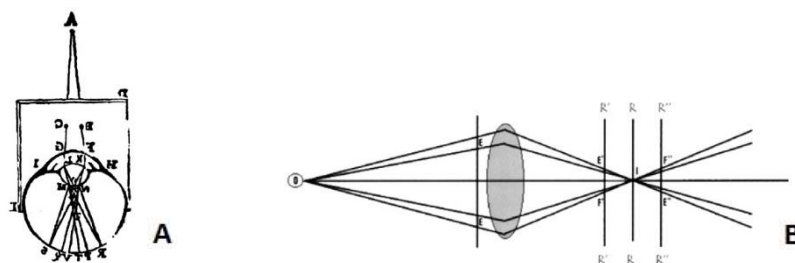


Figura 1 – Índice de refração das estruturas oculares responsáveis pela acomodação (Adaptado de [1] com permissão da Elsevier).

1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A primeira demonstração da existência de um mecanismo acomodativo remonta a 1619, quando Scheiner experimentou fazer dois furos num pedaço de cartão e através dele observar um objecto colocado a diferentes distâncias, concluindo que apenas a uma certa distância é que os objectos vistos daquela forma não apareciam em duplicado [3], [4] (fig.2). A primeira explicação para este acontecimento só surgiu no século seguinte, em 1759, quando William Porterfield sugeriu que o mecanismo que permitia focar os objectos resultava de alterações ao nível do cristalino, não constatáveis em situações de afaquia (ausência do cristalino) [3], [5]. Pouco tempo depois, em 1763, Albrecht von Haller complementou a explicação de Porterfield ao considerar que a contração da pupila também teria um papel importante no mecanismo fisiológico da acomodação [4]. Thomas Young foi ainda mais longe e em 1801 propôs que as alterações ocorridas no cristalino envolviam o grau de curvatura do mesmo, rejeitando a ideia de que a acomodação se devia a modificações no comprimento axial do olho e na curvatura da córnea, como até então se especulava que pudesse ser [5], [6].



Figuras 2A e 2B – Representações da experiência realizada por Scheiner. **(A)** Esquema original desenhado por Scheiner (Adaptado de [3]). **(B)** Esquema ilustrativo da mesma experiência, na qual Scheiner concluiu apenas à distância correspondente à focagem no plano “R” é que os objectos vistos pelos orifícios não apareciam em duplicado, sendo apenas formada a imagem “I” (Adaptado de [4]).

Apesar dos progressos até então feitos, as alterações do cristalino careciam de uma descrição mais detalhada. Foi Helmholtz (1821-1894) quem deu o contributo mais importante nesta área, constatando em 1855 que o cristalino aumentava de espessura durante a acomodação e que esta alteração se devia à contracção de um músculo, o músculo ciliar descrito por Crampton e Müller, o que permitia reduzir a tensão sobre o próprio cristalino [4], [6]. Este facto possibilitava assim que ocorresse simultaneamente um aumento da espessura e diminuição do diâmetro equatorial do cristalino, o que contribuía para incrementar o seu poder refractivo.

Já no século XX, Fincham demonstrou que a forma peculiar do cristalino era devida à estrutura da sua cápsula, constituída por um segmento anterior mais espesso que o segmento posterior e sendo estes mais espessos na sua região periférica do que nos pólos. Segundo Fincham, seriam estas diferenças na cápsula do cristalino que estariam na origem da forma hiperbólica do cristalino durante o processo de acomodação [4], [6].

Foi à luz destes conhecimentos que os fundamentos teóricos para a fisiologia da acomodação foram sendo sucessivamente aperfeiçoados, sendo a teoria actualmente aceite baseada nos pressupostos originais de Helmholtz. Descreve-se em seguida o mecanismo da acomodação na sua totalidade.

2. FISILOGIA DA ACOMODAÇÃO

2.1. Reflexo da acomodação

O processo de focagem de um objecto ao perto implica a existência de 3 mecanismos diferentes: convergência dos olhos, acomodação das estruturas de refração e contracção das pupilas, globalmente designados de tríade acomodativa e controlados pela acção do sistema nervoso autónomo [1], [7].

Tudo começa quando um objecto é apresentado a curta distância do indivíduo e os raios luminosos provenientes do mesmo alcançam a retina, sendo captados pelos fotorreceptores (cones e bastonetes) que constituem o 1º neurónio da via óptica. A transdução que ocorre ao nível dos fotorreceptores dá origem a impulsos nervosos que seguem para as células bipolares (2º neurónio) e destas para as células ganglionares da retina (3º neurónio), cujos axónios formam o nervo óptico. Das células ganglionares da retina partem dois tipos de fibras:

1. Fibras corticais, correspondendo a cerca de 90% do total, que transmitem o impulso ao corpo geniculado externo ou lateral do tálamo, onde é feita a sinapse com o 4º neurónio, que por fim alcança o córtex visual primário (V1) e posteriormente as áreas visuais secundárias (V2, V3, V4, etc.), após sinapse com interneurónios [7].
2. Fibras não corticais, correspondentes aos restantes 10%, que se dirigem para a área pré-tectal (que também recebe aferências das córtex visual secundário), situada posteriormente aos colículos superiores, onde após nova formação de sinapses os neurónios atingem o núcleo de Perlia, situado entre os dois núcleos de Eddinger-Wesphal, donde partem 2 tipos de neurónios funcionalmente diferentes:
 - a. Neurónios que fazem sinapses com o núcleo motor somático do III par craniano (nervo motor ocular comum - MOC), donde por sua vez partem axónios para os músculos rectos internos, possibilitando o movimento de convergência [1], [7].
 - b. Neurónios que fazem sinapses com os núcleos acessórios e viscerais do MOC, como é o caso do núcleo de Eddinger-Westphal, donde também

partem axónios pré-ganglionares parassimpáticos que seguem até ao gânglio ciliar. Aqui têm origem 2 tipos de neurónios diferentes [1], [7]:

- i. Neurónios para o músculo ciliar, permitindo a acomodação do cristalino.
- ii. Neurónios para o músculo constritor da pupila, ocorrendo miose (fig.3).

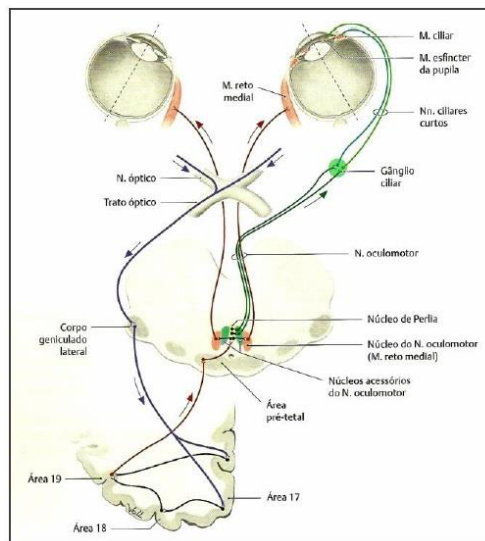


Figura 3 – Representação dos circuitos neurológicos do reflexo da acomodação (Adaptado de [7]).

2.2. Mecanismo ocular da acomodação

Na sequência do reflexo da acomodação os neurónios pós-ganglionares parassimpáticos que partem para o músculo ciliar são excitados, ocorrendo a libertação de acetilcolina que leva à contracção do músculo ciliar. A contracção deste músculo provoca um deslocamento do ápex medial do corpo ciliar em direcção ao eixo do globo ocular, levando a um relaxamento das fibras suspensoras do cristalino. Este facto contribui para que haja uma alteração das forças exercidas sobre a cápsula do cristalino, permitindo que este assuma a sua forma acomodada, caracterizada por uma diminuição do diâmetro e aumento da espessura do mesmo, bem como por um aumento da curvatura

das superfícies anterior e, em menor grau, posterior da sua cápsula [1], [2], [4], [6], [8], [9] (fig.4). É então através do conjunto destas alterações estruturais que o cristalino consegue aumentar o seu poder dióptrico, indispensável para possibilitar a visão ao perto. Paralelamente, verifica-se uma diminuição da profundidade das câmaras anterior e posterior devido ao aumento da espessura do cristalino, que ocorre em 75% da sua extensão devido ao movimento anterior da porção anterior da cápsula e 25% ao movimento posterior da porção posterior da cápsula [10] (fig.5).

