



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Ciências da Saúde

Consequências Visuais da Exposição a Estímulos Estereoscópicos

Anita Gabriela Moreira Nunes da Costa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Optometria em Ciência da Visão
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Professor Doutor António Manuel Gonçalves Pinheiro
Co-orientador: Professor Doutor Francisco Brardo Ferreira

Covilhã, Junho de 2014

"A todos aqueles que tornaram possível a conclusão de mais uma etapa da minha vida e me mostraram que seguir em frente é sempre o melhor caminho. Para vós pais, irmãs, sobrinhos, amigos e a ti Miguel, por estares comigo em todos os momentos."

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores. Ao Professor Doutor António Pinheiro pela oportunidade de integrar esta equipa de investigação e por partilhar todo o seu conhecimento. Ao Professor Doutor Francisco Brardo o meu muito obrigada por toda a sapiência, dedicação e ajuda nos momentos mais difíceis da investigação.

O meu segundo agradecimento é para o Jorge Santos, por todas as grandes discussões, pela partilha de conhecimento e ainda pela paciência na resolução de muitos problemas de investigação ao longo do programa de mestrado. Não menos importante, gostaria de mencionar os meus colegas de laboratório e amigos, em especial ao Marco Bernardo, Daniel Piedade, Rui Brás, Rui Paulo, Fábio Teixeira, Francisco Vigário, Pedro Correia, Rui Santos, Gil Ribeiro e Nádía Silva, por todo suporte e amizade.

Não menos importante mas diferente agradecimento aos meus pais e irmãs, particularmente á Mariana Costa, por terem acreditado em mim, não só no meu percurso académico e profissional, mas também em todos os projetos pessoais em que estive envolvida.

Por fim, mas não o último, gostaria de agradecer ao meu namorado pela sua motivação, ajuda e compreensão durante estes anos que, infelizmente, não estive tão presente quanto gostaria. O tempo livre acabou por ser dedicado a este trabalho, abdicando de algumas oportunidades para estar com ele. Para ele toda a minha gratidão e amor.

Bem haja a todos.

Resumo

A tecnologia de imagem tridimensional (3D) enriquece a experiência visual, através da inclusão da informação de profundidade. Atualmente, e embora todo o sucesso da técnica, muitos estudos demonstram as suas implicações na visão. Os utilizadores relatam queixas associadas á exposição estereoscópica, nomeadamente desconforto, fadiga visual, enjoos e dor de cabeça.

Neste trabalho são estudadas as consequências visuais que resultam da exposição a estímulos estereoscópicos. Para 30 indivíduos com média de idade de $23,33 \pm 4,32$ anos, foram medidos antes e após a visualização de um filme em 3D todos os parâmetros do sistema vergencial e a estereopsia. A exposição de estímulos estereoscópicos foi dividido em três sessões com duração de 20 , 40 e 60 minutos em dias diferentes. O filme "HUGO" foi escolhido para produzir o estímulo visual, visualizado á distância de 1 metro.

Foram observadas alterações estatisticamente significativas nos valores de estereopsia e reservas fusionais positivas após longos períodos de exposição. O mesmo não acontece para as reservas fusionais negativas. A heteroforia e a disparidade de fixação apresentaram tendência significativa para a direção exo. Por conseguinte, conclui-se que a longa exposição a estímulos 3D poderá reduzir significativamente a estereopsia.

A análise destes parâmetros e a sua possível relação com o cansaço visual é uma questão importante, tendo em conta o renovado interesse pelo conteúdo 3D entre os consumidores.

Palavras-chave

Exposição estereoscópica, estereopsia, foria, disparidade de fixação, reservas fusionais positivas, reservas fusionais negativas e fadiga visual.

Abstract

The three-dimensional (3D) technology enhances the viewing experience by adding the depth information. Currently, and although all the success of the technique, there are many studies that demonstrate some vision implications. Users reported complaints associated with stereoscopic display, especially discomfort, eyestrain, headaches and dizziness.

Thus, in this work the visual consequences that result of the exposure to 3D stimulus in the near vision are studied. Hence, the whole vergence system and stereopsis of 30 subjects with $23,33 \pm 4,32$ years were measured, before and after the visualization of a 3D movie. The exposure of stereoscopic stimulus was divided in 3 sessions with duration 20, 40 and 60 minutes in different days. The "HUGO"film was chosen to produce the visual stimulus, watched with a viewing distance of 1 meter.

Significant statistical changes in the values of stereopsis and positive fusional reserves after long exposures to 3D stimulus were observed. However, the same is not true for the negative fusional reserves, disparity fixation and phoria. Therefore was concluded that long exposure to 3D stimuli significantly reduces the stereopsis. Moreover, the phoria and disparity fixation tends to move in the exo direction. The analysis of these parameters and the relation with the typical visual fatigue that results of 3D stimulus exposure is an important issue considering the increased interest for 3D content among consumers.

Keywords

Stereo Exposure, stereopsis, phoria, fixation disparity, positive fusional reserves, negative fusional reserves and visual fatigue.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Abordagem Adotada	2
1.4	Estrutura da dissertação	2
2	Visão Binocular e Percepção do Espaço	5
2.1	Introdução	5
2.2	Particularidades da Visão Binocular	5
2.2.1	Fixação	6
2.2.2	Correspondência Retiniana	6
2.2.3	Disparidade Retiniana	6
2.2.4	Horóptero	7
2.2.5	Área Fusionável de Panum	8
2.3	Níveis de Visão Binocular	9
2.3.1	Percepção Macular Simultânea	9
2.3.2	Fusão	10
2.3.3	Estereopsia	10
2.4	Pistas Monoculares de Profundidade	12
2.5	Ligação Acomodação-Vergência	14
2.5.1	Acomodação	14
2.5.2	Vergência	17
2.6	Disparidade de Fixação	20
2.7	Heteroforia	23
2.8	Zona de Conforto Visual	24
2.9	Conclusão	27
3	Consequências visuais da exposição a estímulos 3D	29
3.1	Introdução	29
3.2	Estado da Arte	29
3.2.1	Breve contextualização histórica	30
3.2.2	Diferentes tipos de visualização	31
3.2.3	Síndrome da Visão 3D	32
3.2.4	Desconforto Visual vs Fadiga Visual	33
3.2.5	Causas do desconforto e da fadiga visual	35
3.3	Conclusão	45

4	Ensaio Clínico	47
4.1	Introdução	47
4.2	Metodologia Experimental	47
4.2.1	Caraterização da Amostra	48
4.2.2	Material e Equipamento Utilizado	48
4.3	Procedimento Experimental	50
4.3.1	Parâmetros Analisados	51
4.3.2	Estímulo Estereoscópico	52
4.3.3	Protocolo Experimental	52
4.4	Resultados	53
4.4.1	Análise da Estereopsia	53
4.4.2	Análise das Vergências Fusionais Negativas	54
4.4.3	Análise da Vergências Fusionais Positivas	56
4.4.4	Análise da Heteroforia	57
4.4.5	Análise da Disparidade de Fixação	58
4.5	Discussão	62
4.6	Conclusão	65
5	Conclusões e Trabalho Futuro	67
5.1	Conclusões	67
5.2	Trabalho Futuro	69
	Bibliografia	71
	Anexo A	79
A.1	Parecer da Comissão de Ética	81
A.2	Consentimento Informado	85
A.3	Gráficos das Curvas de Vergências Forçadas	89
A.4	Trabalho apresentado no âmbito da presente dissertação	107

Lista de Figuras

2.1	Ilustração da geometria da visualização em profundidade.	7
2.2	Representação do Espaço de Panum em função da excentricidade retiniana. . .	8
2.3	Diplopia fisiológica.	9
2.4	Conceitos da estereopsia local e global.	12
2.5	Esquema das diferentes pistas monoculares e binoculares de profundidade. . .	13
2.6	Imagem com pistas monoculares de profundidade.	13
2.7	Relação entre os principais fatores associados às características do alvo/imagem e a resposta acomodativa.	16
2.8	Relação dos limites de desfocagem e a excentricidade retiniana.	17
2.9	Relação dos mecanismos de acomodação e vergência.	19
2.10	Curva de Vergências Forçadas e seus componentes mais importantes.	21
2.11	Tipos de Curvas de Vergências Forçadas.	22
2.12	Relação entre a heteroforia horizontal e disparidade de fixação.	24
2.13	Zona de Visão Binocular Nítida e Simples.	25
2.14	Ilustração da heteroforia em visualização natural.	25
2.15	Representação das áreas de conforto segundo Percival e Sheard.	26
3.1	Montagem experimental do primeiro estereoscópico de Wheatstone.	30
3.2	Estatística apresentada em 2000 pela empresa PricewaterhouseCoopers, sobre a quantidade de filmes 3D produzidos ao longo das décadas.	31
3.3	Esquema das visualizações possíveis com as respectivas variações das distâncias focal e vergencial.	31
3.4	Relação entre a disparidade e o nível de fadiga visual.	36
3.5	Ilustração representativa da relação entre frequências espaciais e a amplitude de disparidade.	37
3.6	Esquema dos diferentes estágios da criação de imagens tridimensionais.	38
3.7	Ilustração do comportamento das distâncias vergencial e focal durante a visualização natural e a visualização estereoscópica com paralaxe positiva.	41
3.8	Efeito da desfocagem na acomodação e vergência.	41
3.9	Representação da zona de conforto visual em função da distância de visualização.	43
3.10	Comportamento da acomodação e da vergência de um participante do estudo.	44
4.1	Teste Randot Stereo.	49
4.2	Barra de prismas vertical e horizontal.	49
4.3	Janela principal do software desenvolvido para o estudo.	50
4.4	Montagem experimental do estudo.	52

4.5	Gráfico representativo das variações da estereopsia antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos.	53
4.6	Gráficos das reservas fusionais negativas antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos.	54
4.7	Gráficos de superfície dos valores obtidos na divergência antes e após as diferentes sessões.	55
4.8	Gráficos das reservas fusionais positivas antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos.	56
4.9	Gráficos de superfície dos valores obtidos na convergência antes e após as diferentes sessões.	57
4.10	Gráfico das variações da heteroforia antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos.	58
4.11	Gráfico das variações da heteroforia em cada participante nas diferentes sessões.	58
4.12	Gráfico das variações da disparidade de fixação antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos.	59
4.13	Gráfico da disparidade de fixação média antes e após as diferentes sessões.	59
4.14	Curva de Vergências Forçadas do participante 27 nas diferentes sessões.	60
4.15	Diagrama demonstrativo dos resultados obtidos no estudo.	65
A.1.1	Parecer favorável da Comissão de Ética.	83
A.2.1	Consentimento Informado entregue a cada participante.	87
A.3.1	Curva de Vergências Forçadas do participante 1 nas diferentes sessões.	91
A.3.2	Curva de Vergências Forçadas do participante 2 nas diferentes sessões.	91
A.3.3	Curva de Vergências Forçadas do participante 3 nas diferentes sessões.	92
A.3.4	Curva de Vergências Forçadas do participante 4 nas diferentes sessões.	92
A.3.5	Curva de Vergências Forçadas do participante 5 nas diferentes sessões.	93
A.3.6	Curva de Vergências Forçadas do participante 6 nas diferentes sessões.	93
A.3.7	Curva de Vergências Forçadas do participante 7 nas diferentes sessões.	94
A.3.8	Curva de Vergências Forçadas do participante 8 nas diferentes sessões.	94
A.3.9	Curva de Vergências Forçadas do participante 9 nas diferentes sessões.	95
A.3.10	Curva de Vergências Forçadas do participante 10 nas diferentes sessões.	95
A.3.11	Curva de Vergências Forçadas do participante 11 nas diferentes sessões.	96
A.3.12	Curva de Vergências Forçadas do participante 12 nas diferentes sessões.	96
A.3.13	Curva de Vergências Forçadas do participante 13 nas diferentes sessões.	97
A.3.14	Curva de Vergências Forçadas do participante 14 nas diferentes sessões.	97
A.3.15	Curva de Vergências Forçadas do participante 15 nas diferentes sessões.	98
A.3.16	Curva de Vergências Forçadas do participante 16 nas diferentes sessões.	98
A.3.17	Curva de Vergências Forçadas do participante 17 nas diferentes sessões.	99
A.3.18	Curva de Vergências Forçadas do participante 18 nas diferentes sessões.	99

A.3.19 Curva de Vergências Forçadas do participante 19 nas diferentes sessões.	100
A.3.20 Curva de Vergências Forçadas do participante 20 nas diferentes sessões.	100
A.3.21 Curva de Vergências Forçadas do participante 21 nas diferentes sessões.	101
A.3.22 Curva de Vergências Forçadas do participante 22 nas diferentes sessões.	101
A.3.23 Curva de Vergências Forçadas do participante 23 nas diferentes sessões.	102
A.3.24 Curva de Vergências Forçadas do participante 24 nas diferentes sessões.	102
A.3.25 Curva de Vergências Forçadas do participante 25 nas diferentes sessões.	103
A.3.26 Curva de Vergências Forçadas do participante 26 nas diferentes sessões.	103
A.3.27 Curva de Vergências Forçadas do participante 27 nas diferentes sessões.	104
A.3.28 Curva de Vergências Forçadas do participante 28 nas diferentes sessões.	104
A.3.29 Curva de Vergências Forçadas do participante 29 nas diferentes sessões.	105
A.3.30 Curva de Vergências Forçadas do participante 30 nas diferentes sessões.	105
A.4.1 <i>Poster</i> apresentado no <i>workshop</i> da <i>Summer School</i> do COST 3D-ConTourNet. . .	109

Lista de Tabelas

3.1	Tabela resumo dos principais artefatos que afetam o conteúdo da imagem 3D gerados durante a sua criação.	38
3.2	Relação entre a distância de observação e os limites de visão confortável em metros para 1 ° de disparidade.	42
4.1	Sequência do método experimental utilizado	51
4.2	Erro Quadrático Médio obtido para cada participante nas diferentes sessões. . .	61
4.3	Erro Quadrático Médio grande em pelo menos duas sessões.	61
4.4	Erro Quadrático Médio pequeno em pelo menos duas sessões.	62

Acrónimos

2D bidimensional

3D tridimensional

AC/A Acomodação Vergencial por Acomodação

AV Acuidade Visual

cm centímetros

CVF Curva de Vergências Forçadas

D Dioptrias

EQM Erro Quadrático Médio

FAB Flexibilidade Acomodativa Binocular

FAM Flexibilidade Acomodativa Monocular

h hora

m metros

mm milímetros

MEM Método de Estimação Monocular

min minutos

minarc minutos de arco

PPC Ponto Próximo de Convergência

s segundos

segarc segundos de arco

UBI Universidade da Beira Interior

ZVBSN Zona de Visão Binocular Simples e Nítida

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo define os objetivos e o âmbito do trabalho de investigação descrito nesta dissertação, bem como os passos efetuados para o concluir. Refere também as principais contribuições e o avanço do conhecimento científico. A última secção descreve o conteúdo de cada capítulo da dissertação.

1.1 Motivação

A principal função do sistema visual é localizar objetos no espaço tridimensional. A visão binocular proporciona essa experiência extraordinária e única, devido à diferente percepção inerente a cada indivíduo.

Atualmente, a nível da tecnologia, as pessoas utilizam cada vez mais a imagem tridimensional, na tentativa de tornar a virtualidade um pouco mais realista. Casos disso são a comercialização de televisões com ecrãs estereoscópicos, aplicações para telemóveis e jogos de computador.

Em visualização natural (no dia-a-dia), normalmente, os parâmetros visuais como a acomodação, vergências e a percepção estereoscópica, encontram-se apenas diminutos em indivíduos com problemas binoculares. Contudo, em visualização estereoscópica indivíduos sem problemas binoculares, ao fim de algum tempo de exposição relatam sintomas associadas a essa visualização. Acompanhados destes sintomas, muitos estudos comprovam objetivamente a alteração de certos parâmetros visuais. Estes, foram relacionados com a principal razão de fadiga visual abordada na literatura, o conflito acomodação-vergência. Inúmeros são os estudos da resposta acomodativa, da relação entre o sistema acomodação-vergência através da medição da relação AC/A , do diâmetro pupilar e da amplitude fusional. Quanto à exploração direta do sistema motor e a sua relação entre a capacidade estereoscópica, poucos são os dados referenciados. Durante a visualização estereoscópica a disparidade apresentada no ecrã, obriga a vergência a estar em constante mudança, para que a imagem seja projetada na fóvea de cada olho, e seja percebida uma só imagem. O estímulo focal mantém-se no plano do ecrã de forma a manter a imagem nítida.