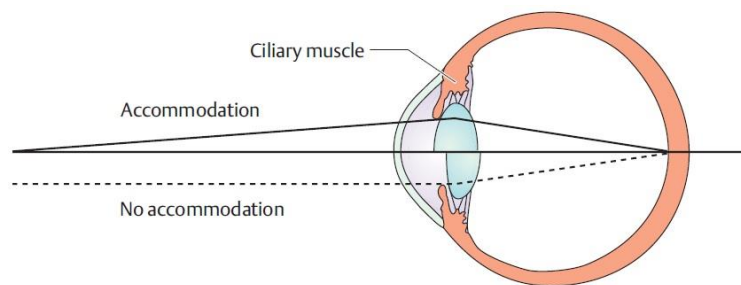


Figura 4 – Representação esquemática das alterações oculares estruturais ocorridas após o processo de acomodação. Constata-se ainda que objectos situados a curtas distâncias na metade superior da imagem se encontram focados na retina, o mesmo acontecendo com objectos situados a longas distâncias na metade inferior da figura (Adaptado de [2]).

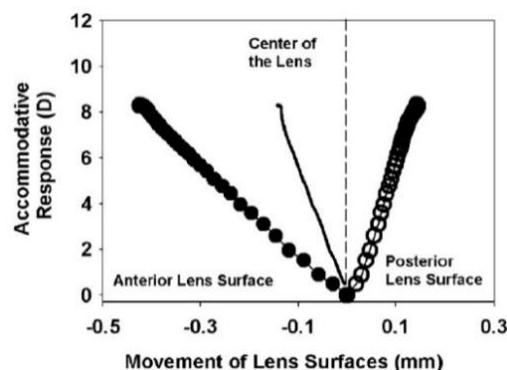
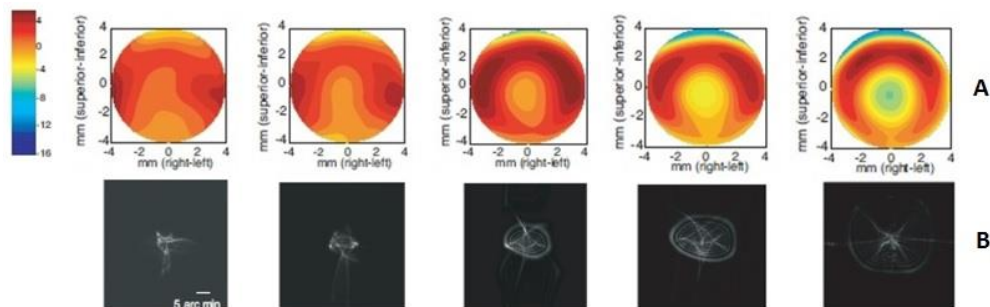


Figura 5 – Movimento dos segmentos anterior e, em menor grau, posterior da cápsula do cristalino após indução da acomodação por estimulação eléctrica do Núcleo de Eddinger-Westphal. O estudo foi realizado num macaco rhesus previamente iridectomizado e os resultados obtidos por biometria ultrassonográfica (Adaptado de [10] com permissão da Elsevier).

Quando o estímulo acomodativo cessa o músculo ciliar relaxa, o que origina um movimento centrífugo do ápex do corpo ciliar. Este movimento permite aumentar novamente a tensão sobre os ligamentos suspensores que, por sua vez, aumentam a tensão sobre a cápsula do cristalino e fazem com que este retorne à sua forma não acomodada [8].

Relembrando o circuito fisiológico da acomodação existem ainda neurónios pós-ganglionares parassimpáticos que se dirigem ao músculo constritor da pupila, tendo estes um papel igualmente importante na acomodação. Acontece que o processo acima descrito leva não apenas a um aumento do poder dioptrico do cristalino, mas também a uma exacerbação das aberrações esféricas negativas do cristalino [8], [11] (fig.6). Este termo designa o conjunto de situações nas quais os raios paraxiais são focados num ponto mais anterior comparativamente aos raios que incidem nas regiões mais periféricas do cristalino. Este efeito é atenuado pela contracção do músculo constritor da pupila, que ao reduzir o diâmetro do orifício pupilar permite que apenas os raios paraxiais possam penetrar no olho. Incidindo estes numa zona do cristalino com maior índice de refração, a miose ocorrida permite simultaneamente aumentar a amplitude da acomodação [8].



Figuras 6A e 6B – Alterações da acomodação em aberrações de frentes de onda medidas *in vivo* num macaco rhesus iridectomizado. **(A)** Mapas de frentes de onda mostrando um aumento das aberrações ópticas com o aumento da amplitude da acomodação (da esquerda para a direita: 0D; 1,41D; 3,88D; 5,93D e 10,91D). **(B)** Imagens relativas à correspondente propagação de pontos na retina, realçando o aumento das dimensões da imagem de propagação de pontos na retina à medida que a amplitude da acomodação também aumenta (Adaptado de [11]).

2.3. Teorias alternativas da acomodação

O mecanismo descrito para a fisiologia da acomodação baseia-se fundamentalmente nos pressupostos originais de Helmholtz elaborados no século XIX. No entanto, salienta-se que já no século XX surgiram duas teorias que vieram pôr em causa os fundamentos do físico alemão, as teorias de Tscherning (1909) e Schachar (1993), ambas defendendo a existência de aumento da tensão nos ligamentos suspensores do cristalino ao invés de uma diminuição [4], [6], [9].

Segundo Tscherning, a contracção do músculo ciliar geraria um aumento da tensão sobre os ligamentos suspensores do cristalino, assumindo assim a sua forma acomodada caracterizada por um achatamento das regiões periféricas do cristalino e aumento da curvatura no seu centro. Para além disso, esta teoria diferia da de Helmholtz por considerar que existiria um aumento e não uma diminuição do diâmetro equatorial do cristalino [4], [6], [9]. Esta teoria foi mais tarde destronada pela evidência científica de que ocorria efectivamente uma diminuição do referido diâmetro durante a acomodação. A título de exemplo, Glasser, Ostrin e Wendt [12] concluíram que havia um decréscimo de 7,04% na medida do diâmetro do cristalino durante a acomodação com base em estudos realizados no macaco rhesus e que essa diminuição era tanto maior quanto maior fosse a amplitude do estímulo utilizado para induzir a acomodação (tab.1).

Monkey Number and Eye	Accommodative Amplitude (D) ± SD	Unaccommodated Lens Diameter (mm) ± SD	Accommodated Lens Diameter (mm) ± SD	Percentage Decrease in Lens Diameter	Decrease in Lens Diameter per D of Accommodation (mm/D)
111 OS	9.71 ± 0.03	8.73 ± 0.00	8.06 ± 0.00	7.67	0.069
111 OS	12.86 ± 0.13	8.83 ± 0.00	8.19 ± 0.00	7.25	0.050
111 OD	9.14 ± 0.13	8.87 ± 0.00	8.28 ± 0.00	6.65	0.065
38 OS	10.84 ± 0.25	8.07 ± 0.00	7.57 ± 0.01	6.20	0.046
38 OD	8.53 ± 0.09	8.21 ± 0.00	7.60 ± 0.00	7.43	0.072
Mean ± SD	10.216 ± 1.70	8.542 ± 0.37	7.94 ± 0.33	7.04 ± 0.60	0.060 ± 0.01

Tabela 1 – Resultados da medição do diâmetro do cristalino na sua forma acomodada e não acomodada, apresentados sob a forma de Média±Desvio-padrão. Os resultados foram obtidos por análise de 20 imagens gravadas por *frames* de videogonoscopia (Adaptado de [12]).

Por outro lado, de acordo com Schachar e colaboradores, a contração do músculo ciliar geraria um aumento da tensão sobre a região equatorial do cristalino ao mesmo tempo que relaxaria as fibras suspensoras anteriores e posteriores do cristalino. Desta forma, durante o processo de acomodação ocorreria uma tracção da região equatorial do cristalino em direcção à esclerótica, que juntamente com o relaxamento das fibras suspensoras anteriores e posteriores, faria com que houvesse simultaneamente um aplanamento da região periférica do cristalino e um aumento da curvatura na sua região central [4], [6], [9]. No entanto, esta teoria foi igualmente rejeitada por Glasser e Kaufman, que através de estudos *in vivo* mostraram que durante a acomodação o equador do cristalino se afasta da esclerótica em vez de se aproximar [13] (fig.7).



Figuras 7A, 7B e 7C – Imagens de biomicroscopia por ultrassonografia da região ciliar de um macaco iridectomizado. **(A)** No olho não acomodado. **(B)** Após a acomodação. **(C)** Imagem de subtração, na qual se constata, entre outras alterações, que após a acomodação o cristalino se afastou cerca de 100 μm da esclerótica. Legenda: Scl = esclerótica; co = córnea; pz = zonula posterior; cm = músculo ciliar; cs = espaço peri-cristalino; le = equador do cristalino; cp = processos ciliares (Adaptado de [13]).

Desta forma, mantem-se assim vigente a teoria original de Helmholtz complementada pelas descobertas de Fincham e outros autores como fundamento teórico aceite para o mecanismo de acomodação.

3. ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DA ACOMODAÇÃO

3.1. Presbiopia

A capacidade de acomodação sofre alterações ao longo da vida. A perda gradual e fisiológica da capacidade de acomodação com a idade dá-se o nome de presbiopia, tendo início numa fase precoce da vida, decrescendo cerca de 2,5D por década e culminando na perda completa da capacidade de acomodação aos 50-55 anos [8]. Acredita-se que a génese da presbiopia seja multifactorial, envolvendo alterações no cristalino e respectiva cápsula, bem como modificações ao nível do músculo ciliar e da tensão dos ligamentos suspensores do cristalino [4], [8], [9], [14].

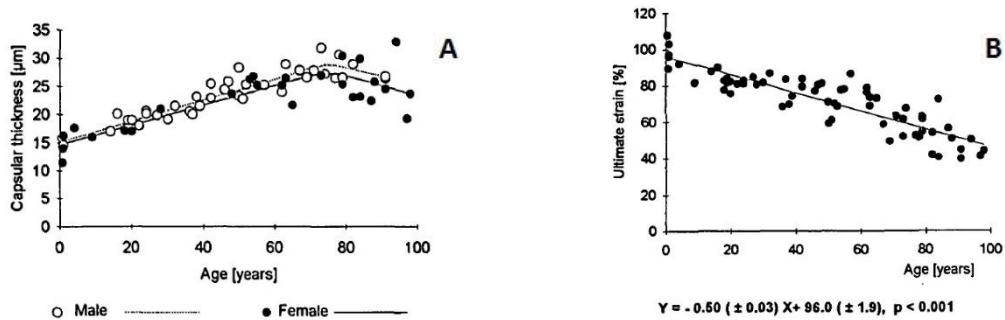
3.2. Alterações do aparelho da acomodação atribuíveis à idade

A perda da capacidade de acomodação ao longo da vida tem por base a ocorrência de alterações ligadas ao envelhecimento em diversas estruturas oculares. Descrevem-se assim algumas das modificações verificadas em cada parte do sistema que permite a acomodação.

3.2.1. Cápsula do cristalino

A espessura da porção anterior da cápsula do cristalino à nascença é de aproximadamente 11 micrometros, aumentando para cerca de 33 micrometros no indivíduo com cerca de 75 anos e decrescendo ligeiramente após essa idade, de acordo com Krag, Olsen e Andreasson [15] (fig.8A). Para além disso, demonstraram que a porção anterior da cápsula se tornava progressivamente menos elástica, tendo esta capacidade de aumentar o seu comprimento até 108% no indivíduo jovem quando esticada e que esse valor decrescia para cerca de 40% aos 98 anos (fig.8B). Outra importante conclusão a que este estudo chegou foi de que a força necessária para quebrar o segmento anterior da

cápsula se mantinha constante até aos 35 anos, decrescendo linearmente a partir dessa idade.

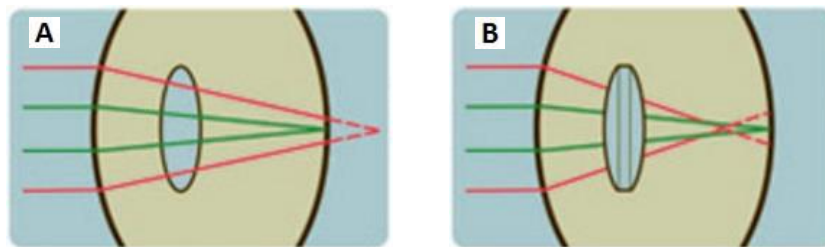


Figuras 8A e 8B – Representações gráficas das alterações ocorridas na cápsula do cristalino em função da idade. **(A)** Representação temporal do crescimento da cápsula do cristalino, aumentando até aos 75 anos e decrescendo a partir dessa idade. **(B)** Diminuição linear da elasticidade do cristalino desde o nascimento até aos 100 anos (Adaptado de [15]).

3.2.2. Dimensões do cristalino

O cristalino cresce continuamente ao longo da vida, aumentando a sua espessura axial como resultado da adição de novas fibras, embora mantendo o seu diâmetro equatorial. Para além disso, verifica-se que a curvatura dos segmentos anterior e posterior da cápsula do cristalino também sofre um aumento, o que analisado em conjunto com o aumento da espessura axial e manutenção do diâmetro equatorial relembra a forma adquirida pelo cristalino após o processo de acomodação [9], [14], [16], [17]. A única diferença reside no facto de o aumento da espessura axial do cristalino resultar de um aumento da espessura do córtex anterior e posterior do cristalino no indivíduo presbíope, enquanto no indivíduo não presbíope esse aumento é conseguido através de um aumento da espessura do núcleo do cristalino [8]. É de ressaltar, no entanto, que apesar de o cristalino parecer assumir a sua forma acomodada a presbiopia é caracterizada por uma perda de visão para o perto, introduzindo o conceito de *paradoxo do cristalino* (do inglês *lens paradox*) [14], [16], [17]. A razão pela qual tal acontece está relacionada com o facto de existir uma perda progressiva do índice de refração do cristalino devida à formação de agregados proteicos insolúveis e a um aumento do seu conteúdo em água [16]. Por

último, ressalva-se que o conjunto de alterações estruturais ocorridas no cristalino contribui para que as aberrações esféricas negativas que o mesmo apresenta no indivíduo jovem passem a positivas no presbíope, deixando assim de compensar as aberrações esféricas sempre positivas da córnea [9], [17], [18] (fig.9). Neste tipo de aberrações os raios mais periféricos são focados num ponto mais próximo do cristalino relativamente aos raios paraxiais. Desta forma, a ocorrência de miose durante a acomodação no presbíope leva a que apenas os raios paraxiais penetrem no olho, sendo refractados na região de menor poder dióptrico do cristalino. Conclui-se assim que esta situação contrasta com a acomodação ocorrida nos jovens, na qual a miose verificada num olho com aberrações esféricas negativas faz com que os raios incidam na região de maior poder refractivo do cristalino. Em suma, o mesmo acontecimento (miose) revela-se vantajoso no jovem e prejudicial no presbíope [18].



Figuras 9A e 9B – Representação esquemática das aberrações esféricas (A) negativas e (B) positivas do cristalino, verificadas no jovem e no presbíope, respectivamente (Adaptado de www.biotechvisioncare.com, consultado a 20 de Novembro de 2016).

3.2.3. Rigidez do cristalino

A rigidez do cristalino aumenta exponencialmente ao longo da vida [19], [20]. No cristalino do indivíduo jovem, o núcleo apresenta menor rigidez que o córtex, sendo o processo de acomodação efectuado graças a um aumento da rigidez da região nuclear. À medida que a idade progride ocorre um aumento da rigidez quer do núcleo quer do córtex do cristalino, mais marcado no primeiro de tal forma que a rigidez do núcleo ultrapassa a do córtex por volta dos 35 anos [19] (fig.10). Acredita-se que este facto seja determinante no processo de perda da capacidade acomodativa ao interferir com o fino equilíbrio

existente entre o núcleo, cápsula do cristalino e tensão dos ligamentos suspensores que possibilita o conjunto de mecanismos necessários à acomodação. Ainda a propósito da rigidez do cristalino, Glasser, Croft e Kaufman [20] realizaram uma experiência na qual isolaram o cristalino de 3 indivíduos de diferentes faixas etárias (5, 23 e 84 anos) e decidiram medir os seus diâmetros equatorial e ântero-posterior antes e depois da remoção da cápsula. Constataram assim que no indivíduo jovem a presença da cápsula permite que o cristalino assumira a sua forma acomodada, mudando para a forma não acomodada quando a cápsula é removida. O mesmo não foi verificado no idoso, no qual chegaram à conclusão que os 2 diâmetros eram independentes da presença da cápsula, sugerindo assim que o cristalino do indivíduo presbíope deixa de ser capaz de responder à cápsula durante o processo de acomodação (fig.11).