Recentemente, alguns estudos contradizem os resultados para o conflito acomodação-vergência, ficando a dúvida se na verdade este será o principal fator para os sintomas referidos pelos utilizadores desta técnica.

O trabalho descrito neste documento, visa efetuar numa primeira etapa, a revisão bibliográfica do tema e numa segunda etapa a parte experimental, na qual se pretende estudar as possíveis variações de alguns parâmetros visuais após exposição a estímulos estereoscópicos e a sua relação causa-efeito.

1.2 Objetivos

Tendo em conta o problema apresentado na secção anterior face à utilização da tecnologia 3D, o conflito entre a acomodação e a vergência poderá não ser o principal motivo de fadiga visual. O objetivo deste programa de dissertação de mestrado é avaliar diferentes parâmetros visuais após uma exposição estereoscópica. Com esta recolha de dados pretende-se verificar se existem, ou não, variações na estereopsia, disparidade de fixação, heteroforia e reservas fusionais (positivas e negativas) e encontrar o tempo necessário para que, caso hajam variações, estas sejam significativas.

1.3 Abordagem Adotada

De modo a atingir os objetivos propostos na secção 1.2, este trabalho foi dividido em quatro fases distintas:

1. Contextualização do problema com a investigação existente na área de conhecimento. Esta inclui a revisão do estado da arte relacionado com a problemática descrita.
2. Delimitação da montagem experimental e validação dos resultados preliminares. Nesta fase está englobado a escolha dos testes para a medição dos parâmetros visuais bem como a determinação das condições de visualização.
3. Seleção dos observadores para a realização da experiência e recolha dos respetivos dados.
4. Tratamento dos dados e conclusões.

A organização geral da dissertação descrita nesta secção reflete as diferentes etapas deste trabalho.

1.4 Estrutura da dissertação

O corpo da dissertação é composto por cinco capítulos. O conteúdo de cada um pode ser resumido como se segue:

- Capítulo 1 - **Introdução** - apresenta a motivação e os objetivos subjacente ao trabalho proposto, bem como a abordagem usada para atingir os objetivos designados. Na última secção é feita uma breve apresentação da estrutura da dissertação.

- **Capítulo 2 - Visão Binocular e Percepção do Espaço** - contém a introdução ao tema explorado. São apresentadas algumas definições e a relação entre os parâmetros visuais analisados.
- **Capítulo 3 - Consequências Visuais da Exposição a Estímulos 3D** - contém a revisão do estado da arte. Inicialmente é feita uma contextualização histórica do tema, seguido da apresentação das consequências e causas da fadiga e desconforto visuais associado a este tipo de visualização.
- **Capítulo 4 - Ensaio Clínico** - descreve a metodologia experimental e apresenta os resultados obtidos. É feita também a análise estatística e discussão dos mesmos.
- **Capítulo 5 - Conclusões e Trabalho Futuro** - apresenta as principais conclusões desta investigação através dos resultados obtidos e aponta direções para trabalhos futuros.

Anexo A - inclui quatro documentos. Em A.1 é apresentado o parecer favorável da Comissão de Ética da Faculdade de Ciências da Saúde da UBI. O Consentimento Informado facultado a cada participante do estudo consta em A.2. Os gráficos das Curvas de Vergências Forçadas de cada participante constam em A.3. A última secção, A.4, contém o trabalho apresentado no âmbito da presente dissertação.

Capítulo 2

Visão Binocular e Percepção do Espaço

A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.

Albert Einstein

2.1 Introdução

A visão binocular tem como função principal coordenar a informação que cada olho capta do espaço separadamente e transformá-la numa percepção binocular única. A binocularidade é uma das mais importantes funções do sistema visual humano. A visão binocular fornece mais vantagens visuais do que apenas a visão monocular. As melhorias proporcionadas são por exemplo, ao nível do tamanho do campo visual, discriminação da cor e controlo motor.

Este capítulo pretende descrever a visão binocular e a percepção de profundidade. Assim, na secção 2.2 são abordados alguns conceitos subjacentes a esta temática, nomeadamente fixação, correspondência e disparidade retinianas, horóptero e área fusionável de Panum. Tendo em consideração que a visão binocular pode ocorrer em diferentes etapas visuais, na secção 2.3 são apresentados os diferentes níveis de visão binocular. Na secção 2.4 são demonstradas as diferentes pistas monoculares que permitem a percepção de profundidade, sem ser necessário recorrer a pistas binoculares. A ligação neuronal mais importante da visão binocular ocorre entre a acomodação e a vergência, descrita na secção 2.5. Enquanto a acomodação mantém o objeto nítido, a vergência assegura a singularidade da imagem percebida por força do sistema motor. O estímulo do sistema motor, a disparidade de fixação, é explorada na secção 2.6. A secção 2.7 aborda a heteroforia, uma vez que este é o único tipo de desvio ocular permitido na visão binocular. Por último, na secção 2.8 é discutida a zona de visão binocular nítida e simples, bem como a sua relação com os conceitos associados à visão binocular.

2.2 Particularidades da Visão Binocular

Na visão binocular, existem muitos conceitos intrínsecos que são fundamentais para a descrição desta potencialidade do sistema visual. Estes conceitos são apresentados de seguida.

2.2.1 Fixação

A **fixação** representa a direção das linhas visuais que interseccionam o ponto de fixação. Quando apenas um olho fixa um ponto do objeto, denomina-se por fixação monocular. A fixação binocular ou bifoveal ocorre quando a fixação é feita por ambos os olhos. Para que haja fixação são necessárias quatro condições:

1. boa função foveal;
2. objeto com contornos distintos, dado que uma área homogênea não estimula o reflexo de fixação;
3. objeto situado numa região de interesse;
4. direção visual na fóvea e não com estimulação retiniana periférica.

2.2.2 Correspondência Retiniana

A correspondência retiniana é um processo que designa um par de pontos correspondentes. Estes representam áreas retinianas que partilham a mesma direção visual subjetiva de um objeto numa determinada posição do espaço. Por isso, cada ponto de uma determinada área da retina de um olho, apenas tem correspondência a um ponto da retina do outro olho. Estes pontos partilham, normalmente a mesma localização anatômica - a fóvea. Contudo, pontos retinianos dispares até 1Δ podem ser pontos correspondentes, pela força da fusão (discutido na secção 2.3). Quando um par de pontos retinianos não correspondentes são estimulados, ocorre a percepção de duas imagens. Neste caso, os indivíduos podem desenvolver adaptações sensoriais como a correspondência retiniana anómala.

2.2.3 Disparidade Retiniana

A **disparidade retiniana** descreve a relação (distância entre os pontos de fixação) das imagens retinianas para pontos retinianos correspondentes de um objeto no espaço (1). É um dos estímulos do sistema motor que permite fixar um objeto mais afastado ou próximo do ponto de fixação.

Para imagens que incidem em pontos correspondentes a sua disparidade é nula. Quando a disparidade retiniana é pequena resulta na capacidade de fusão das duas imagens retinianas. A estimulação de pontos dispares do objeto denomina-se por **disparidade**. Este processo é descrito geometricamente, como apresenta a figura 2.1. Supondo que os pontos A e B de um objeto estão a uma distância d e δd do observador, a disparidade é dada pela diferença entre os ângulos θ_D e θ_E , ou seja:

$$\delta\theta = \theta_D - \theta_E = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (2.1)$$

Em que θ_D , θ_E representam a separação angular do objeto nos pontos nodais do olho direito (N_D) e do olho esquerdo (N_E) e α_1 . Considerando a aproximação paraxial, $d \gg p$, a dispari-

dade angular é dada por:

$$\delta\theta = (p/d) - (p/(d + \delta d)) \approx p\delta d/d^2, \quad (2.2)$$

ou

$$\delta d \approx \delta\theta \cdot d^2/p \quad (2.3)$$

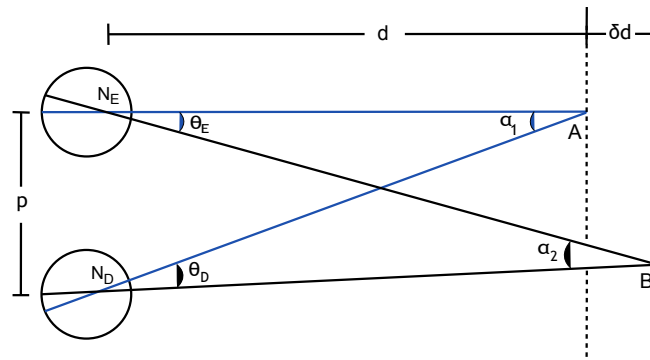


Figura 2.1: Ilustração da geometria da visualização em profundidade (adaptado de (2)).

Onde, p é a distância interpupilar e d a distância do observador ao objeto. O valor de δd corresponde à mínima separação entre dois pontos que pode ser detetada para uma determinada distância de observação. Quando a disparidade retiniana é muito grande e a imagem incide em pontos não correspondentes ocorre diplopia.

A disparidade pode classificar-se em heterónima/cruzada ou homónima. A **disparidade cruzada** ou **paralaxe negativa** estimula pontos do lado temporal da retina, por isso, o objeto aparenta estar mais próximo do observador. Por sua vez, a **disparidade homónima** ou **paralaxe positiva** estimula pontos do lado nasal da retina levando que os objetos sejam percebidos mais afastados do observador. Na disparidade cruzada, a capacidade para perceber a profundidade é melhor (3). Esta melhoria é expressa pela maior velocidade de deteção da profundidade, comprovando assim, provavelmente maior sensibilidade para estímulos com este tipo de disparidade. Uma explicação possível para este fato são as diferentes das áreas de Panum para cada tipo de disparidade (abordado na seção 2.2.5).

2.2.4 Horóptero

O conceito de horóptero foi desenvolvido pelo estudo de Aguilonius em 1613. Este define uma superfície imaginária no espaço visual sobre a qual a disparidade é nula. O horóptero representa uma referência para o estudo da visão binocular e diz respeito à região de máxima estereoacuidade (melhor percepção de profundidade). Portanto, determina concretamente o *locus* de todos os pontos de fixação que estimulam pontos retinianos correspondentes a uma

determinada distância. Os pontos de fixação que se encontram nesta superfície são percebidos como únicos. Contudo, quando estão fora do horóptero não significa que sejam percebidos em diplopia. Existe uma região do espaço, tendo ainda como referência o horóptero, onde os pontos podem ser percebidos como únicos. A região é conhecida por **espaço de Panum** e permite além da visão simples a visualização estereoscópica dos objetos.

2.2.5 Área Fusionável de Panum

O espaço de Panum tem correspondência a uma área da retina em cada olho, as quais se denominam por **áreas fusionáveis de Panum**. Estas delimitam a área na retina, na qual a imagem de um objeto no espaço, continua a ser percebida como única. A área de Panum depende de alguns fatores tais como as características do estímulo e a excentricidade retiniana. A figura 2.2 apresenta a excentricidade retiniana no espaço de Panum. Este, aumenta com o tamanho e desfocagem do estímulo e com estímulos cinéticos lentos.

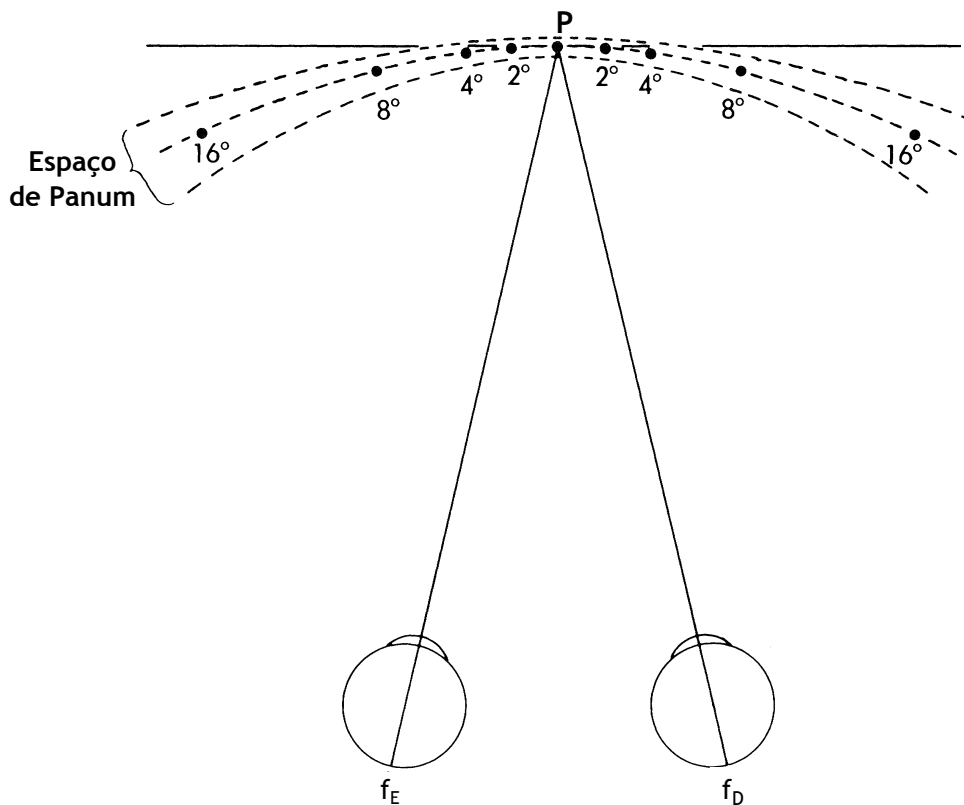


Figura 2.2: Representação do Espaço de Panum em função da excentricidade retiniana, onde P é o ponto de fixação; f_E a fóvea do olho esquerdo e f_D a fóvea do olho direito (adaptado de (4)).

Também sobre a retina, os limites das áreas de Panum não são constantes. Alargam com o aumento da excentricidade a partir da fóvea. Na fóvea, a fusão sensorial (abordada na secção 2.3.2) só ocorre para valores de disparidade retiniana até 0.1° . Para 6° de excentricidade a disparidade tolerada é de 0.33° e para 12° de excentricidade a disparidade máxima é de 0.66° .

Erkelens (5) através de estereogramas de pontos aleatórios verifica que geralmente, as imagens

são fusionáveis até 2 a 3° de disparidade. Quando os limiares diplópicos são ultrapassados ocorre a diplopia fisiológica, podendo ser heterónoma/cruzada ou homónima (figura 2.3) mediante o tipo de disparidade induzida. Quando um objeto está mais próximo do que o ponto de fixação, ocorre diplopia cruzada, pois a imagem que é projetada na retina incide no lado temporal, dando a percepção que o objeto aparece do lado oposto (figura 2.3a). Quando um objeto está mais afastado que o ponto de fixação, ocorre diplopia homónima, na qual a imagem projetada na retina incide no lado nasal, dando a percepção que o objeto aparece do mesmo lado (figura 2.3b).

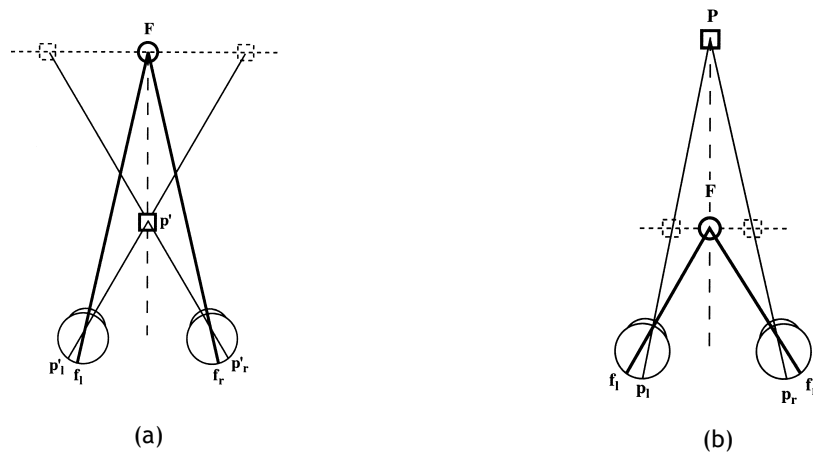


Figura 2.3: Diplopia fisiológica. (a) Diplopia Cruzada. (b) Diplopia Homónima.