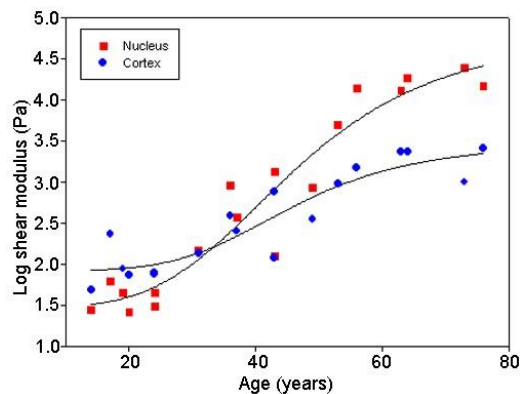
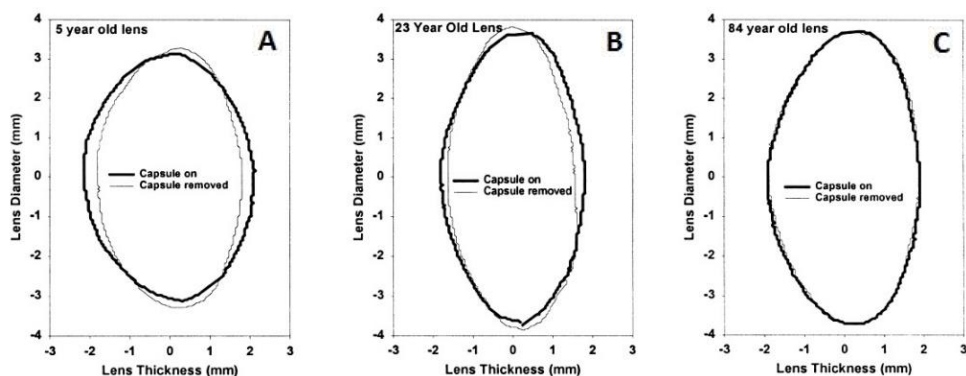


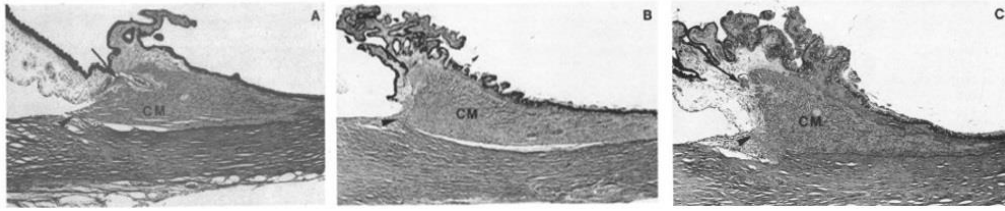
Figura 10 – Representação gráfica da evolução da rigidez do núcleo e córtex do cristalino em função da idade, mostrando um aumento exponencial em ambos os parâmetros, sobretudo do núcleo (Adaptado de [19]).



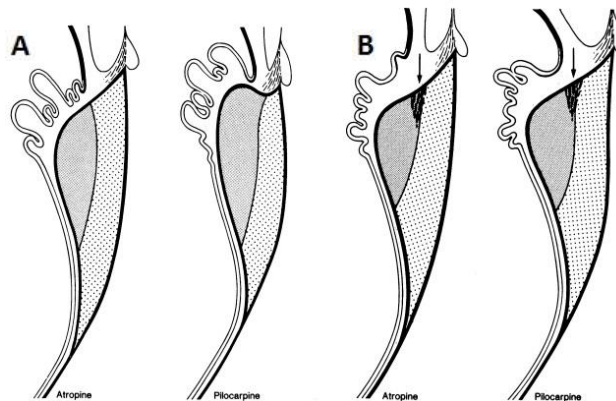
Figuras 11A, 11B e 11C – Efeito produzido pela remoção da cápsula do cristalino num indivíduo de (A) 5 anos (B) 23 anos e (C) 84 anos. No indivíduo A observa-se que a presença da cápsula permite que o cristalino assumira a sua forma acomodada, passando à forma não acomodada após remoção da sua cápsula. Este efeito de remoção da cápsula é reduzido no indivíduo B e está ausente no indivíduo C, mostrando como o aumento da rigidez do cristalino torna a sua forma independente da presença de uma cápsula (Adaptado de [20]).

3.2.4. Músculo ciliar

Com o envelhecimento verifica-se a existência de uma perda no número de fibras musculares e de uma expansão do tecido conjuntivo na mesma área. Não obstante, a força de contracção do músculo ciliar não decresce, podendo mesmo aumentar em virtude do esforço acomodativo que os presbíopes são obrigados a realizar [8], [9], [14]. Estudos histológicos realizados em preparações de músculos ciliares humanos atropinizados mostram uma diminuição do comprimento e da área total do músculo, salientando-se um crescimento do ápex interno do músculo ciliar não acomodado em direcção ao eixo do globo ocular, o que relembra a forma do músculo após acomodação no indivíduo jovem [21] (fig.12). Por outro lado, estudos feitos em macacos rhesus mostram a existência de uma diminuição da resposta à acomodação induzida pela pilocarpina com a idade. Tal acontece porque se verifica uma perda da elasticidade do tendão de inserção do músculo ciliar na membrana de Bruch da corioideia, apresentando este uma marcação positiva para as proteínas actina e desmina no macaco jovem e um aumento do número de fibras de colagénio no macaco mais velho [22] (fig.13).



Figuras 12A, 12B e 12C – Imagens histológicas de músculos ciliares humanos atropinizados mostrando alterações conformacionais em função da idade num indivíduo **(A)** de 34 anos, **(B)** de 59 anos e **(C)** de 80 anos. Verifica-se que o músculo ciliar atropinizado do indivíduo **C** relembra a forma do músculo ciliar de um indivíduo jovem após a acomodação, na qual também ocorre um movimento do seu ápex interno em direcção ao eixo do globo ocular (Adaptado de [21] com permissão da Elsevier).



Figuras 13A e 13B – Representação gráfica da configuração dos músculos ciliares de um macaco rhesus com **(A)** 8 anos e **(B)** 34 anos, tendo o esquerdo sido imerso numa solução de atropina e o direito numa solução de pilocarpina. No macaco **A** a exposição à pilocarpina causou uma alteração conformacional no músculo ciliar, ao passo que no indivíduo **B** tal não ocorreu pela perda de elasticidade do tendão de inserção do músculo na coroideia. Constata-se igualmente um crescimento de tecido conjuntivo no macaco **B**, nomeadamente na porção anterior do músculo ciliar e entre as camadas longitudinal e reticular (Adaptado de [22]).

3.2.5. Ligamentos suspensores do cristalino

Num indivíduo presbíope verifica-se um aumento da espessura do cristalino e da curvatura da sua cápsula, o que significa que a inserção capsular das fibras anteriores sofre um deslocamento anterior com o envelhecimento. Paralelamente, verifica-se que a distância entre a inserção capsular dos ligamentos e o corpo ciliar se mantém constante, o que permite concluir que há uma diminuição do ângulo de inserção das fibras mais anteriores. Este facto faz com que a força gerada pela contracção do músculo ciliar incida de forma quase tangencial sobre a cápsula, havendo assim uma maior dificuldade em induzir as alterações morfológicas do cristalino necessárias ao processo de acomodação [9], [14], [17]. Outra explicação possível para o desenvolvimento da presbiopia assenta na existência de uma diminuição do espaço em torno do cristalino (*circumlental space*), já que o diâmetro equatorial do cristalino permanece constante e se verifica simultaneamente um deslocamento centrípeto do ápex do corpo ciliar com o envelhecimento. A diminuição deste espaço acarreta uma redução da tensão dos ligamentos suspensores sobre a cápsula do cristalino, o que implica uma menor capacidade de alteração do seu poder refractivo uma vez que o ângulo de inserção das fibras não permite, neste caso, reduzir a tensão sobre a cápsula [9], [17].

3.3. Teorias explicativas da presbiopia

Tendo por base as modificações ocorridas em cada componente do sistema da acomodação surgiram diversas teorias para explicar o desenvolvimento da presbiopia, podendo estas ser divididas em teorias lenticulares, que envolvem alterações na rigidez, dimensões e cápsula do cristalino; extralenticulares, que têm por base modificações no músculo ciliar e na coroideia e ainda teorias geométricas, que preconizam a existência de alterações na inserção capsular dos ligamentos suspensores [4], [9], [14], [17].

No que concerne às teorias lenticulares, destacam-se essencialmente dois mecanismos explicativos diferentes: a teoria de Hess-Gullstrand e a teoria de Duane-Fincham [9], [23]. Segundo a primeira, a medida de contracção do músculo ciliar necessária para produzir a alteração de uma unidade no poder dióptrico do olho permanece constante ao longo da vida, o que significa que a razão convergência

acomodativa/acomodação (AC/A) não sofre alterações relacionadas com a idade. Por oposição, a teoria de Duane-Fincham defende que a medida de contracção do músculo ciliar aumenta com a idade de modo a produzir a mesma potência refractiva, o que implica um aumento da razão AC/A com o envelhecimento [23].

Partindo da certeza de que ocorre uma diminuição da amplitude da acomodação com a idade parece lógico acreditar que se verifique um aumento da força de contracção do músculo ciliar para produzir semelhante alteração no poder dióptrico do olho, o que favorece a teoria de Duane-Fincham. No entanto, parece igualmente plausível que o músculo ciliar possa ter alguma reserva contrátil em situações em que a capacidade de acomodação seja mínima, o que sustenta a teoria de Hess-Gullstrand [9]. Múltiplos estudos serão pois necessários para aferir qual das duas teorias melhor explica as alterações do cristalino envolvidas na génese da presbiopia.

4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ACOMODAÇÃO

A medição da acomodação e do erro refractivo é feita através de testes de refração que medem o poder refractivo adicional que é necessário para formar uma imagem nítida na retina, podendo estes ser feitos segundo uma avaliação objectiva ou subjectiva [2], [8].

4.1. Avaliação subjectiva

A avaliação subjectiva pode ser feita simplesmente pedindo ao doente para aproximar gradualmente as letras até ao ponto em que os seus olhos já não sejam capazes de as visualizar de forma nítida, o que constitui o chamado *push-up test*. O inverso desta distância medida, a distância focal, permite assim determinar o valor do poder de acomodação em dioptrias [8], [24].

Outra forma de avaliação subjectiva consiste na utilização de lentes negativas de potência refractiva crescente numa armação de prova até que o doente já não seja capaz de ver de forma nítida a última linha de letras da tabela de Snellen. Desta forma, a acomodação é determinada pelo valor em dioptrias das lentes negativas de maior potência com as quais o doente ainda é capaz de ver as letras mais pequenas da tabela de forma nítida [2], [8], [24].

4.2. Avaliação objectiva

A avaliação objectiva recorre a métodos manuais ou automáticos e tem como função complementar a avaliação subjectiva, constituindo a única ferramenta de avaliação em doentes que não fornecem informações, como é o caso das crianças. *Per se* esta avaliação não serve para prescrever qualquer tipo de correcção óptica uma vez que é sempre necessário aferi-la com a informação subjectiva dada pelo doente.

Os métodos manuais incluem 2 exames diferentes: retinoscopia e refractometria (não automática) [2]. No primeiro faz-se variar a incidência da luz de um retinoscópio horizontalmente no olho, gerando o reflexo vermelho. Se o reflexo retiniano e movimentar no mesmo sentido do movimento do retinoscópio o olho em análise é hipermetrope, necessitando de lentes positivas para correcção do erro de refração. Por oposição, se o reflexo se movimentar em oposição ao movimento do retinoscópio o olho é míope, precisando neste caso de lentes negativas (fig.14). Na avaliação por refractometria procede-se à observação oftalmoscópica de uma imagem teste projectada na retina do doente, sendo o erro refractivo medido ao variar a distância entre a figura de teste e o olho até a imagem aparecer nítida na retina [2]. Este método tem a desvantagem de não ser puramente objectivo, sendo apenas assim designado pelo facto de a escolha do doente acerca do momento em que a imagem aparece com maior nitidez ser substituída pela decisão do profissional que executa a técnica.

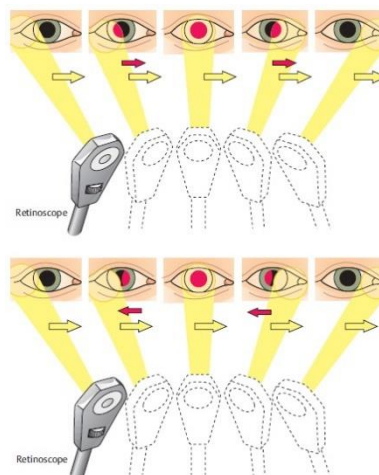


Figura 14 – Avaliação objectiva da acomodação por retinoscopia. Em **cima** observa-se que reflexo retiniano e o retinoscópio se movimentam no mesmo sentido, correspondendo a uma situação de hipermetropia. Em **baixo** constata-se que o reflexo retiniano e o retinoscópio se deslocam em sentidos opostos, sendo esta uma situação de miopia (Adaptado de [2]).

Mais recentemente foi possível fazer também a medição do erro refractivo através do recurso a métodos automáticos, como é o caso da autorefractometria, que actualmente já é o método objectivo mais utilizado [8], [25]. Existem fundamentalmente dois tipos de autorefractómetros: os de campo fechado, que modificam o seu sistema óptico até o erro de refacção do olho ser neutralizado, e os de campo aberto, que medem o poder de refacção através da análise das características da radiação reflectida no fundo do olho [26]. Estes autorefractómetros podem ter por base diferentes princípios de funcionamento:

1. O princípio de Scheiner: Os autorefractómetros que têm por base este princípio são os mais frequentemente utilizados e são de campo fechado, utilizando a luz infravermelha emitida por dois LEDs como meio de substituição dos dois orifícios de Scheiner [26]. Este sistema utiliza ainda a chamada lente ou optómetro de Badal, que permite que a imagem visualizada pelo doente tenha sempre o mesmo tamanho, independentemente da distância a que o fotorrefractor com LEDs se encontre, bem como uma imagem teste visualizada pelo doente através de um espelho e que se encontra inicialmente desfocada (*fogging reflex*) para evitar qualquer esforço acomodativo antes da avaliação do poder refractivo. Deste modo, a luz infravermelha emitida é reflectida no fundo do olho e é captada por uma câmara acoplada ao fotorreceptor, que por sua vez fornece os dados captados a um computador. O fotorreceptor que emite a luz infravermelha move-se ao longo de um eixo horizontal, aproximando-se progressivamente da lente de Badal até ao momento em que ocorra o fenómeno de neutralização, isto é, que se forme uma imagem única na retina do observador. O vídeo realizado pela câmara do fotorreceptor permite medir a distância percorrida pelo mesmo até à neutralização, informação que é enviada ao computador para cálculo do correspondente índice de refacção do meridiano testado [27] (fig.15).

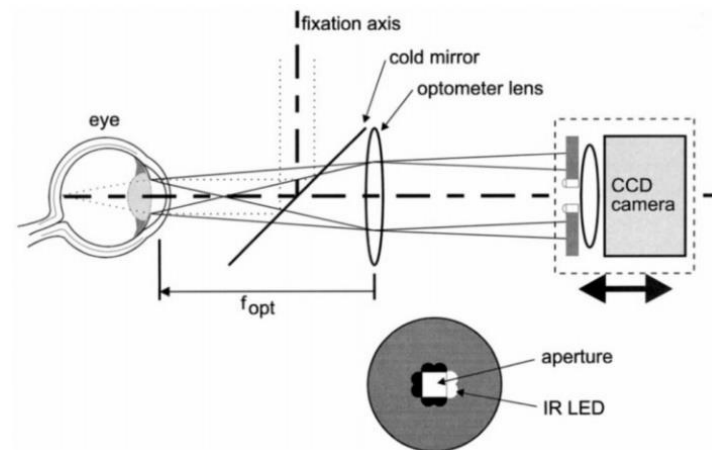


Figura 15 – Representação esquemática do modo de funcionamento dos autorefractómetros baseados no princípio de Scheiner (Adaptado de [27] com permissão da Elsevier).

2. A análise da qualidade da imagem: Estes autorefractómetros são simultaneamente de campo fechado e campo aberto, determinando o ponto de melhor qualidade de imagem em cada meridiano através da identificação da incidência de radiação (se forem de campo aberto) ou da posição da lente de Badal (se forem de campo fechado) que permite a obtenção da imagem com o maior grau de contraste, o que corresponde ao *endpoint* refractivo e ao momento em que a neutralização ocorre [26]. Quando este *endpoint* é atingido, o detector regista um pico no seu perfil de intensidade [28] (fig.16).