O **limiar diplópico** ou **limite de fusão** acontece para grandes disparidades retinianas entre duas imagens em que estas ainda são percebidas como uma. Para uma determinada direção do espaço, o diâmetro da área fusionável de Panum representa o somatório do limiar diplópico para as disparidades cruzada e homónima. Estes limiares nem sempre são simétricos devido possivelmente, à direção visual incorreta para ponto de fixação, ditando a disparidade de fixação. A relação entre os limites de fusão e a disparidade de fixação é abordada na secção 2.6.

2.3 Níveis de Visão Binocular

A visão binocular pode classificar-se em três níveis, também denominados por níveis ascendentes de Worth, que são eles os seguintes: a percepção macular simultânea, a fusão e o nível mais fino de visão binocular, a estereopsia (4). Estes níveis pressupõem que para um nível superior, os antecedentes foram obrigatoriamente cumpridos.

2.3.1 Percepção Macular Simultânea

A Percepção Macular Simultânea é a primeira etapa da visão binocular e diz respeito à projeção das diferentes imagens na fóvea de cada olho que partilham a mesma posição do espaço. Quando as imagens são de tal forma distintas ocorre a diplopia. Contudo, nesta etapa a figura percebida é um mosaico, devido à componente espacial dos pontos retinianos. Este, resulta da sobreposição de cada imagem construída na retina esquerda e direita que variando temporal-

mente altera a contribuição monocular para a imagem percebida - a **rivalidade retiniana**. Esta designação representa a teoria de que as retinas de cada olho competem entre si para que a informação de cada uma delas se sobreponha relativamente à outra. Assenta, também na ideia que o córtex visual não funde as duas informações simultaneamente e que a contribuição para essa fusão não é igual, dando origem ao conceito de dominância ocular.

2.3.2 Fusão

A fusão é um processo fisiológico cuja finalidade é eliminar a disparidade retiniana e dessa forma transformar perceptualmente as duas imagens retinianas numa só. A fusão é um processo binocular, uma vez que ocorre para pontos correspondentes das áreas retinianas, isto é, o objeto tem de estimular simultaneamente áreas retinianas que tenham a mesma correspondência cortical. Existem dois tipos de componentes da fusão: a sensorial e a motora.

1. Fusão Motora

A fusão motora é definida como a capacidade de alinhamento dos olhos para que se mantenha a percepção de uma única imagem. É também uma função exclusiva da retina periférica/extrafoveal. Sempre que a imagem do objeto seja projetada na fóvea não existe estímulo para a fusão motora. Apenas se estimula a fusão motora quando a imagem está nos limites ou perto das áreas de Panum. Desta forma, esta componente reduz a disparidade horizontal, vertical e torcional, ainda assim não é necessária para que ocorra a fusão.

2. Fusão Sensorial

A fusão sensorial é o processo através do qual as duas imagens retinianas são vistas como uma só. É uma função exclusivamente da retina central. Ainda que a fusão motora não consiga colocar a imagem na fóvea central, pode ocorrer fusão sensorial, uma vez que erros de fusão motora até 2° são tolerados e conseguem ainda ser fusionados através da plasticidade neuronal. Este processo ocorre para imagens nas áreas retinianas correspondentes bem como tamanhos e brilho semelhantes entre as imagens. Quando as imagens são muito distintas a fusão pode não ocorrer e a imagem é percebida em diplopia.

Portanto, como referido anteriormente, os limites de fusão correspondem às áreas fusionais de Panum, caracterizadas pela máxima disparidade tolerada pelo mecanismo de fusão.

2.3.3 Estereopsia

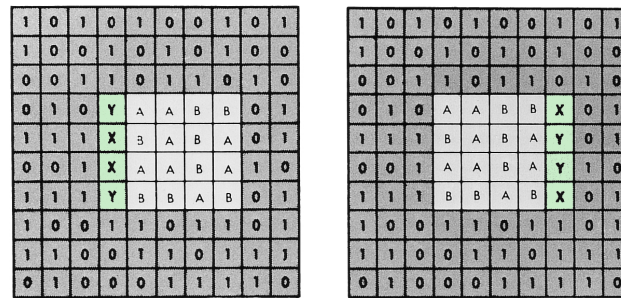
A estereopsia é a capacidade de perceber binocularmente a profundidade, e por isso é considerada o mais alto nível de cooperação binocular. Este processo ocorre pela diferença entre as duas imagens retinianas.

Através da disparidade retiniana o cérebro funde a imagem do olho esquerdo e direito e retira a informação da disparidade relativa, identificando desta forma uma localização tridimensional do objeto no espaço. Este fato torna a estereopsia dependente do sistema neuronal (6).

Atendendo a esta dependência e aos diferentes subsistemas das vias visuais que estão associadas, pode-se dividir a estereopsia em duas componentes: fina e grosseira. A **estereopsia fina** está relacionada com o subsistema parvocelular devido à conexão com a retina central. É estimulada por elevadas frequências espaciais, baixas disparidades retinianas e alvos estacionários ou com pouco movimento. A visão foveal proporciona elevada acuidade estereoscópica. No caso da **estereopsia grosseira**, as células magnocelulares são responsáveis pela conexão entre a retina central e periférica. Esta componente responde eficazmente a estímulos com frequências espaciais baixas e grandes disparidades retinianas e a estímulos dinâmicos.

Embora a estereopsia seja o nível superior da visão binocular, Julesz comprova que através da informação monocular também se obtém percepção de profundidade (7). Esta conclusão foi fundamentada com a invenção de estereogramas de pontos aleatórios (*Random-dot stereograms test*). Estes são constituídos por duas imagens, que vistas individualmente são apenas pontos distribuídos aleatoriamente, todavia quando são fusionados por força da vergência surge a percepção de profundidade. Cada vista monocular possui posições relativas ligeiramente dissimilares. Quando esta diferença, está no centro do estereograma e a informação se encontra deslocada horizontalmente entre a vista esquerda e da direita (figura 2.4a) a estereopsia elicitada, não se deve ao reconhecimento ponto a ponto ou quadrado-quadrado, mas sim entre os estereogramas para ambas as vistas. Esta correlação foi denominada de **estereopsia local**. Na figura 2.4a está representado o princípio utilizado nos estereogramas. Cada pixel central (letras A e B) representado por cada posição da matriz presente na imagem de cada olho está deslocado horizontalmente (letras x e y com preenchimento verde). O número 1 representa a cor branca e o zero a cor preta. Quando a estereopsia ocorre tendo em conta a totalidade dos pares de pontos ou linhas apresentadas para cada vista, é classificada como **estereopsia global**. Um exemplo de teste com este tipo de estereopsia é o estereoscópio. Na figura 2.4b é apresentada uma carta com círculos concêntricos para serem fusionados com a utilização do estereoscópio.

Outra classificação possível da estereopsia tem em conta os seus limites (horóptero como ponto de referência) e a qualidade da percepção estereoscópica. Quando a disparidade induz a estereopsia e está perto do horóptero, a percepção de profundidade é mais precisa. Ogle denominou-a por **estereopsia manifesta** e ocorre em visão binocular simples ou para pequenas quantidades de diplopia (8). A **estereopsia qualitativa** obriga a presença da diplopia fisiológica. A percepção de profundidade é pouco evidente pois o objeto percecionado encontra-se demasiado afastado do horóptero, por isso só é distinguida uma direção para a profundidade, mais perto ou mais afastado do que a fixação (noção de diplopia fisiológica) (9).



(a)



(b)

Figura 2.4: Conceitos da estereopsia local e global (adaptado de (4)). (a) Princípio dos estereogramas. (b) Círculos concêntricos para serem fusionadas através do estereoscópio.

2.3.3.1 Estereoacuidade

A **estereoacuidade** é a mínima disparidade horizontal requerida para que o indivíduo perceba profundidade, portanto é a menor disparidade retiniana que consegue ser detetada. Este limiar diminui progressivamente do centro para a periferia da retina, contudo não representa uma função linear. Depende de alguns fatores tais como a distância pupilar, a distância objeto e a separação entre os pontos estimulados. Os diferentes testes deste parâmetro não apresentam os mesmos resultados, contudo uma boa estereoacuidade central é considerada entre os 15 a 30' (4). Um valor normal para a estereoacuidade periférica situa-se próximo dos 200'.

2.4 Pistas Monoculares de Profundidade

Apesar da percepção do espaço depender de pistas binoculares como a disparidade retiniana, o cérebro utiliza as pistas monoculares para maximizar a percepção do espaço. As pistas de profundidade binoculares e monoculares encontram-se esquematizados na figura 2.5. A pista binocular de **disparidade retiniana** é a principal responsável pelos **movimentos de vergência** de modo a facilitar a fusão e dessa forma a percepção de profundidade. As pistas monoculares são a acomodação, a declinação angular, a paralaxe e as características da imagem. A **inclinação angular** é a pista facultada através da inclinação da cabeça. Através da inclinação horizontal, por exemplo, um objeto que esteja colocado no chão a uma determinada distância do observador, é visto em profundidade. O movimento de **paralaxe** é uma pista monocular cinética. É conseguida enquanto se fixa um objeto e se alterna a posição do olhar/cabeça. O objeto adota posições aparentes para cada posição do olhar. Relativamente à acomodação será descrito na secção 2.5.

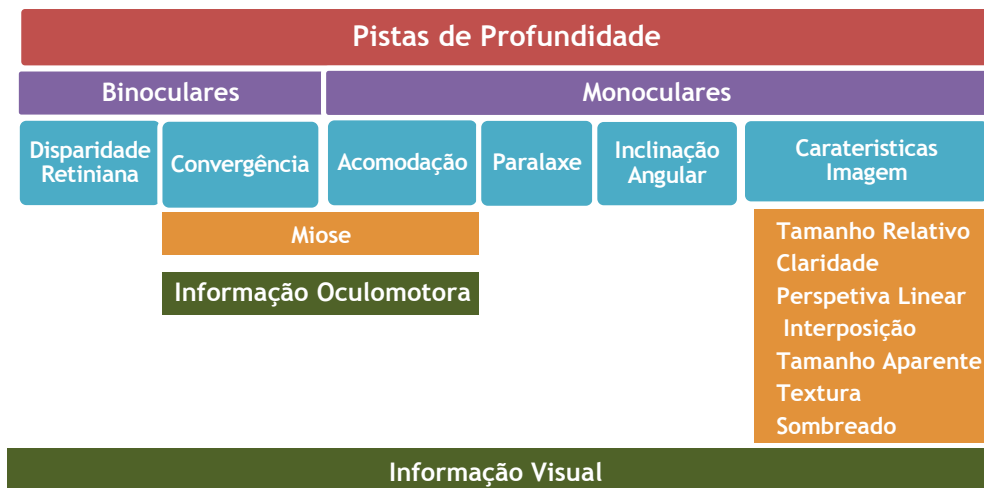


Figura 2.5: Esquema das diferentes pistas monoculares e binoculares de profundidade.

Existem várias características da imagem que fornecem informação de profundidade. A **perspectiva linear** diz respeito à relação entre as distâncias objeto-observador. O tamanho a imagem retiniana é inversamente proporcional à distância. Na figura 2.6 há o estreitamento das margens do riacho com a distância, ou seja, as linhas convergem para um ponto de fuga e o riacho com a distância parece estreita-se. A pista de **tamanho relativo** está presente em objetos conhecidos e ocorre quando o mesmo objeto aparece mais do que uma vez com tamanhos diferentes. O objeto mais pequeno é percebido como mais distante. Na figura 2.6 esta pista é apresentada pelas árvores, sendo que as maiores são percebidas mais próximas do observador.



Figura 2.6: Imagem com pistas monoculares de profundidade.

Quando os objetos são de diferentes tamanhos, por exemplo um copo e uma jarra, se a jarra,

que é o objeto maior, for percebido como sendo mais pequeno, conclui-se que o copo está mais perto do que a jarra, esta pista é denominada de **tamanho aparente**. Nos troncos das árvores da figura 2.6 estão presentes mais duas pistas de profundidade, a **textura**, e a **interposição**. Quanto maior a textura, mais detalhe é percebido e mais próximo aparenta estar o objeto. A interposição acontece quando um objeto se sobrepõe a outro. O objeto que se encontra à frente é percebido como mais próximo do observador. A **claridade** é demonstrada na figura 2.6 pelo reflexo da luz no riacho, contrastadamente com o fundo do riacho que está mais escuro. Quando num objeto existe sombra, esta aparece sempre no sentido oposto à luz que nele incide. Normalmente o **sombreado** é para trás do objeto, criando assim a sensação de profundidade.

2.5 Ligação Acomodação-Vergência

Na literatura, há inúmeros estudos sobre a conexão da acomodação-vergência, em particular a ligação neuronal destes processos. Para a discussão da relação entre a acomodação-vergência, as entidades envolvidas, são apresentadas separadamente.

2.5.1 Acomodação

Para visão nítida é necessário que a imagem do objeto seja focada na retina. O principal mecanismo responsável pela eliminação da desfocagem é a **acomodação**. Esta é um processo neurofisiológico que ocorre na lente ocular - o cristalino.

A profundidade de foco é um conceito fundamental a reter no estudo da acomodação, pois representa a pequena quantidade de desfocagem retiniana permitida na qual os objetos são percebidos nítidos, sem que haja alteração do poder dióptrico do sistema visual. Este parâmetro determina a variação tolerada na distância imagem do sistema ótico sem que seja perceptível a desfocagem. É controlada pelo diâmetro pupilar. Quanto menor o diâmetro pupilar, maior a profundidade de foco criada. Cada olho tem a sua própria profundidade de foco e estas definem a zona em que a visão é nítida. A desfocagem introduzida, diminui a qualidade da imagem. Com o aumento da distância de um objeto ao ponto de fixação, este é percebido cada vez mais desfocado.

Quando os limites da profundidade de foco são ultrapassados, um estímulo que incida desfocado na retina, envia a informação ao córtex visual para que seja dada uma resposta ao nervo oculomotor. Através dos nervos ciliares, o músculo ciliar altera o seu estado. Deste modo, a forma do cristalino também se altera. Torna-se mais arredondado quando aumenta o poder dióptrico e desta forma a acomodação é estimulada. É mais plano, quando diminui o poder dióptrico e se relaxa a acomodação.

Um estudo de Kasthurirangan (10) verifica que a resposta para o relaxamento da acomodação é mais rápida do que a resposta para estimulação da acomodação. A possível justificação do

autor, tem por base os diferentes pontos de fixação iniciais, a força de contração do músculo ciliar e as capacidades elásticas do cristalino. O ponto inicial de acomodação é a visão de longe, enquanto que na "desacomodação" os pontos estão próximos do observador.

A acomodação pode dividir-se em quatro componentes: reflexa, proximal, vergencial e tónica (1). Todas estas componentes têm uma função importante na visão binocular.

Acomodação Reflexa

A acomodação reflexa é a resposta a um estímulo desfocado, representando o reajuste do estado refrativo para que a imagem retiniana esteja focada. Esta é a componente mais importante da visão.

Acomodação Vergencial

A acomodação vergencial é estabelecida pela ligação neuronal entre a acomodação e a vergência resultante da disparidade. Em condições normais de visão binocular, para um determinado estímulo, a quantidade de acomodação utilizada é semelhante à quantidade de convergência solicitada.

Acomodação Proximal

A acomodação proximal ocorre quando um objeto é percebido próximo do indivíduo (≤ 3 m), através da noção de proximidade. As pistas perceptuais de disparidade e desfocagem são as principais responsáveis desta componente.

Acomodação Tónica

A acomodação tónica ocorre na ausência de qualquer estímulo acomodativo, por exemplo no escuro ou no vazio. Esta componente fica numa posição intermédia entre o perto e o longe, não sendo estimulada pela disparidade ou desfocagem (11).

Apesar do sistema acomodativo ser relativamente insensível a fatores externos, a resposta acomodativa sofre alterações com alguns fatores óticos como o caso das aberrações esféricas, cromáticas e o astigmatismo; e com algumas características da imagem como a frequência espacial, tamanho do detalhe, contraste, profundidade de foco e excentricidade retiniana. Na figura 2.7 encontram-se alguns fatores e a sua relação existente com a resposta acomodativa.