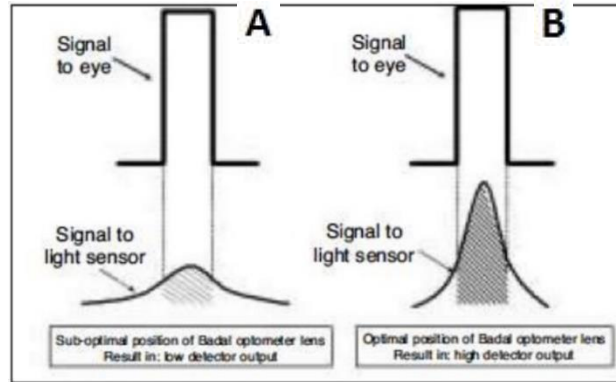


Figura 16 – Perfil de intensidade do output do fotodetector numa situação (A) de posicionamento sub-ótimo da lente de Badal, que possibilita a visualização da imagem sem o maior contraste e qualidade possível, e (B) numa situação de posicionamento ótimo da lente de Badal, na qual a imagem é visualizada com o melhor contraste e nitidez (Adaptado de [28]).

3. O efeito *knife-edge*: Os autorefractómetros que se baseiam neste princípio têm por base o teste de Foucault (*slit* ou *knife-edge test*), concebido em 1859 e utilizado para avaliar a uniformidade do índice de refração de espelhos e lentes [29]. Originalmente o teste consistia no uso de uma fonte luminosa que ao ser obrigada a passar por um orifício gerava um feixe luminoso de diâmetro limitado que era totalmente reflectido por um espelho ou lente. Se o espelho fosse perfeitamente esférico todos os raios luminosos convergiriam no mesmo ponto, formando uma imagem nítida do orifício num único ponto. Quando a ponta de uma faca (*knife-edge*) ou margem de um pedaço de papel é colocada ao nível deste ponto, verifica-se que basta realizar um pequeno movimento para passar de uma situação em que toda a luz chega ao olho para outra em que o feixe luminoso é totalmente bloqueado [26], [28], [29] (fig.17) . Nos casos em que o espelho não seja perfeitamente esférico poderá haver múltiplos pontos de refração, podendo existir pontos em que o feixe luminoso passe a ponta da faca quando toda a luz proveniente de outros pontos do espelho foi bloqueada ou, inversamente, pontos em que a luz é interrompida pela ponta da faca quando toda a restante luz chegou ao olho, criando assim áreas mais claras ou escuras que se destacam da tonalidade *background* da imagem que chega

ao olho [29] (fig.18). Na autorefractometria utiliza-se o mesmo teste, correspondendo neste caso a “lente” aos diversos componentes do sistema óptico e o “espelho” ao fundo ocular [26]. Neste processo, o feixe luminoso infravermelho emitido por um LED é reflectido no fundo do olho (retina) e regressa à sua fonte de origem, sendo captado pelo fotodetector acoplado ao LED. Por esta razão, a retinoscopia corresponde simplesmente a uma modificação do efeito *knife-edge* para proceder a uma avaliação objectiva da acomodação. Paralelamente, este efeito constitui também actualmente a base da técnica de fotorrefracção incorporada nos autorefractómetros, um método de avaliação rápido, objectivo e que não requer significativa colaboração por parte do doente, razão pela qual é utilizado principalmente em crianças [30]. Nesta técnica o poder refractivo é então calculado através da análise das características do movimento (velocidade e direcção) do reflexo retiniano captadas pelo fotodetector do respectivo meridiano.

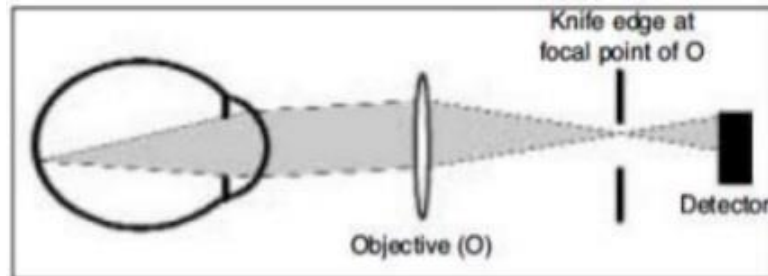


Figura 17 – Ilustração do efeito de *knife-edge* aplicado no ponto de convergência de todos os raios luminosos num sistema óptico perfeito (Adaptado de [28]).

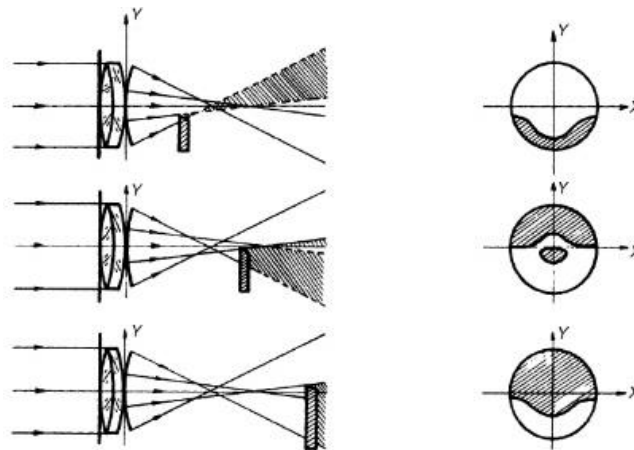


Figura 18 – Ilustração do princípio de *knife-edge*, aplicado à **esquerda** em 3 pontos diferentes do trajecto dos raios luminosos e com a correspondente imagem final visualizada à **direita** (Adaptado de [29]).

4. A análise das dimensões da imagem: Estes autorefractómetros são semelhantes aos que se baseiam no princípio de Scheiner, diferindo destes pelo facto de serem de campo aberto. O instrumento projecta um anel de luz infravermelha na retina do doente e as suas dimensões são medidas em 3 ou mais meridianos, sendo o erro de refacção calculado com base no grau de ampliação ou redução da imagem necessário para atingir a emetropia [25], [26].

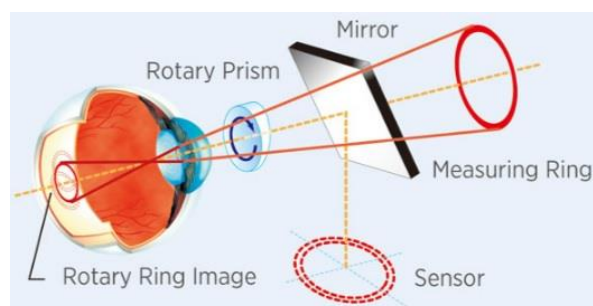


Figura 19 – Representação esquemática do modo de funcionamento de um autorefractómetro baseado na análise das dimensões da imagem (Adaptado de www.topcon.co.jp, consultado a 20 de Novembro de 2016).

4.3. Avaliação objectiva vs subjectiva

Apesar de a avaliação subjectiva ser importante para a prescrição de correcção óptica existe um conjunto de razões que fazem com que os resultados que se obtêm por este método sejam pouco fidedignos quando comparados com os fornecidos pela avaliação objectiva. Enumeram-se os seguintes factores [8]:

1. O limiar discriminativo do *push-up test* requer uma avaliação subjectiva sobre a distância para a qual a imagem deixa de ser nítida, o que pode ser variável de indivíduo para indivíduo;
2. O limiar discriminativo é influenciado por factores como a acuidade visual e a sensibilidade ao contraste, que podem influenciar a avaliação subjectiva;
3. O estímulo para a acomodação pode estar diminuído em ambientes pouco iluminados, na medida em que o nível de iluminação influencia o diâmetro das pupilas;
4. A existência de um atraso na resposta ao estímulo acomodativo (*accommodation lag*) pode fazer com que a distância a que as letras são apresentadas seja menor do que a distância correspondente ao limiar de acomodação do doente, ou seja, inferior à distância focal.

Uma última objecção aos métodos subjectivos consiste no facto de o *push-up test* não permitir diferenciar uma alteração verdadeira do poder dióptrico do olho de uma simples alteração da profundidade de campo causada por alterações pupilares e aberrações oculares [24], [25]. A profundidade de campo pode ser definida como a distância a que um objecto pode ser movido proximalmente ou distalmente ao indivíduo sem que haja alterações perceptíveis na nitidez com que o mesmo é observado. Como exemplo pode referir-se que em situações de midríase existe um amplo cone de luz a penetrar na retina, fazendo com que um pequeno erro de refacção resulte em grandes alterações na nitidez da imagem, havendo dessa forma uma menor profundidade de campo. Por outro lado, em situações de miose o cone de luz que atravessa o olho é mais estreito, o que faz com que um pequeno erro de refacção produza alterações igualmente pequenas no contorno dos objectos visualizados, existindo assim uma maior profundidade de campo [8] (fig.20).

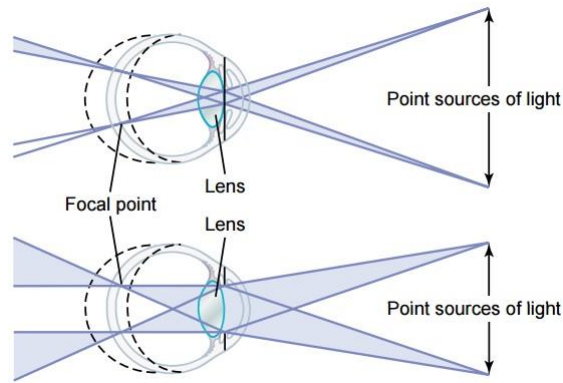


Figura 20 – Representação do efeito de profundidade de campo e da sua variação com alterações do diâmetro pupilar. Em **cima** está representada uma situação de miose, a que corresponde uma maior profundidade de campo. Em **baixo** está ilustrado um caso de midríase, ao qual corresponde uma menor profundidade de campo (Adaptado de [1] com permissão da Elsevier).

De referir ainda que existência de aberrações ópticas, como é o caso do astigmatismo, coma e aberração esférica, tende igualmente a aumentar a profundidade de campo [8], [14]. Tal acontece porque a presença de aberrações a nível ocular implica que os raios que atravessam o olho apresentem diferentes pontos de convergência, dependendo do local da córnea e do cristalino onde são refractados. Isto faz com que possa haver um aumento da distância a que o objecto é apresentado sem que sejam notadas alterações na nitidez com que o mesmo é visto.

Por último, lembre-se apenas que acomodação e miose são processos sinérgicos, o que implica que a ocorrência de acomodação leve necessariamente a um aumento da profundidade de campo. Este facto tende assim a sobrestimar o poder dióptrico do olho em cerca de 1-2D, sendo uma explicação possível para que indivíduos com presbiopia ($D=0$) possam ter resultados de 1D quando a sua acomodação é avaliada por métodos subjectivos, o que corresponde à chamada “pseudoacomodação” [8], [9], [14], [24] (fig.21). O próprio *lag accommodation* ao fazer com que o objecto seja apresentado a uma distância inferior à verdadeira distância focal também sobrestima o poder dióptrico do doente, já que este corresponde ao inverso da distância focal (fig.22).

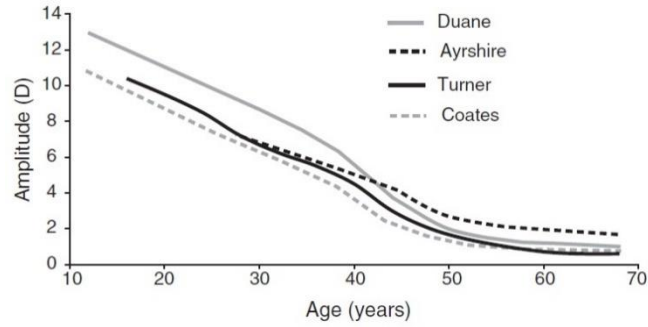


Figura 21 – Resultados da avaliação subjectiva da acomodação medida por 4 autores diferentes. Os resultados mostram valores de acomodação compreendidos entre 0 e 2D após os 50 anos idade, sobrestimando o poder dióptrico dos indivíduos (Adaptado de [9]).

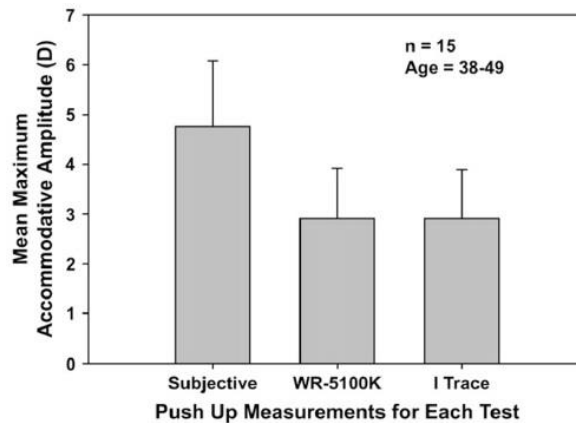


Figura 22 – Resultados da avaliação da acomodação em 15 indivíduos através de métodos objectivos e subjectivos, mostrando novamente a sobrestimação dos valores obtidos pelos métodos subjectivos. Constata-se também que os valores obtidos por diferentes instrumentos de avaliação objectiva, o WR-5100K e o iTrace, não diferem significativamente entre si (Adaptado de [24] com permissão da Elsevier).

Comparativamente à avaliação subjectiva, os métodos objectivos fornecem resultados mais fidedignos. Contudo, estes podem ser influenciados pelo tipo de avaliação efectuada (estática ou dinâmica), método de estimulação da acomodação utilizado e ainda pelo modo como a imagem que serve de estímulo à acomodação é apresentada, isto é, se pode ser vista por ambos os olhos ou por apenas um deles [8].

Nos casos em que for feita apenas uma avaliação estática o autorrefractómetro pode não conseguir determinar o ponto em que a acomodação é máxima. Este problema pode ser ultrapassado pelo recurso a uma avaliação dinâmica, que permite determinar a variação da resposta acomodativa ao longo de um determinado período de tempo através da criação de um gráfico dinâmico do qual se pode seleccionar o momento em que a imagem aparece com maior nitidez [8], [31] (fig.23). Para além disso, apenas a avaliação dinâmica permite obter dados sobre a dinâmica da acomodação, fornecendo informações sobre a aceleração, latência e velocidade máxima da acomodação.

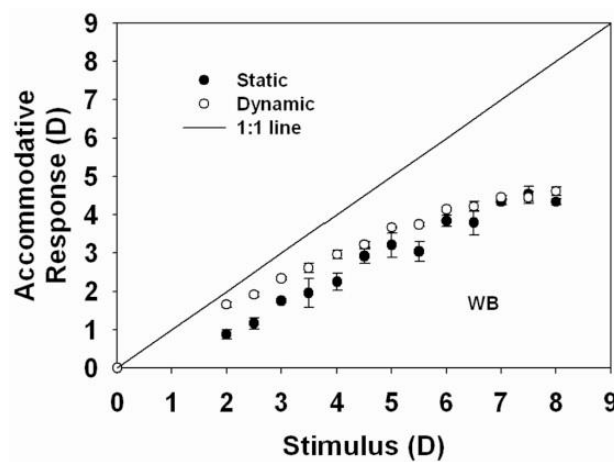


Figura 23 – Avaliação da acomodação através de medições estáticas e dinâmicas realizadas com o auxílio do autorrefractómetro Grand-Seiko WAM-5500. Conclui-se que com as medições dinâmicas se obtêm resultados superiores pelo facto de as avaliações estáticas poderem não conseguir determinar o momento em que a acomodação é máxima (Adaptado de [31]).

Uma última questão pertinente relativa à avaliação objectiva da acomodação consiste em esclarecer qual o seu melhor método de avaliação: retinoscopia ou autorefractometria. Jorge, Queirós, Almeida e Parafita [32] propuseram-se a avaliar numa população de 192 jovens adultos entre os 18 e os 34 anos qual seria o melhor ponto de partida para a avaliação objectiva da acomodação sem cicloplegia, ou seja, qual dos dois métodos forneceria valores mais próximos dos obtidos com a avaliação subjectiva, fundamental para a prescrição de correcção óptica em adultos. Concluíram assim que a

retinoscopia, quando efectuada por um clínico experiente, constituía um melhor ponto de partida para a avaliação objectiva sem cicoplegia por se aproximar mais dos valores fornecidos pela avaliação subjectiva da acomodação (tab.2).

	Sphere (%)	Cylinder (%)	Axis (%)	Sph + cyl + ax (%)
AR	44.3	89.6	55.2	21.9
RET	74.5	96.9	65.6	50.0

Tabela 2 – Percentagem de casos avaliados por autorefractometria e retinoscopia que apresentaram uma variação não superior a $\pm 0,25D$ em torno do valor correspondente fornecido pela avaliação subjectiva (Adaptado de [32]).

AGRADECIMENTOS

Esta tese de mestrado foi elaborada sob a supervisão do Prof. Doutor Carlos Marques Neves, que contribuiu não apenas para a escolha do tema e para o fornecimento de fontes bibliográficas fidedignas, mas também para o sucessivo aperfeiçoamento da dissertação através de críticas construtivas à mesma. Sem os seus conhecimentos aprofundados e actualizados sobre Fisiologia ocular a versão final desta tese não teria certamente sido a mesma.

No entanto, a dissertação não poderia ter sido elaborada igualmente sem a aprovação do regente da área disciplinar de Oftalmologia, Prof. Doutor Manuel Monteiro-Grillo, que assim possibilitou a redacção de uma tese cujo tema era do agrado tanto do autor como do seu orientador.