A resposta acomodativa é tanto maior quanto maior o contraste da imagem retiniana (gráfico A da figura 2.7). Este tende para o nível tónico em contrastes muito baixos. Para frequências espaciais muito baixas e muito altas tal como apresentado no gráfico B da figura 2.7, a resposta é muito próxima do nível tónico (relações abordadas na subsecção 3.2.5.2). Atendendo à luminância, quanto maior o valor do estímulo acomodativo, maior e mais rápida é a resposta acomodativa (gráfico C da figura 2.7). No gráfico D da figura 2.7, encontra-se a relação da resposta acomodativa com a excentricidade. Verifica-se um aumento linear da resposta aco-

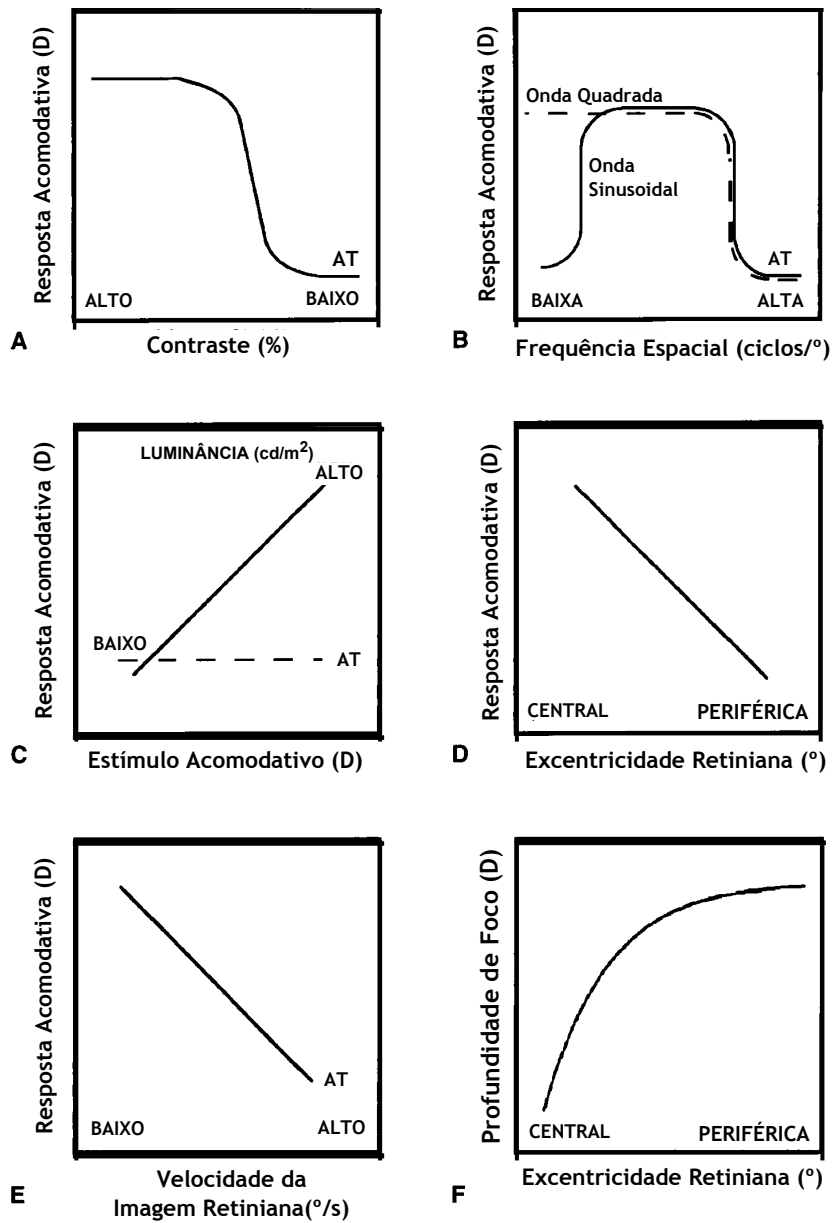


Figura 2.7: Relação entre os principais fatores associados às características do alvo/imagem e a resposta acomodativa; TA representa o nível de Acomodação Tônica (adaptado de (1)) A. Resposta acomodativa *versus* Contraste. B. Resposta acomodativa *versus* Frequência Espacial. C. Resposta acomodativa *versus* Estimulo Acomodativo. D. Resposta Acomodativa *versus* Excentricidade Retiniana. E. Resposta Acomodativa *versus* Velocidade Retiniana. F. Profundidade de Foco *versus* Excentricidade Retiniana.

modativa da periferia para a zona foveal. A velocidade da imagem retiniana é um fator que influencia negativamente a capacidade da resposta acomodativa. Esta é mais reduzida quando a velocidade é elevada, como representado no gráfico E da figura 2.7. Relativamente à profundidade de foco, constata-se uma diminuição exponencial da periferia para a fóvea (gráfico F da figura 2.7).

Ciuffreda (12) comprova que para valores pequenos de excentricidade (até 8°), por cada grau há um aumento linear de $0.29D$ na profundidade de foco (13). Na fóvea a profundidade de foco é aproximadamente $0.89D$ e aumenta até às $3.51D$ para 8° de excentricidade retiniana. Esta

conclusão é representada na figura 2.8 que demonstra a distribuição espacial da profundidade de foco dentro das diferentes zonas onde a desfocagem é semelhante. A excentricidade retiniana é apresentada em graus, enquanto que os valores numéricos sem unidade representam a quantidade de desfocagem em dioptrias. A linha contínua mais larga apresenta o plano onde a desfocagem retiniana é nula. As linhas contínuas delimitam a região da detecção de desfocagem para longe e perto. As linhas descontínuas representam os limites de longe e perto do início da discriminação de desfocagem. Quando estes limites são ultrapassados, a percepção de desfocagem pode ser alterada.

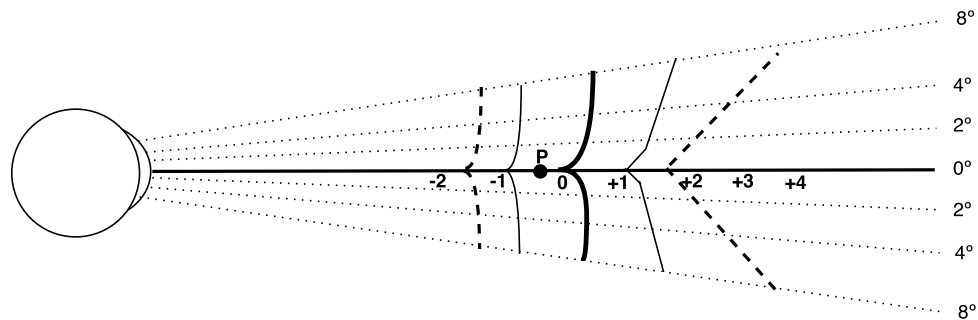


Figura 2.8: Relação dos limites de desfocagem e a excentricidade retiniana; P representa ponto de fixação/alvo (adaptado de (1)).

Com o aumento do erro acomodativo através da degradação da imagem retiniana pela desfocagem em todos os parâmetros apresentados, a resposta acomodativa tende para o nível tónico.

2.5.2 Vergência

As vergências são movimentos binoculares disjuntos do sistema motor que são acionadas pela projeção da imagem na perifóvea. A vergência tem caráter fusional e é conduzida pela acomodação e alteração pupilar. Os três tipos de movimento de vergência existentes: laterais/horizontais, verticais e torcionais, têm a função de estabilização da fixação bifoveal. Contudo, as vergências laterais são as principais responsáveis pela manutenção da fixação a diferentes distâncias do ponto de fixação. Os movimentos horizontais ocorrem no sentido convergente ou divergente. A convergência é fundamental para a visão próxima e por esse razão tem caráter reflexo - **convergência reflexa**. Ainda assim, a convergência é a única vergência horizontal que pode ocorrer voluntariamente, isto é, sem que haja estímulo físico para a convergência - **convergência voluntária**.

A **divergência** no passado foi vista como o retorno dos olhos à posição paralela após a estimulação da convergência. Era considerada uma função passiva da convergência e daí também ser chamada de convergência negativa. Atualmente, com eletromiográficos é sabido que os olhos divergem além da posição paralela, o que efetivamente comprova que a divergência é uma função visual ativa. Tal como a convergência, a divergência é acionada para garantir a percepção de apenas uma imagem na presença de disparidade.

A vergência reflexa pode ser dividida em quatro componentes: tónica, proximal, acomodativa e fusional (1).

Vergência Tónica

A vergência tónica representa a posição anatómica de repouso dos olhos, que geralmente é uma posição divergente. Esta componente ocorre devido ao tónus dos músculos extraoculares. Pensa-se que esta componente surge ao longo da vida, devido à estabilidade da posição de fusão, sendo a principal referência e controlo da disparidade retiniana (4).

Vergência Proximal

A convergência proximal ocorre com a aproximação de um objeto. É ativada por qualquer pista que incite perceção de distância ou profundidade. Quando um objeto se aproxima, esta componente reduz a desfocagem e a disparidade retiniana. Os mecanismos perceptuais determinam automaticamente a distancia e produz a quantidade proporcional de vergência e acomodação necessárias. A vergência proximal inicia com a deslocação de grandes quantidades de vergência (longe-perto), possibilitando a ativação dos sistemas acomodação-vergência quando a acomodação reflexa e a disparidade ainda não foram estimuladas (14).

Vergência Acomodativa

A vergência acomodativa corresponde à quantidade de convergência que é gerada por força da acomodação. Quando uma certa quantidade de acomodação é acionada, também é elicitada uma determinada quantidade de convergência, ou vice-versa (15). Esta relação é a mais utilizada na clínica, porque representa a capacidade de resposta da função vergencial a um estímulo acomodativo.

Vergência Fusional

A vergência fusional, considerada por Maddox a componente mais poderosa e flexível, altera o nível de vergência para assegurar a fusão. Quando os olhos, mesmo após a ativação das restantes componentes da vergência, precisam de ajuda para a tarefa de fusão, esta componente intervém. Na clínica a vergência fusional é medida com a utilização de lentes prismáticas. Embora não seja uma avaliação "pura", tem em consideração três pontos distintos: o enublamento, a rutura e a recuperação. Com o incremento de dioptrias prismáticas, é pedido ao indivíduo que primeiramente identifique a lente na qual ocorre a desfocagem. Este primeiro ponto, o **enublamento**, é normalmente o limite da vergência fusional e é também denominado por vergência relativa, que representa a convergência exercida sem utilizar a acomodação. Continuando a adição prismática, o sistema visual desiste da tentativa de fusão, uma vez que se ultrapassa a capacidade de vergência. Este é o segundo ponto da avaliação da vergência fusional, a **rutura**, que ocorre com o aparecimento da diplopia. O último ponto é a **recuperação**. Depois do ponto de rutura, procede-

-se à diminuição do valor prismático até o indivíduo recuperar novamente a singularidade da imagem. Quando o ponto de recuperação é próximo do ponto de ruptura, a visão binocular é mais sólida, dado que o sistema visual recuperará do rompimento binocular mais facilmente. A vergência fusional positiva e negativa (convergência e divergência, respectivamente) é avaliada para qualquer distância tendo em conta o enublamento, ruptura e a recuperação. Estes representam as reservas fusionais do indivíduo, ou seja, determinam a quantidade de vergência que não está a ser utilizada pelo sistema visual para compensar algum desvio existente.

Em visão próxima, o sistema oculomotor pode ser acionado por três componentes: vergência, acomodação e miose. Quando um destes parâmetros é alterado, os outros dois também variam. Este complexo é denominado por **tríada de perto**.

A miose ocorre com a aproximação de um objeto e dilata ligeiramente quando a fixação se desloca para um objeto mais distante. Todavia, a alteração do diâmetro pupilar é mais brusca com os diferentes níveis de luminância. Em condições de visualização natural, a acomodação e a vergência interagem para permitirem visão binocular confortável, nítida e única. Fincham et al (1) são os principais propulsores da relação acomodação-vergência, considerando que quando se evoca a acomodação, também uma certa quantidade de convergência é estimulada ou vice-versa. Na figura 2.9, encontra-se a relação entre os mecanismos da acomodação e da vergência, bem como as principais semelhanças e diferenças das respostas acomodativa e vergencial.

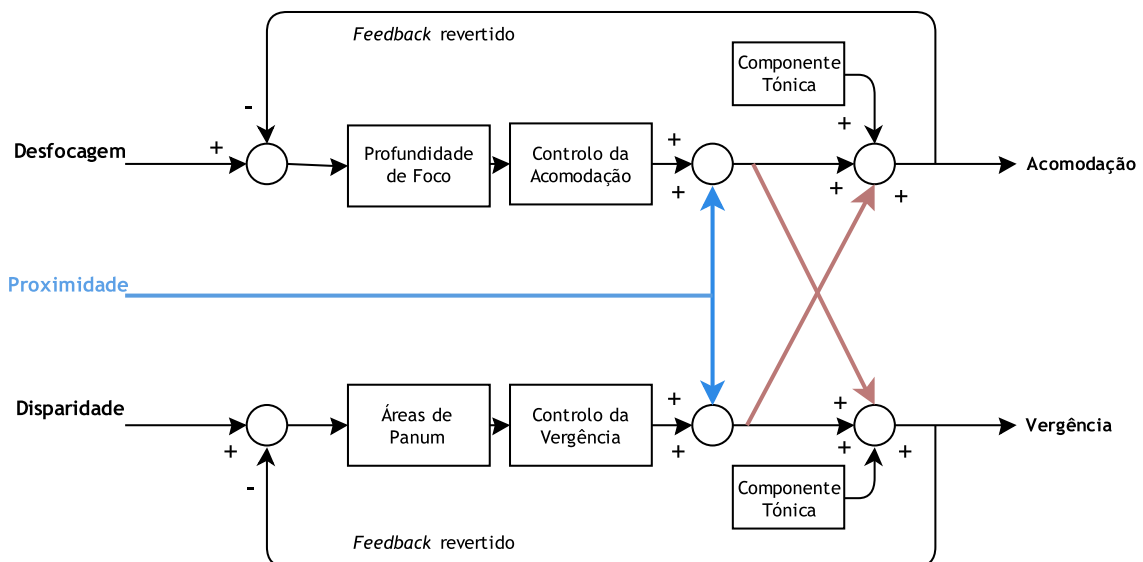


Figura 2.9: Relação dos mecanismos de acomodação e vergência (adaptado de (16)).

O sistema acomodativo não é estimulado quando o ponto de fixação está dentro da profundidade de foco ou para pequenas quantidades de desfocagem retiniana (17). O mesmo se verifica na vergência, quando a disparidade retiniana é pequena, apenas é utilizada a fusão sensorial.

Não é necessário recorrer à fusão motora para que as imagens retinianas sejam fusionadas. A acomodação é estimulada essencialmente pela desfocagem da imagem retiniana resultante da aproximação do objeto, enquanto que a vergência resulta da disparidade retiniana induzida. Sempre que a desfocagem ultrapassa a profundidade de foco é acionado o controlo da acomodação. O mesmo acontece quando a disparidade excede a área fusionável de Panum, levando à ativação do controlo da vergência. Através da componente tónica os músculos ciliares fornecem a resposta oculomotora necessária quer em termos de acomodação ou vergência. Este processo gera um *feedback* negativo que permite obter um nível estável para o estímulo apresentado.

Um benefício da ligação acomodação-vergência é a velocidade das respostas acomodativa e vergencial. Estas tornam-se mais rápidas devido às pistas utilizadas. Em visão binocular, além da desfocagem existe também a informação da disparidade para a mesma distância. No caso da resposta vergencial os mesmos estímulos permitem a eficácia da resposta. As vergências tornam o sistema visual dinâmico, tanto na sua fisiologia como no espaço físico onde os objetos são apresentados. A disparidade de fixação, denominada por imprecisão ou erro da vergência contribui fortemente para estas capacidades do sistema visual (18).

2.6 Disparidade de Fixação

A disparidade de fixação é um desalinhamento residual dentro das áreas de Panum que se mantém após a compensação dos erros neuromusculares, diferenciando-se da disparidade retiniana pela existência de fusão. Existem duas teorias explicativas da disparidade de fixação (4). A primeira, proposta por Ogle, considera que a disparidade de fixação resulta do *stress* do sistema vergencial. Quando o *stress* visual aumenta, o desalinhamento ocular aumenta também. A segunda teoria foi apresentada por Shor e refere-se à disparidade de fixação como um erro intencional do sistema motor de modo a ser fornecido um *feedback* para a inervação vergencial. Logo, considera a disparidade de fixação um acontecimento fisiológico normal que geralmente não é necessário ser compensado e os valores da disparidade de fixação estão muito próximos do horóptero (19).