E por último uma palavra muito especial a todos os meus amigos e familiares sem os quais não teria igualmente evoluído como aluno e ser humano. Foram sem dúvida eles que me forneceram as ferramentas que me permitiram ter a ambição de ingressar numa área profissional exigente e de querer valorizar sempre todas as formas possíveis de aprendizagem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. E. Hall and A. C. Guyton, *Textbook of medical physiology, eleventh edition*. Philadelphia, Penn.: Elsevier Saunders, 2006.
- [2] G. K. Lang, *Ophthalmology: A Pocket Textbook Atlas; revised and enlarged-With 510 illustrations & 50 tables*. Thieme, 2007.
- [3] N. J. Wade, *Destined for distinguished oblivion : the scientific vision of William Charles Wells (1757-1817)*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.
- [4] L. Werner, F. Trindade, F. Pereira, and L. Werner, “Fisiologia da acomodação e presbiopia,” *Arq. Bras. Oftalmol.*, vol. 63, no. 6, pp. 487–493, 2000.
- [5] W. H. Vogel and A. Berke, *Brief history of vision and ocular medicine*. Amsterdam: Kugler/Wayenborgh, 2009.
- [6] G. O. Ovenseri-Ogbomo and O. A. Oduntan, “Mechanism of accommodation: A review of theoretical propositions,” *African Vis. Eye Heal.*, vol. 74, no. 1, p. 6 pages, 2015.
- [7] R. S. Snell, *Neuroanatomia clínica para estudantes de medicina*. Guanabara Koogan, 2010.
- [8] P. L. Kaufman, F. H. Adler, L. A. Levin, and A. Alm, *Adler’s Physiology of the Eye*. Elsevier Health Sciences, 2011.
- [9] W. N. Charman, “The eye in focus: Accommodation and presbyopia,” *Clin. Exp. Optom.*, vol. 91, no. 3, pp. 207–225, 2008.
- [10] A. S. Vilupuru and A. Glasser, “The relationship between refractive and biometric changes during Edinger–Westphal stimulated accommodation in rhesus monkeys,” *Exp. Eye Res.*, vol. 80, no. 3, pp. 349–360, 2005.
- [11] A. S. Vilupuru, A. Roorda, and A. Glasser, “Spatially variant changes in lens power during ocular accommodation in a rhesus monkey eye,” *J. Vis.*, vol. 4, no. 4, pp. 299–309, 2004.
- [12] A. Glasser, M. Wendt, and L. Ostrin, “Accommodative changes in lens diameter in rhesus monkeys,” *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 278–286, 2006.
- [13] K. Ludwig, A. Kampik, A. Glasser, and P. L. Kaufman, “The mechanism of accommodation in primates,” *Ophthalmology*, vol. 106, pp. 863–872, 1999.
- [14] T. Kohnen and D. D. Koch, *Cataract and refractive surgery*, 3rd ed. Berlin: Springer,

2009.

- [15] S. Krag, T. Olsen, and T. Andreassen, "Biomechanical characteristics of the human anterior lens capsule in relation to age," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 38, no. 2, pp. 357–363, 1997.
- [16] M. Dubbelman and G. L. Van Der Heijde, "The shape of the aging human lens: Curvature, equivalent refractive index and the lens paradox," *Vision Res.*, vol. 41, no. 14, pp. 1867–1877, 2001.
- [17] A. Glasser and M. C. W. Campbell, "Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age," *Vision Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 209–229, 1998.
- [18] A.-N. Gilg, *Presbyopia: Therapies and Further Prospects*. JP Medical Ltd, 2015.
- [19] K. R. Heys, S. L. Cram, and R. J. W. Truscott, "Massive increase in the stiffness of the human lens nucleus with age: the basis for presbyopia?," *Mol. Vis.*, vol. 10, no. December, pp. 956–963, 2004.
- [20] A. Glasser, M. a Croft, and P. L. Kaufman, "Aging of the human crystalline lens and presbyopia.," *Int. Ophthalmol. Clin.*, vol. 41, no. 2, pp. 1–15, 2001.
- [21] S. Tamm, E. Tamm, and J. W. Rohen, "Age-related changes of the human ciliary muscle. A quantitative morphometric study," *Mech. Ageing Dev.*, vol. 62, no. 2, pp. 209–221, 1992.
- [22] L. Elke, E. Tamm, and P. L. Kaufman, "Age-Related Loss of Morphologic Responses to Pilocarpine in Rhesus Monkey Ciliary Muscle," *Arch. Ophthalmol.*, vol. 106, no. 11, pp. 1591–1598, 1988.
- [23] O. Franzén, H. Richter, and L. Stark, *Accommodation and vergence mechanisms in the visual system*. Basel ; Boston: Birkhäuser Verlag, 2000.
- [24] D. M. Win-hall and A. Glasser, "Objective accommodation measurements in prepresbyopic eyes using an autorefractor and an aberrometer," *J. Cataract Refract. Surg.*, vol. 34, no. 5, pp. 774–784, 2008.
- [25] D. M. Win-hall, L. a Ostrin, and S. Kasthurirangan, "Objective Accommodation Measurement with the Grand Seiko and Hartinger Coincidence Refractometer," *Optom. Vis. Sci.*, vol. 84, no. 9, pp. 879–887, 2007.
- [26] W. J. Benjamin and I. M. Borish, *Borish's clinical refraction*, 2nd ed. St. Louis, Mo.: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2006.

- [27] A. Roorda, W. R. Bobier, and M. C. W. Campbell, "An infrared eccentric photometer," *Vision Res.*, vol. 38, no. 13, pp. 1913–1924, 1998.
- [28] D. Arora, "Autorefractometer [powerpoint presentation]." Belgaum, India, 2015.
- [29] D. Malacara, *Optical shop testing*, vol. 59. John Wiley & Sons, 2007.
- [30] M. Millodot, *Dictionary of optometry and visual science*. Elsevier Health Sciences, 2014.
- [31] D. M. Win-Hall, J. Houser, and A. Glasser, "Static and dynamic accommodation measured using the WAM-5500 Autorefractor.," *Optom. Vis. Sci.*, vol. 87, no. 11, pp. 873–82, 2010.
- [32] J. Jorge, A. Queirós, J. B. Almeida, and M. a Parafita, "Retinoscopy/autorefraction: which is the best starting point for a noncycloplegic refraction?," *Optom. Vis. Sci.*, vol. 82, no. 1, pp. 64–8, 2005.

NOTAS FINAIS

Para a realização do presente Trabalho Final foi necessária a obtenção de permissão para a reprodução de figuras e tabelas publicadas nos livros de texto e artigos científicos consultados.

Para tal foi contactada a Elsevier, a principal editora dos livros de texto de Oftalmologia consultados, assim como dos jornais e revistas cujos artigos serviram de base à redacção da presente Tese Final de Mestrado. Desta forma, foi assim concedida autorização pela Elsevier para a reprodução das figuras e tabelas das fontes bibliográficas utilizadas, sem quaisquer encargos financeiros associados, dentro das finalidades previamente acordadas de reprodução para fins meramente académicos de apresentação de uma tese ou dissertação:

GENERAL TERMS

2. Elsevier hereby grants you permission to reproduce the aforementioned material subject to the terms and conditions indicated.

3. Acknowledgement: If any part of the material to be used (for example, figures) has appeared in our publication with credit or acknowledgement to another source, permission must also be sought from that source. If such permission is not obtained then that material may not be included in your publication/copies. Suitable acknowledgement to the source must be made, either as a footnote or in a reference list at the end of your publication, as follows:

"Reprinted from Publication title, Vol /edition number, Author(s), Title of article / title of chapter, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER]." Also Lancet special credit - "Reprinted from The Lancet, Vol. number, Author(s), Title of article, Pages No., Copyright (Year), with permission from Elsevier."

4. Reproduction of this material is confined to the purpose and/or media for which permission is hereby given.

5. Altering/Modifying Material: Not Permitted. However figures and illustrations may be altered/adapted minimally to serve your work. Any other abbreviations, additions, deletions and/or any other alterations shall be made only with prior written authorization of Elsevier Ltd. (Please contact Elsevier at permissions@elsevier.com)

6. If the permission fee for the requested use of our material is waived in this instance, please be advised that your future requests for Elsevier materials may attract a fee.

7. Reservation of Rights: Publisher reserves all rights not specifically granted in the combination of (i) the license details provided by you and accepted in the course of this licensing transaction, (ii) these terms and conditions and (iii) CCC's Billing and Payment terms and conditions.