Na clínica, a avaliação da disparidade de fixação pode ser realizada objetivamente através da medida do deslocamento da posição relativa do olho durante o deslocamento aparente de um objeto. Contudo, também se pode medir subjetivamente a disparidade de fixação. Estas medições diretas são obtidas, por exemplo com o disparómetro de Sheedy, Carta de Wesson, Carta de Woolf e o teste de Ponto Próximo de Saladin. A caixa de Mallet e as Cartas Vectográficas são exemplos de medições indiretas, dado que medem a foria associada e apenas identificam a direção da disparidade de fixação. Alguns estudos comprovam que as medidas objetivas e subjetivas apresentam diferenças significativas. A medição subjetiva tende para uma subestimação do real valor (20).

Associado a esta temática, Ogle criou um novo conceito, a Curva de Vergências Forçadas que

tem como fundamento a avaliação do comportamento da disparidade de fixação com adição de lentes prismáticas (base interna e externa ou base superior e inferior). O incremento de prismas de base externa (base OUT), induz um aumento da disparidade de fixação exo (estimulação de pontos mais temporais da retina, induzindo convergência). Por sua vez, o aumento de prismas de base interna (base IN) leva ao aumento de disparidade de fixação endo (estimulação de pontos mais nasais, induzindo divergência). A disparidade de fixação vertical é menos comum e menor que a disparidade de fixação horizontal. Ambas podem ser representadas graficamente através da influência do aumento do valor prismático. A figura 2.10 apresenta as principais componentes da Curva de Vergências Forçadas.

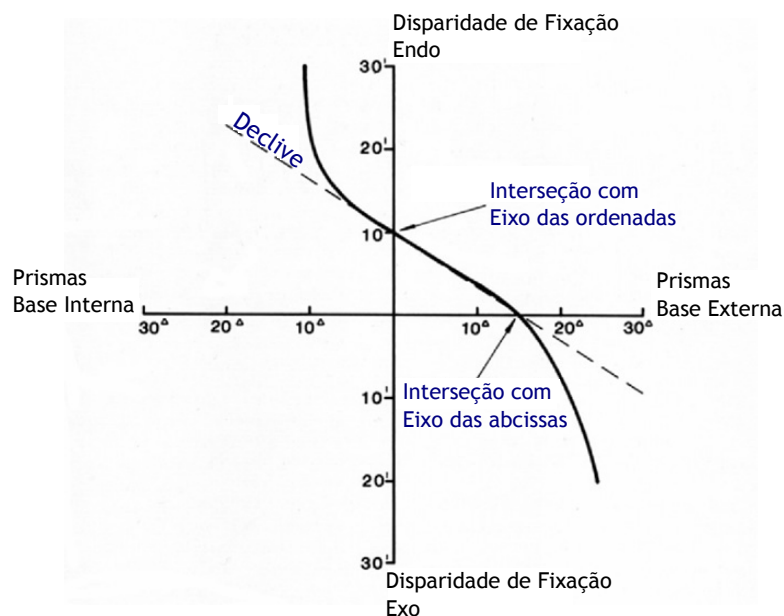


Figura 2.10: Curva de Vergências Forçadas e seus componentes mais importantes (adaptado de (21)).

Pela sua análise tem-se os seguintes componentes:

1. A **interseção com o eixo das ordenadas** representa a disparidade de fixação atual em minutos de arco ('). Considerando que valores abaixo do eixo das ordenadas representam a disparidade de fixação exo e os valores acima do eixo indicam disparidade de fixação endo. Na maioria dos casos a disparidade de fixação é menor que 6'. Contudo, quanto maior for a disparidade de fixação, mais difícil será o equilíbrio binocular.
2. A **interseção com o eixo das abscissas** representa a foria associada ou a quantidade de prisma necessário para anular a disparidade de fixação existente. Quanto menor for o valor da foria associada, menor é também a probabilidade de sintomatologia.
3. **Declive** mostra a proporção da mudança da disparidade de fixação em resposta à mudança vergencial. É também apontado por alguns autores como o melhor indicador de sintomas (22, 23). O declive é medido normalmente entre as 3Δ de base interna e externa e é

considerado um fator de risco quando o valor é superior a 1. O declive pode ser medido por outros métodos, nomeadamente considerando o declive desde a interseção do eixo das ordenadas à interseção do eixo das abcissas, ou o declive ser medido para a totalidade da curva.

4. **Centro de simetria** diz respeito à região mais plana da curva. Corresponde ao menor valor de foria associada e disparidade de fixação.

As Curvas de Vergências Forçadas dividem-se em quatro categorias: tipos I, II, III e IV atendendo às diferentes adaptações às lentes prismáticas e aos seus efeitos produzidos (21). Estes tipos de curva estão representadas na figura 2.11.

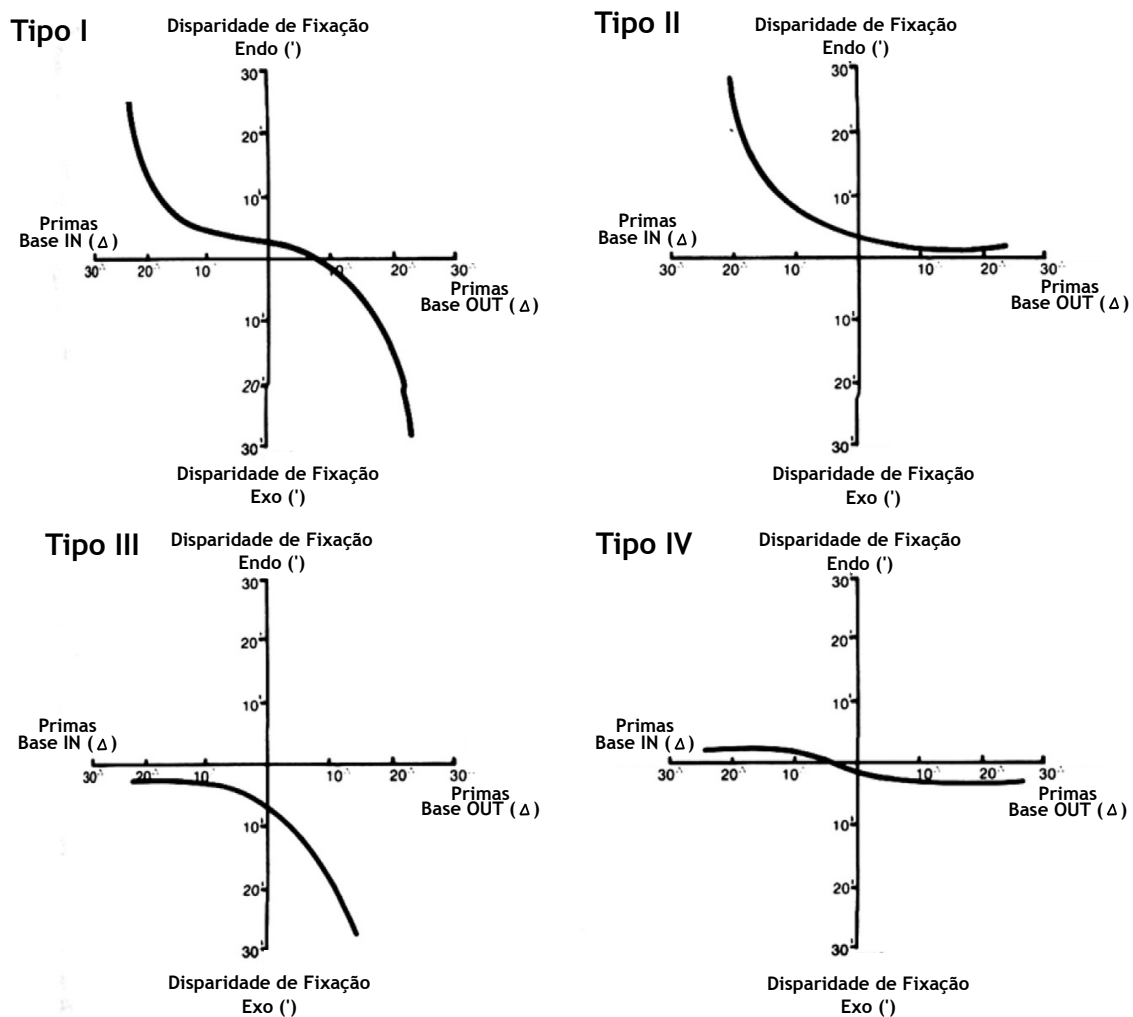


Figura 2.11: Tipos de Curvas de Vergências Forçadas (adaptado de (21)).

Na **curva de tipo I** a adaptação para prismas de base interna é semelhante à adaptação aos prismas de base externa. A disparidade de fixação aumenta mais rapidamente quando se aproxima dos limites de fusão. A maioria dos indivíduos manifestam este tipo de curva.

Na **curva de tipo II** não se verifica o aumento da disparidade de fixação exo. Há adaptação ao prisma de base externa e tendem a ocorrer em indivíduos endofóricos. Normalmente estes

casos representam uma endoforia elevada.

Por sua vez, para a **curva de tipo III**, os indivíduos aceitam bem os prismas de base interna. Não ocorre um aumento da disparidade endo, todavia apresenta valores elevados de disparidade de fixação exo. Denota-se também uma reação atípica para forçar a divergência. Esta curva normalmente representa situações de grande exoforia.

Por último, a **curva de tipo IV** representa um sistema binocular instável. Há adaptação aos prismas de base interna e externa, mas a disparidade de fixação não apresenta grandes variações. Os pacientes com este tipo de curva podem ter problemas binoculares, como o caso do estrabismo.

2.7 Heteroforia

A condição fundamental para a visão binocular simples é a projeção da imagem em pontos retinianos correspondentes. Para tal, é imprescindível boa coordenação motora, mantendo o tônus muscular de forma a que os eixos visuais permaneçam paralelos na linha do infinito e direcionados adequadamente quando se olha para o perto. Quando tal não se verifica, está-se perante um desvio como a heteroforia (1).

A **heteroforia** é um erro neuromuscular determinado pela posição dos olhos quando não existe estímulo de fusão, por isso é avaliada sob condições de dissociação da visão (4). Os desvios heterofóricos podem ser horizontais ou verticais.

Os desvios horizontais podem classificar-se em exofóricos ou endofóricos. Sempre que ocorre o alinhamento perfeito dos eixos visuais e a imagem incide na fóvea, não há qualquer desvio, por isso este estado denomina-se por **ortoforia**. A exoforia ou endoforia resultam de uma posição fórica onde a imagem incide na retina periférica. Os **desvios exofóricos** incentivam a disparidade retiniana cruzada, dado que a imagem incide na retina temporal. Por sua vez, nos **desvios endofóricos** a imagem incide na retina nasal, criando diplopia homónima estimulada pela disparidade retiniana homónima gerada.

Saladin (24) comprova que dependendo da direção da heteroforia há efeitos diferentes na este-reopsia. Para tarefas que exigem capacidade estereoscópica, os indivíduos endofóricos tendem a apresentar estereopsia mais reduzida do que os indivíduos exofóricos. Uma possível justifi-cação para esta diferença pode estar associada à disparidade de fixação e a sua relação com a heteroforia. Uma determinada direção e quantidade de heteroforia, faz se sempre acompanhar por uma quantidade de disparidade de fixação, tal como apresenta o gráfico da figura 2.12.

Quando o sistema vergencial opera normalmente é esperado que a disparidade de fixação apre-sente a mesma direção que a heteroforia. Na exoforia o intervalo de disparidade de fixação exo é pequeno, contudo revela uma variação não linear. Na endoforia constata-se precisamente o contrário. Além de apresentar um intervalo de grande de variação, verifica-se a linearidade,

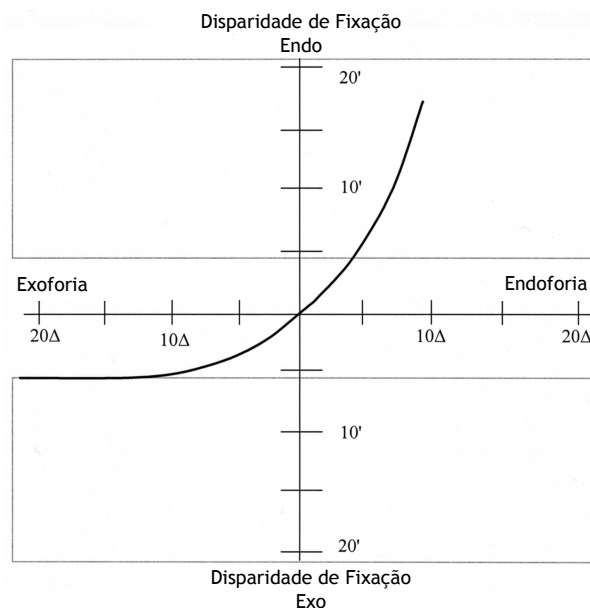


Figura 2.12: Relação entre a heteroforia horizontal e disparidade de fixação (adaptado de (25)).

sendo que 1Δ de endoforia é aproximadamente $1'$ de disparidade de fixação endo. Portanto, indivíduos exofóricos tendem a ter valores de disparidade de fixação mais pequenos e conseguem tolerar maiores quantidades de foria sem apresentar sintomas. Mesmo para grandes disparidades o comportamento mantém-se, fornecendo a este grupo uma estereopsia melhor do que em indivíduos endofóricos. Pelo gráfico da figura 2.12 constata-se que a partir de valores pequenos de endoforia (por exemplo 3Δ), a disparidade aumenta exponencialmente, o que poderá levar ao aparecimento de alguns sintomas. Teoricamente é esperado que o sistema vergencial opere normalmente para pequenas quantidades de disparidade de fixação ($< 10'$), apesar da estereopsia ser reduzida a partir de $1'$. Na prática, considera-se relevante quando a disparidade de fixação exo é superior a $6'$ e na direção endo é superior a $4'$ (24).

2.8 Zona de Conforto Visual

Uma abordagem para a avaliação da visão binocular que engloba todos os conceitos já referidos, está relacionada com **Zona de Visão Binocular Nítida e Simples (ZVBNS)**. Esta representa a variação permitida nas distâncias focal e vergencial em que o indivíduo vê nitidamente mantendo a fusão. O gráfico da figura 2.13 apresenta a Zona de Visão Binocular Nítida e Simples (área azul claro) de um jovem adulto e é limitada pelas vergências relativas máxima e mínima (linhas contínuas azuis). Graficamente estes limites tendem a ser paralelos com a linha de Donders (linha descontínua, que representa a mesma quantidade de estímulo vergencial para uma quantidade de estímulo acomodativo). Clinicamente, os limites correspondem à medição das reservas fusoriais positivas e negativas. Os pontos considerados na determinação dos limites são os valores de enublamento, caso este ponto não ocorra utiliza-se o valor de rotura (26, 27).

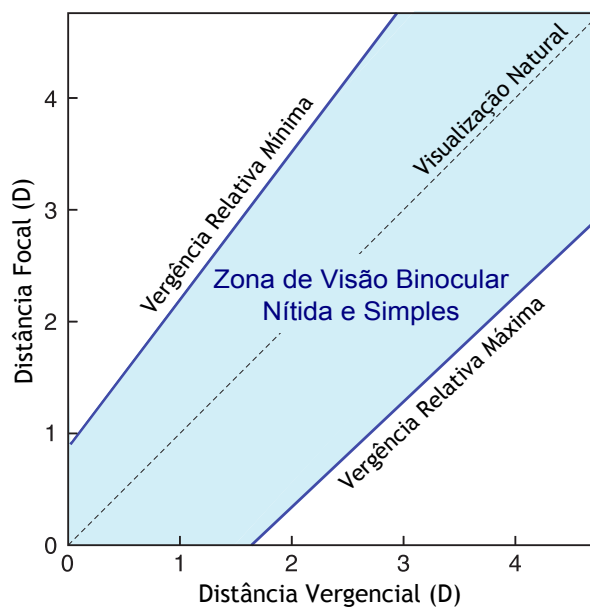


Figura 2.13: Zona de Visão Binocular Nítida e Simples (adaptado de (28)).

Em condições de visualização monocular a estimulação da vergência deve-se apenas à ligação neuronal com a acomodação (componente da vergência acomodativa) e não à ação da disparidade. Dessa forma, a foria pode ser também descrita num gráfico (figura 2.14) em que a vergência é dada em função da distância focal. A vergência é o estímulo e distância focal representa a resposta a esse estímulo. A linha descontínua representa as distâncias focal e vergencial em condições normais - linha de Donders. A linha verde apresenta a foria típica dos indivíduos. Embora existam exceções, a maioria das pessoas tendem a ser exofóricas para distâncias focais pequenas e endofóricas para distâncias focais longas. Tornando-se assim, mais

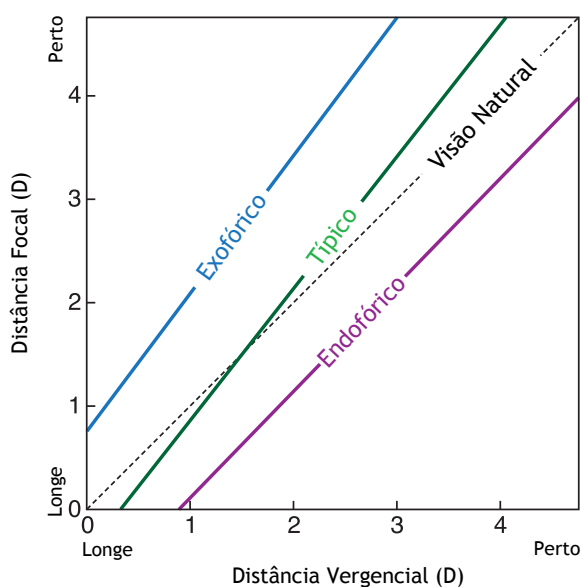


Figura 2.14: Ilustração da heteroforia em visualização natural (adaptado de (28)).

endofóricas para o longe e exofóricas para o perto (28). As linhas azul e rosa são exemplos de exoforia e endoforia, respetivamente.

Na exoforia os olhos convergem pouco em comparação com a visualização natural. Isto leva a crer que indivíduos exofóricos têm maior conforto visual com estímulos que incitem disparidade homónima. Na endoforia os olhos convergem mais do que em visualização natural. Dessa forma, também se torna expectável que indivíduos endofóricos tenham maior conforto na visualização de estímulos com disparidade cruzada. Relativamente à capacidade estereoscópica, Shippman (29) demonstra que efetivamente indivíduos endofóricos apresentam melhores resultados com disparidade homónima, enquanto que indivíduos exofóricos obtêm valores mais elevados com disparidade cruzada. Percival verifica que a visão confortável numa correção refrativa, deve colocar os estímulos numa sub-região da Zona de Visão Binocular Nítida e Simples, denominada de **Zona de Conforto de Percival**, que corresponde a 1/3 da ZVBNS. Esta sub-região também é delimitada pelas reservas fusionais. Segundo Sheard a zona de conforto estende-se 1/3 para cada lado da linha de foria, também denominada por **Zona de conforto de Sheard**. Sheedy (23) comprova que o critério de Percival é ligeiramente melhor preditor para a endoforia, enquanto que o critério de Sheard é ligeiramente melhor para a exoforia. Estas sub-regiões da ZVBNS encontram-se no gráfico da figura 2.15. A zona de conforto limitada pela cor amarela, revela a zona estimada para a população ortofórica. A sub-região de Sheard, apresentada com cor vermelha, é deslocada para a esquerda relativamente à zona de Percival (preenchida a azul), uma vez que considera como referência a linha de foria e esta é deslocada ligeiramente para a esquerda do centro da ZVBNS. Se a linha de foria dividisse simetricamente a ZVBNS, as zonas de Percival e Sheard seriam iguais. Pela análise do gráfico da figura 2.15 também se constata que estas sub-regiões são diretamente proporcionais à distância focal.

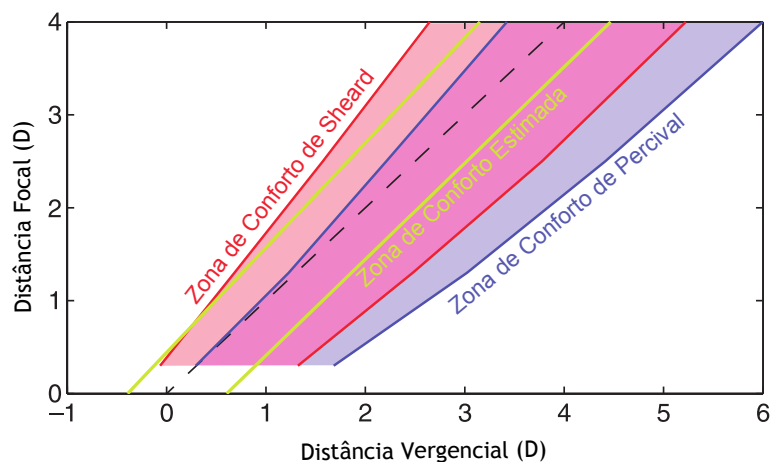


Figura 2.15: Representação das áreas de conforto segundo Percival e Sheard (adaptado de (28)).

2.9 Conclusão

Pickwell considera que existem três condições fundamentais para a visão binocular. Primeiramente é necessário existirem duas estruturas anatômicas separadas horizontalmente. Esta separação permite a captação de dois pontos do objeto ligeiramente diferentes que origina a disparidade retiniana. Face a esta componente criada, é necessário que o sistema motor coordene os olhos possibilitando que a imagem incida na fóvea. O processo envolve não só o sistema vergencial bem como o sistema acomodativo para ser assegurada a correspondência retiniana. O sistema sensorial através do cérebro recebe e integra os diferentes sinais das duas imagens monoculares e cria uma percepção única. Se por alguma razão algum destes requisitos falharem, a visão binocular pode não acontecer, devido à falta de visão nítida e única do objeto (30).

Apesar ser possível alcançar percepção de profundidade através de pistas monoculares, a ligação entre a vergência e a acomodação é fundamental para a visão binocular. A participação da vergência completa o processo binocular permitindo o acompanhamento da aproximação dos objetos. O limite da acomodação é a variação máxima tolerada da profundidade de foco. Quanto mais afastado estiver o objeto do ponto de fixação, maior será também a desfocagem, podendo ocorrer diplopia devido à redução da frequência espacial. Contudo, a vergência atua para pontos que estimulem o limite das áreas de Panum, de modo a assegurar que a imagem incida na fóvea e possa ser percebida como única.

Relativamente à disparidade de fixação pode-se considerar que esta funciona como uma correspondência retiniana anômala dentro da área de Panum para indivíduos não estrábicos, dado que em condições binoculares a direção visual não é a mesma do que em condições monoculares.

Através de condições monoculares, é possível avaliar a heteroforia. Esta representa um desvio dos eixos visuais que gera um impulso de vergência compensatório a fim de se manter a posição relativa do olho. Os indivíduos fóricos apresentam comportamentos distintos quanto à percepção do espaço. Os indivíduos endofóricos têm mais sensibilidade à disparidade homônima enquanto que os exofóricos discriminam melhor a disparidade cruzada.

Na generalidade, quando a função visual se enquadra na zona de visão binocular nítida e simples, o sistema visual opera confortavelmente e em equilíbrio.

Capítulo 3

Consequências visuais da exposição a estímulos 3D

"As mudanças nunca ocorrem sem inconvenientes, até mesmo do pior para o melhor."

Richard Hooker

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o estado da arte sobre as consequências visuais da tecnologia 3D (secção 3.2). Na primeira subsecção, 3.2.1, consta uma breve contextualização histórica da imagem estereoscópica e a sua evolução ao longo das décadas até aos dias de hoje. Apesar de todo o entusiasmo suscitado pela técnica, alguns utilizadores apresentam sintomas após a exposição a este tipo de estímulos. Portanto, a análise do tema centra-se na visualização estereoscópica propriamente dita. Desse modo a subsecção 3.2.2 apresentada as diferenças entre os três tipos de visualização possíveis. Na subsecção 3.2.3 é abordado um novo conceito para o conjunto de sintomas e sinais resultantes da visualização estereoscópica. Os termos desconforto e fadiga visuais são muito utilizado nesta área de estudo, portanto na subsecção 3.2.4 é feita a distinção entre eles. Na subsecção 3.2.5, são exploradas as causas para o desconforto e a fadiga visual, no qual foram formados dois grupos, um que diz respeito aos problemas do conteúdo da imagem 3D, outro considerou-se o ponto mais debatido na literatura, o conflito acomodação-vergência.

3.2 Estado da Arte

A diferença entre as imagens tridimensional e a bidimensional está na informação mais realista contida na imagem 3D, devido à informação de profundidade. Na imagem 3D o observador depara-se com duas sensações típicas: a **sensação imersiva** que corresponde à capacidade de se sentir no local onde a imagem foi captada e a **sensação de presença** traduzida pela sensação de que o observador pertence ao local onde a cena é capturada (31). Estas características são as principais razões da procura da imagem tridimensional (3D) nas áreas da comunicação, medicina, telecomunicações, educação, entretenimento entre outras.

3.2.1 Breve contextualização histórica

A técnica da imagem tridimensional surge pela primeira vez em 1832 através da criação do estereoscópio pelo físico Charles Wheatstone. O estereoscópio desenvolvido por Wheatstone é apresentado na figura 3.1. Este consistia no uso de dois espelhos unidos com ângulo reto entre si, representado com a letra A na montagem experimental da figura 3.1. A letra D' corresponde ao suporte com as placas que continham as imagens (E'). Com este método, a convergência induzida era variável através da aproximação das placas. A disparidade é constante e a entrada de informação visual é feita separadamente para cada olho. Esta avaliação demonstrou que a percepção de profundidade não depende apenas da disparidade induzida (32), como existe um processo fisiológico subjacente - a estereopsia, que permite a percepção da profundidade.

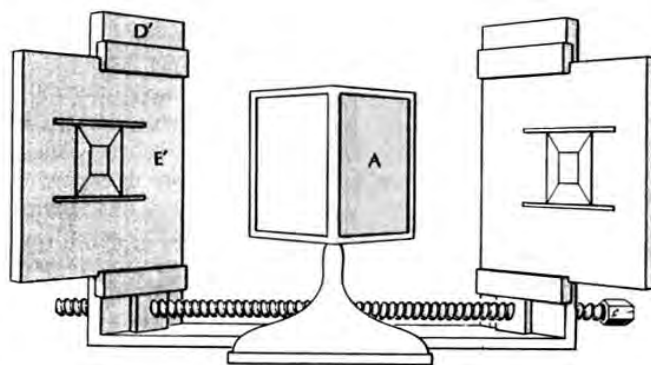


Figura 3.1: Montagem experimental do primeiro estereoscópio de Wheatstone (adaptado de (32)).

Esta invenção foi fundamental para o início do estudo da visão estereoscópica. Fazendo uma analogia, Wheatstone foi tão importante com o seu estereoscópio para a percepção do espaço, como Newton com o seu prisma para a visão da cor.

Seguindo as teorias de Wheatstone, Dam Disaster, consegue fazer em 1879 a captação para processamento da imagem em 3D. Contudo, a televisão estereoscópica foi apresentada pela primeira vez apenas em 1920 por John Baird. O conhecimento destes dois fatores foram a chave para o início do cinema 3D. Inicialmente, os filmes eram vistos com anaglifos e a década de 50 foi considerada a década de ouro do 3D. Foi o ano em que mais se produziram filmes com esta técnica e em que as expectativas em termos de audiências foi correspondido. Esta estatística foi elaborada pela empresa PricewaterhouseCoopers (PwC) no ano 2000 e é apresentada na figura 3.2. Atualmente com alta qualidade 3D, cerca de 135 anos depois da primeira abordagem tecnológica, contata-se um aumento do interesse por parte da população mundial. Os produtos mais comercializados, como os telemóveis, televisões, jogos de vídeos e programas didáticos educacionais são fabricados com aplicações ou características próprias para permitirem o uso desta técnica. Um exemplo disso é o 3D Education VRMagic Digital Bio, um instrumento pedagógico para a visualização do fundo do olho.

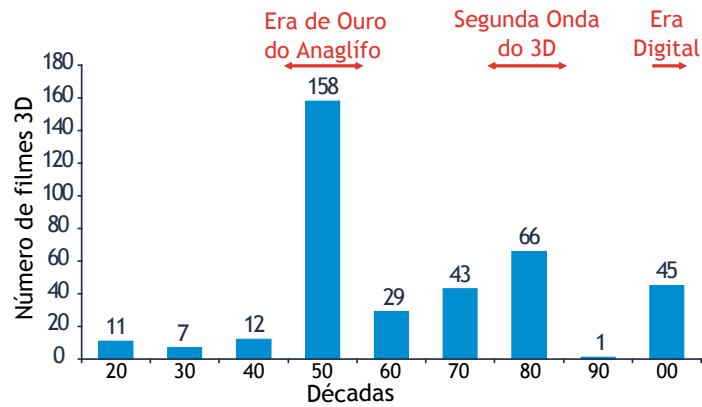


Figura 3.2: Estatística apresentada em 2000 pela empresa PricewaterhouseCoopers, sobre a quantidade de filmes 3D produzidos ao longo das décadas (adaptado de (33)).

3.2.2 Diferentes tipos de visualização

Segundo Shibata (28) existem três tipos de visualização possíveis: a visualização natural, a visualização com correção ótica e a visualização estereoscópica. Em cada tipo de visualização o comportamento das distâncias vergencial e focal é diferente. Considere-se distância vergencial a distância que o olho converge para colocar na fóvea um ponto do espaço de forma a ser percebido único. A distância focal corresponde à distância que o olho acomoda para que o ponto do espaço seja nítido. O esquema da figura 3.3 apresenta nas colunas da esquerda para a direita os três tipos de visualização possíveis e está descrita para duas distâncias N1 e N2 que correspondem respectivamente a 50 e 33 centímetros de distância do observador.

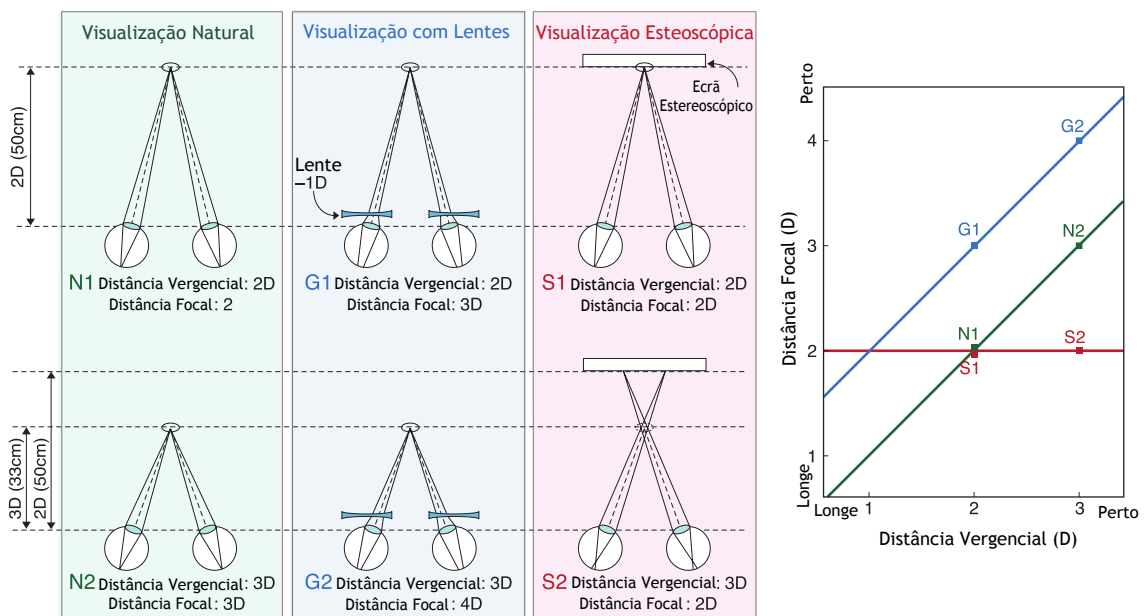


Figura 3.3: Esquema das visualizações possíveis com as respectivas variações das distâncias focal e vergencial (adaptado de (28)).

Na visualização natural é esperado que os estímulos vergencial e focal sejam muito semelhan-

tes devido à ligação neuronal. As mudanças na vergência evocam mudanças na acomodação para qualquer distância (N1 e N2). Esta situação é justificada pela linha verde correspondente à linha de Donders no gráfico da figura 3.3.

Na **visualização com correção ótica**, seja lente oftálmica ou de contacto, a lente utilizada provoca um aumento ou diminuição do poder focal o que altera a distância focal. Quanto à distância vergencial também é alterada (linha azul do gráfico da figura 3.3). Apenas ocorre um deslocamento vertical relativamente à visualização natural devido ao poder dióptrico da correção ótica.

Na **visualização estereoscópica** a distância vergencial varia consoante a posição virtual do objeto no espaço, enquanto a distância focal permanece no plano do ecrã para ambas as distâncias de 50 e 33 centímetros. Este conflito é o principal motivo apresentado na literatura para a fadiga visual após a visualização estereoscópica.

3.2.3 Síndrome da Visão 3D

Como um síndrome descreve um grupo de sintomas que coletivamente indicam ou caracterizam uma doença, alteração fisiológica ou condição anormal, Maino (34) (professor, pediatra e investigador), denomina **síndrome de visão 3D**, aos sintomas e sinais consistentes após a visualização estereoscópica. Os sintomas apresentados frequentemente pelos consumidores desta tecnologia são visão desfocada, tensão ocular, desconforto, fadiga visual, diplopia, náuseas e dor de cabeça. Maino (35) estabelece que a presença deste síndrome pode ser um preditor de problemas binoculares, tornando-se fundamental a avaliação exaustiva do sistema visual tanto em crianças como em adultos. Nos Estados Unidos da América as crianças estão expostas a estímulos estereoscópicos por períodos de longa duração na escola, em jogos de aprendizagem interativos e também nos tempos livres através dos jogos de computador. Apesar da preocupação com os sintomas em adultos, o principal interesse do autor, está no sistema visual das crianças que se encontra em desenvolvimento e a incidência de anomalias binoculares é elevada. O tratamento proposto tanto para crianças como para adultos é a aplicação de terapia visual de modo a resolver o problema binocular presente, desse modo o conforto visual aumentará durante a visualização estereoscópica.

Ding e Levi (36), através da técnica de ressonância magnética (*fMRI - functional Magnetic Resonance Imaging*) demonstraram que durante o desenvolvimento do sistema visual algumas experiências podem perturbar o desenvolvimento da performance binocular e em particular da estereopsia. Contudo, a estereopsia pode ser recuperada através de meios da aprendizagem perceptual, sugerindo a plasticidade da estereopsia. A aprendizagem perceptual é considerada um método importante para a recuperação da visão binocular em adultos com ambliopia, comprovando a melhoria das seguintes propriedades (37-39):

- Acuidade de Vernier;
- Discriminação da Posição;
- Interação Espacial;

- Detecção do Contraste;
- Reconhecimento das Letras.

No caso do treino da estereopsia, com a aprendizagem perceptual, o objetivo principal é estabelecer o alinhamento binocular e a fusão através da redução do contraste no olho dominante. Numa sequência clínica são também efetuados testes de pré e pós treino em que o estímulo utilizados não contém pistas monoculares, também chamados de testes de disparidade pura. Muitos investigadores consideram os estereogramas de pontos aleatórios (teste Randot) o padrão de ouro para a avaliação da estereopsia (40). Em pequenos ângulos de estrabismos ainda existe visão estereoscópica e portanto este teste pode ser aplicado com sucesso, todavia com ângulos maiores de estrabismo a detecção de profundidade pode não ser conseguida devido às características dos pontos: pequenos, densos, baixos em contraste e estáticos. Ainda que os pacientes com estrabismo assegurem terem a percepção de profundidade no quotidiano, não há certeza de que a fusão seja possível nestes casos. Pela análise da literatura é evidente que a disparidade pode ser detetada sem ocorrer fusão (36).

Uma característica particular do processo da aprendizagem perceptual está relacionada com as pistas monoculares. Os estímulos utilizados nas sessões podem conter pistas monoculares perfeitamente correlacionadas com a disparidade produzida. Deste modo, evita-se a desmotivação de pacientes com ausência de estereopsia com estímulos apenas em que a pista facultada é a disparidade; e permite também a aprendizagem da associação da informação monocular com a resposta apropriada de profundidade. Wilcox (41) demonstra isso mesmo "*um mecanismo de profundidade estereoscópica ocorre sempre devido a um estímulo monocular*".

Em conclusão podemos dizer que grande parte dos estudos remetem para a recuperação da estereopsia em adultos através da melhoria do processamento da disparidade cortical com a aprendizagem perceptual. Todavia, o passo primordial é a melhoria do controlo da vergência.

3.2.4 Desconforto Visual vs Fadiga Visual

A maioria dos autores não fazem a distinção entre desconforto e fadiga visual, apesar destas duas entidades corresponderem a conceitos distintos. A fadiga visual consiste no esforço fisiológico ou *stress* resultante da exercitação do sistema visual como tal pode ser medida objetivamente. Por sua vez, o desconforto visual é a parte subjetiva, isto é, determinado de forma subjetiva através de questionários, facultando uma indicação para a medição objetiva da fadiga visual. Na literatura estes termos nem sempre estão bem definidos e a sua interpretação é normalmente definida como astenopia (42). Esta, segundo Sheedy (23) pode classificar-se como interna ou externa. A astenopia interna é considerada como dor devido, por exemplo a *stress* acomodativo. A astenopia externa é tida em conta como sintoma, exemplo disto são a irritação e o ardor, causados por estímulos visuais adversos (6). Portanto para avaliar a fadiga e/ou o desconforto visuais causados pela exposição a imagens estereoscópicas é necessário a utiliza-

ção tanto de métodos objetivos como subjetivos. Um modelo de questionário utilizado para os testes subjetivos é o Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) desenvolvido por Kennedy et al (43). Posteriormente alguns investigadores fizeram adaptações a este modelo e utilizam cinco fatores de análise para a classificação das imagens, sendo elas a tensão ocular, desconforto generalizado, náusea, dificuldade de focagem e dor de cabeça (44, 45). Os resultados deste tipo de testes concluem que as imagens estereoscópicas causam efetivamente desconforto visual (46, 47).

Muitos estudos avaliaram a fadiga visual objetivamente através de diferentes parâmetros visuais, entre os quais: avaliação do diâmetro pupilar, acuidade visual, função crítica de fusão, acomodação, desempenho na tarefa visual, a velocidade dos movimentos oculares e a classificação subjetiva da fadiga visual. (48-51). Como a resposta acomodativa é variável com a idade e tende a ser reduzida quanto maior for a idade a partir dos 40 anos (fase da presbiopia), os resultados são mais expressivos para a avaliação da fadiga visual denotando-se um aumento da sintomatologia após a exposição a estímulos 3D. A resposta pupilar em conjunto com a acomodação e a convergência constituem a tríade de visão próxima e como seria de esperar este parâmetro também altera o seu valor enquanto são vistas imagens estereoscópicas. A atividade da pupila pode ser afetada por diversos fatores externos, são o caso do cansaço, sonolência ou excitação. Nakama constatou que diâmetros pupilares mais pequenos ou mudanças lentas de tamanho (para miose ou midríase) os indivíduos geralmente sentem tensão ocular. Os estudos de Jaschinski (52) e Gray (53) verificaram que as pupilas quando expostas algum tempo a monitores CRT ficam em miose. Ainda assim para utilizadores jovens as variações não são significativas. Os autores concluíram que a disparidade por si só é um estímulo suficientemente forte para provocar alterações em alguns parâmetros visuais.

Muitos autores compararam o conforto visual de imagens 2D e 3D com diferentes tempos de exposição estereoscópica. Emoto (46) constata que após exposição de uma hora a estímulos estereoscópicos comparativamente com imagens bidimensionais, ocorreu uma diminuição estatisticamente significativa da amplitude fusional, contudo para a relação AC/A o mesmo não se verifica. Pelas suas conclusões, a amplitude fusional pode então ser considerado um parâmetro objetivo da fadiga visual. Lee e Song (54) verificaram que a fadiga visual associada à técnica 3D, pode ser induzida por características individuais, como a idade, sexo e fatores genéticos. Numa amostra com 294 participantes, os homens apresentam mais fadiga do que as mulheres. A faixa etária até aos 10 anos constatou fadiga visual ligeira, enquanto que os adultos (<20anos) apresentaram fadiga baixa a moderada. Comparando os níveis de fadiga nos familiares dos participantes, os autores verificaram que embora a relação não seja simples, existe correlação entre os resultados obtidos.

3.2.5 Causas do desconforto e da fadiga visual

Os primeiros estudos sobre a imagem estereoscópica estão relacionados com a visão binocular ou particularidades dela. Os ecrãs estereoscópicos tinham como objetivo produzir estímulos idênticos ao mundo real e serem percebidos como tal.

Nos Estados Unidos, na década de 80, Kennedy et al (43) desenvolveram alguns estudos com a finalidade de verificar se a realidade virtual, poderia interferir diretamente com o observador. O parâmetro analisado foi a estabilidade postural dos indivíduos. As conclusões foram surpreendentes, constatou-se que os ambientes virtuais causam desequilíbrio postural, e que este é consequência dos enjoos provocados por estes tipo de ambiente (55). Na tentativa de se averiguarem quais os fatores inerentes a estes sintomas, a partir da década de 90, existem inúmeros estudos sobre esta temática. Os dois maiores problemas relacionados com a tecnologia 3D descritos e explorados são os seguintes:

- discrepância entre a acomodação e a convergência binocular, derivada da manipulação direta da disparidade retiniana no plano da imagem;
- baixa qualidade da percepção de profundidade, derivada dos defeitos adquiridos na criação do conteúdo 3D ou do método de apresentação desse conteúdo.

Através da literatura pode-se classificar as causas para o desconforto e fadiga visuais em dois grandes grupos. Um deles associado à qualidade da imagem 3D, como é o caso da disparidade do ecrã e as diferentes distorções criadas nos diferentes estágios da produção da imagem estereoscópica. O outro grande grupo está associado aos problemas de processamento fisiológico e interpretação visual dessas mesmas imagens.

3.2.5.1 Problemas no conteúdo da imagem estereoscópica

A. Propriedades do ecrã

Um parâmetro que afeta toda a percepção da visualização é o **tamanho do ecrã** onde as imagens são apresentadas. Quando as imagens são captadas o conteúdo estereoscópico é definido para uma determinada área de representação, como por exemplo telemóvel ou cinema. As câmeras são colocadas com uma distância e comprimento focal específico, tendo de ser ajustadas para medidas de ecrãs diferentes e também para distâncias de visualização diferentes. O desconforto pode ser iniciado devido ao fato destes parâmetros não serem respeitados, uma vez que o tamanho dos objetos representado tridimensionalmente não se assemelha ao tamanho real. Ficando mais evidente quando comparado com os restantes objetos da cena estereoscópica.

Em termos cinematográficos a largura do ecrã também é tida em conta, porque a visualização do filme tanto acontecerá na sala de cinema, como numa televisão qualquer através

de um *DVD*. Então estabeleceu-se como regra, que em paralaxe negativa, a disparidade não pode ser superior a 2-3% da largura do ecrã, e 1-2% na paralaxe positiva (28).

Quando se verifica também **disparidade excessiva do ecrã** pode ocorrer dificuldade na capacidade de fusionar as diferentes imagens de cada olho. Os limites de fusão diminuem para objetos estáticos, pequenos e com muito detalhe (56) e aumentam com objetos grandes, móveis e periférico (57). Este fato, deve-se aos limites de fusão, uma vez que estes são influenciados por diversos fatores como a propriedades do próprio estímulo, o tempo de exposição, a quantidade da iluminação, o movimento ocular, a informação da disparidade retiniana e as características individuais (58). O limite de disparidade muda proporcionalmente com o tamanho do estímulo ou da escala, contudo também muda inversamente com a frequência espacial, isto é, grandes disparidades só conseguem ser fusionadas com estímulos de baixas frequências. Quando a disparidade é superior aos limites de fusão, o sistema visual tem menos capacidade de compensar a heteroforia, aumentando a foria associada.

Liu descreve graficamente a relação entre fadiga visual e a disparidade induzida, como apresentado na figura 3.4.

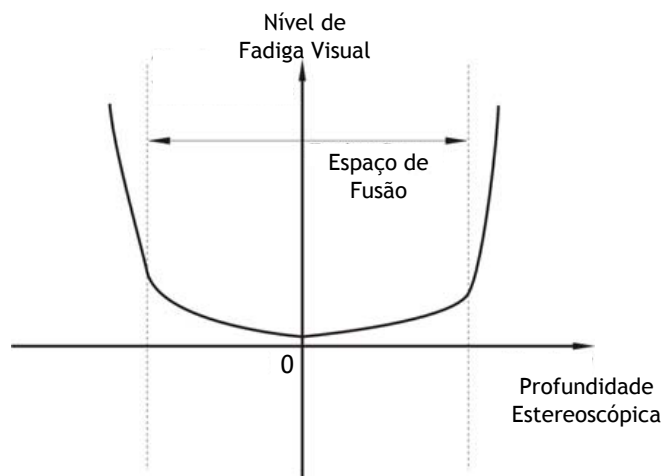


Figura 3.4: Relação entre a disparidade e o nível de fadiga visual (adaptado de (59)).

Quando a disparidade (profundidade estereoscópica) se situa no espaço de Panum, o nível de fadiga visual é residual, muito próximo de zero. Quando a disparidade ultrapassa o espaço fusionável, a fadiga visual aumenta exponencialmente, provocando em última instância diplopia (59). Assim quando se aumenta a magnitude de disparidade e a velocidade de movimento do estímulo estereoscópico, o desconforto visual também tende a aumentar (60).

A fadiga e o desconforto visual dependem fortemente das características da imagem. A qualidade da percepção da imagem será melhor, por exemplo, quanto maior for o contraste da

imagem. Embora este parâmetro reduza a sensibilidade para a percepção de disparidade, não altera os limites de fusão (61). O efeito do contraste na qualidade perceptual entre vídeos 2D e 3D é semelhante (62). Shigemasa e Sato (63) verificaram que a percepção de profundidade estereoscópica também depende da informação do contorno do objeto. Se for nítido, a disparidade horizontal percebida aumenta significativamente. Todavia, Toya et al (64) comprova que as qualidades semânticas da imagem (as características de alto e baixo nível, como a frequência e o contraste) dependem da quantidade de disparidade horizontal utilizada. E estas dependem fortemente da distribuição do estímulo descrito pelo par de imagens estereoscópicas.

Tyler (65) encontra a relação entre a frequência espacial e a amplitude da disparidade. Segundo o autor esta relação, representada no gráfico da figura 3.5, delimita a área de profundidade estereoscópica máxima percebida.

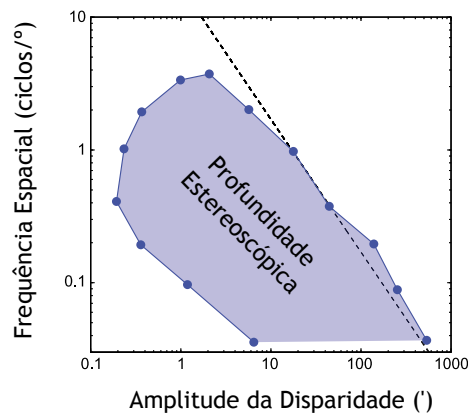


Figura 3.5: Ilustração representativa da relação entre frequências espaciais e a amplitude de disparidade (adaptado de (65)).

A linha descontínua representa a amplitude de disparidade e frequência espacial constantes. Pela análise do gráfico, as variações da frequência espacial não devem ser altas para que se possa detetar profundidade (66).

Os níveis de iluminação e luminância também influenciam a qualidade da percepção estereoscópica, uma vez que aumentando os níveis de luminância, aumentar-se-á a percepção de profundidade (67).

B. Artefatos Estereoscópicos

O termo artefato estereoscópico é aplicado aos defeitos resultantes dos diferentes estágios desde a criação até à visualização da imagem estereoscópica, sequencialmente como demonstrado no esquema da figura 3.6.

Na engenharia, especialmente na área de qualidade de imagem existem muitos estudos com o objetivo de melhorar a técnica 3D. A estimação de qualidade tem sido o principal

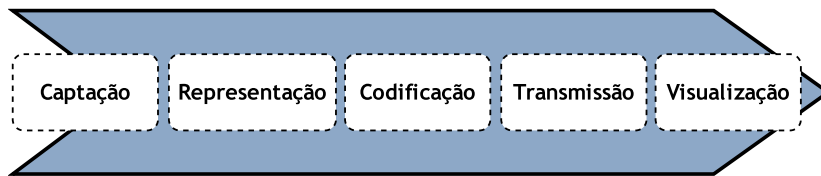


Figura 3.6: Esquema dos diferentes estágios da criação de imagens tridimensionais.

ponto de partida para os investigadores criarem e otimizarem o conteúdo visual desta tecnologia (68). As métricas de qualidade permitem descrever a qualidade percebida e avaliada pelo utilizador. Uma métrica de qualidade ideal seria a junção de três características: perceptual, objetiva e fiável (69). Considerando que a característica perceptual ou subjetiva está relacionada com o sistema visual. A objetiva representa um valor numérico da qualidade. A fiabilidade, por sua vez, assegura a qualidade percebida representativa para uma certa quantidade de utilizadores. As métricas de qualidade são fundamentais para a resolução destes artefatos, uma vez que estes influenciam a qualidade quer da estrutura, cor, movimento e a perceção binocular da imagem (70). O resultado possível pode ser causa de desconforto visual (71).

Os artefatos mais discutidos na literatura estão relacionados com as fases de captação e visualização, apresentados na tabela 3.1. Na etapa da captação os artefatos mais frequentes devem-se às imperfeições do sistema ótico ou à configuração das câmeras, como é o caso da Distorção Angular, também denominada por *Keystone Distortion* e a Curvatura de Campo (*Depth Plane Curvature*). O Efeito Cartolina (*Cardboard Effect*) resulta de parâmetros de aquisição de imagem como a distância de convergência ou comprimento focal da lente. A última fase do processo - a visualização, é determinante para que a imagem estereoscópica seja percebida. O sistema de visualização torna-se a concretização física de toda a criação de imagem (72). Se este sistema for limitado, mesmo que até esta fase o conteúdo estereoscópico seja perfeito (irreal), a imagem não seria percebida como tal (73, 74). Os artefatos nesta fase são influenciados pelo tipo de ecrã utilizado (45). Como principais artefatos nesta fase existem a Distorção de Shear, o *crosstalk*, a Inversão (Image Flipping) e o Efeito de Barramento (*Picket-Fence Effect*).

Tabela 3.1: Tabela resumo dos principais artefatos que afetam o conteúdo da imagem 3D gerados durante a sua criação.

Captação	Visualização
<ul style="list-style-type: none"> • Distorção Angular • Curvatura de Campo • Efeito Cartolina 	<ul style="list-style-type: none"> • Distorção de Shear • <i>Crosstalk</i> • Inversão de Imagem • Efeito de Barramento

A **Distorção Angular** e a **Curvatura de Campo** ocorrem com muita frequência e devem-se à configuração convergente da câmara. Durante a captação da imagem as duas câme-

ras não estão direcionadas para o infinito e formam um ângulo entre elas, o que induz paralaxe horizontal e vertical incorretas. O resultado destas distorções é uma imagem com forma trapezóide (lados oblíquos entre si). A Distorção Angular é consequência da introdução de paralaxe vertical, enquanto que a Curvatura de Campo surge da paralaxe horizontal incorreta. Os efeitos destas distorções são negativos e a paralaxe vertical está diretamente associada ao desconforto visual (75).

O **Efeito Cartolina** está diretamente relacionado com a percepção de diferentes planos de profundidade. Na prática, ocorrem devido à sobrestimação da distância objeto. O tamanho percebido e a profundidade não correspondem, ou seja, a profundidade percebida pela disparidade (inversamente proporcional ao quadrado da distância) é mais pequena quando comparada com o tamanho percebido (inversamente proporcional à distância). Todavia, para exposições curtas, não se torna num fator preponderante de desconforto visual. Este efeito pode resultar de parâmetros relacionados com a aquisição da imagem bem como da quantetização da disparidade ou valores de profundidade, na fase da codificação.

A **Distorção de Shear** é típica de ecrãs onde só é permitida uma única posição para a visualização correta de imagens 3D (70). Portanto, quando esta posição é alterada, a imagem percebida é distorcida. Para objetos estáticos com disparidade cruzada, estes parecem mover-se em direção oposta ao observador, enquanto que objetos com disparidade homónima aparentam mover-se na direção do observador. Deste modo, a imagem percebida é pouco natural.

O **Crosstalk** é percebido como sombra, contornos duplicados ou imagens fantasma e depende exclusivamente do sistema de visualização (ecrã/óculos). Este artefato pode ser gerado por dois motivos. O primeiro devido à persistência do fósforo do ecrã, isto é, quando a parte vista pelo olho direito e esquerdo são alternadas e a intensidade da imagem permanece na imagem seguinte. Desse modo, uma pequena porção da parte que é visualizada pelo olho direito também é percebida pelo olho esquerdo. O segundo motivo prende-se com o método de separação da imagem observada pelo olho esquerdo e direito. Pastoor (76) demonstra que esta distorção aumenta, com o aumento do contraste e dos valores de disparidade. Conclui também que o desconforto visual melhora significativamente quando se suprime a totalidade deste tipo de distorção.

O **Efeito de Barramento** e a **Inversão da Imagem** são percebidos sempre que o observador faz um movimento lateral da cabeça durante a visualização estereoscópica. O Efeito de Barramento deve-se ao aparecimento de uma barra vertical na imagem devido à ocultação entre as colunas de pixels no LCD (*Liquid Crystal Display*). Já a Inversão de Imagem é perceptível na transição entre as zonas de visualização do ecrã para cada olho. As imagens

com este tipo de defeitos são percebidas pouco naturais.

A evolução da tecnologia passa pela correção de todos estes artefatos, de modo que a imagem 3D se assemelhe o mais próximo possível da imagem real. De acordo com Hoffman, quando as pistas de profundidade produzidas são corretas ou muito próximas (77), verifica-se o seguinte:

- Aumento da estereoacuidade nas tarefas de tempo limitado;
- Redução no tempo requerido para identificar um estímulo estereoscópico;
- Redução das distorções na profundidade percebida;
- Redução da fadiga e o desconforto.

3.2.5.2 Conflito entre Acomodação e a Vergência

A acomodação e a vergência são dois mecanismos fundamentais para a percepção da imagem estereoscópica.

Para que ocorra visão nítida e simples durante a visualização 3D, os estímulos acomodativo e vergencial adotam comportamentos diferentes. O estímulo acomodativo permanece fixo no ecrã, enquanto que o estímulo vergencial pode ter flutuações de profundidade, provocado por diferentes magnitudes de disparidade apresentada no ecrã (77). As estereoimagens podem ter sinal positivo ou negativo, diferindo com o sinal da disparidade das imagens representadas no ecrã (78). Se a estereoimagem for colocada para trás do ecrã a disparidade retiniana produzida é homónima, denominando-se também como paralaxe positiva. Pelo contrário, na paralaxe negativa, a estereoimagem é colocada para a frente do ecrã (sinal negativo), estimulando a disparidade retiniana cruzada.

Segundo a análise teórica de Rushton e Riddell, num ecrã estereoscópico a profundidade dos objetos é facultada pela disparidade (posição relativa) da imagem do olho esquerdo e direito. A acomodação mantém o ecrã focado e a variação do sistema vergencial garante que a imagem do objeto permaneça na fóvea de cada olho. Deste modo, quando um objeto se aproxima a acomodação varia pouco, porque a distância focal se mantém. Ao contrário da vergência que é progressivamente maior, quanto maior for a disparidade das imagens apresentadas (79), para ambos os sentidos. A figura 3.7 representa a comparação entre a visualização natural e a visualização estereoscópica.

Quando a distância entre os estímulos é pequena, as respostas vergencial e acomodativa são corretas. Contudo, se a diferença for grande, a relação entre os estímulos torna-se pouco natural e uma vez que a discrepância é grande, ocorre fadiga visual. Apesar da relação direta entre o estímulo e a resposta acomodativa, esta não é uma medida fácil devido ao atraso acomodativo (*lag*) (80). O atraso acomodativo ocorre quando o alvo visual está para a frente ou para trás do

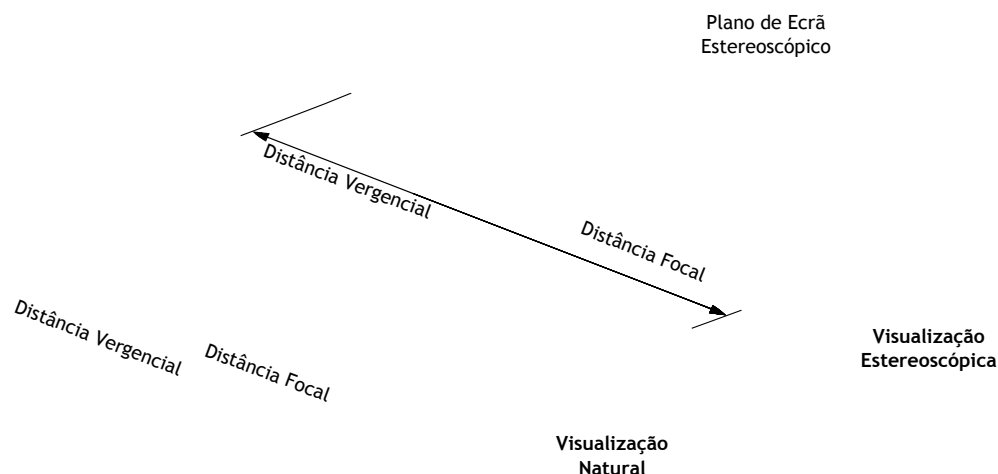


Figura 3.7: Ilustração do comportamento das distâncias vergencial e focal durante a visualização natural e a visualização estereoscópica com paralaxe positiva.

ponto de acomodação tónica. Consequentemente, a acomodação não é evocada com precisão, levando a que se sucedam atrasos ou avanços (relativamente à posição tónica), induzindo a deterioração da acomodação tónica por fadiga visual após a visualização estereoscópica (81).

Descrevendo o processo fisiológico inerente, como apresentado na sequência da figura 3.8, a desfocagem ocorre devido ao aumento do erro acomodativo, o que origina diminuição das altas frequências espaciais. Por conseguinte há aumento do erro vergencial dado que imagens com baixas frequências espaciais são estímulos fracos de vergência (82). Portanto, se uma imagem contém altas frequências espaciais são assegurados os limites mínimos de fusão (61). Caso contrário, não se pode garantir a fusão, tornando deste modo os sistemas vergencial e acomodativo fundamentais para a percepção estereoscópica.

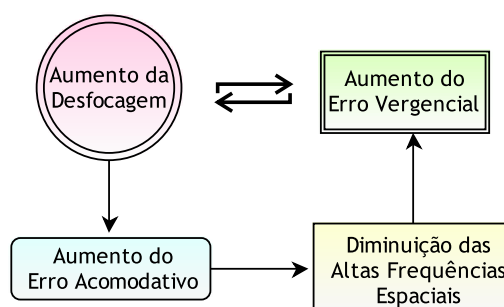


Figura 3.8: Efeito da desfocagem na acomodação e vergência.

Hare (83) estudou a relação entre a presença exclusiva de frequências espaciais baixas e o desconforto visual associado à desfocagem. O autor constata que a ausência de frequências espaciais altas aumenta o desconforto visual.

Existem duas componentes da resposta acomodativa para alterar uma distância de visualização:

componente lenta e a componente rápida. A desfocagem da imagem retiniana origina a componente lenta, enquanto que a componente rápida é estimulada pela disparidade retiniana. Durante a exposição de estímulos 3D, o sistema motor é imprescindível para esta tarefa, uma vez que a estereoimagem altera a sua posição no espaço ao longo de um período de tempo (84). A diminuição da amplitude fusional é o principal responsável pela tensão criada no sistema vergencial, dificultando a visão simples (85). Shor (86) verifica que quando ocorre a adaptação mais rápida da acomodação do que vergência, ou vice-versa, este fator implica fadiga visual.

Uma abordagem diferente deste tema, de forma a explorar outras razões para a origem do conflito entre a acomodação e a vergência é feito por Shibata et al (28). A sua análise é realizada através do estudo da **heteroforia** e da **visão de conforto**, baseando-se nos estudos de Percival e Sheard. Os autores concluem que em paralaxe positiva com distâncias de visualização longas, os indivíduos apresentam maior desconforto. Já em distâncias curtas a paralaxe negativa apresenta maior sintomatologia. Quanto à heteroforia constataram que para visualizações a distâncias longas há tendência para ortoforia. Todavia, com a diminuição da distância verifica-se a tendência para a exoforia. Assim sendo, a heteroforia e a ZVBSN são preditivas de desconforto visual a curtas e médias distâncias.

Na literatura o valor máximo de disparidade tolerado pelo sistema visual é de 1° (87). Este valor foi calculado através das características da profundidade de foco. Considerando que o limite tolerado para a profundidade de foco (no infinito) numa pupila de 3mm é $1/3 D$. Imagens percebidas fora da profundidade de foco apresentam menos conforto visual do que imagens dentro da profundidade de foco devido à desfocagem (88). Quando a disparidade do ecrã ultrapassa o valor recomendado de 1° considera-se causa de desconforto visual. Para um visão confortável é fundamental preservar a fusão e manter o objeto nítido, todavia nesta situação o sistema oculomotor está continuamente a ser estimulado, induzindo o aumento do *stress* ocular.

Os limites da zona de conforto dependem diretamente da distância de visualização. Pela tabela 3.2 em que se mediram os limites da zona de conforto com a variação da distância de visualização, verifica-se que quanto maior é a distância de observação, maiores são os limites.

Tabela 3.2: Relação entre a distância de observação e os limites de visão confortável em metros para 1° de disparidade (adaptado de (42)).

1 ° Disparidade		
Distância de Observação (m)	Limites de Visão Confortável (m)	
	Próxima	Intermédia
3	1.60	17.00
2	1.30	4.50
1	0.78	1.40
0.5	0.44	0.58

Na figura 3.9 é apresentada a zona da visão de conforto (em metros) representada pela distância de visualização (em metros) em função da distância de vergencial (em metros). O eixo das abcissas representa a distância ao estímulo de vergência, enquanto que a distância de visualização (ou distância focal) é definido pelo eixo das ordenadas. A bissetriz do gráfico (linha preta) representa a visualização natural. As linhas coloridas apresentam os limites da zona de conforto. As linhas descontínuas dizem respeito às distâncias normais de visualização de alguns dispositivos: telemóvel, computador, televisão e cinema. Pela análise do gráfico da figura 3.9 e pela comparação entre a zona de conforto, por exemplo entre o cinema e o telemóvel, verifica-se que quanto maior for a distância de visualização, maior será também a área de conforto.

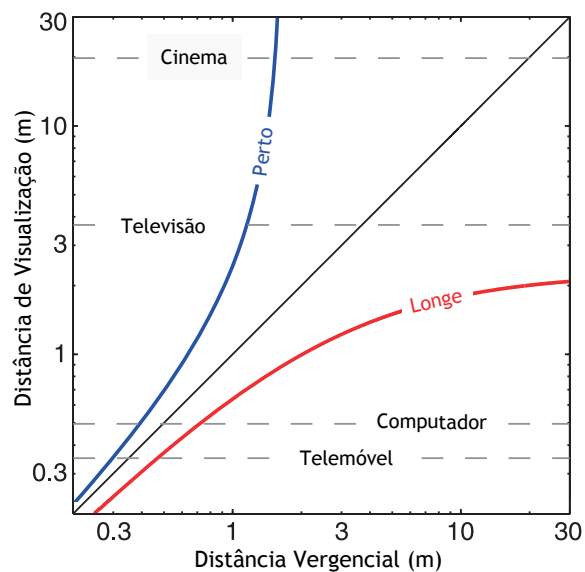


Figura 3.9: Representação da zona de conforto visual em função da distância de visualização (adaptado de (28)).

A lei de Percival pode ser uma alternativa ao limite de 1° , quando se tem em conta a zona de conforto para o sistema vergencial. Contudo, a obtenção de imagens estereoscópicas através de prismas é perceptualmente diferente das imagens visualizadas em ecrãs 3D. O prisma provoca disparidade absoluta - a fusão motora e a mudança ocorre para todo o campo visual, enquanto que a disparidade produzida num ecrã é relativa, induzindo assim mudanças apenas em porções pequenas do campo visual. A zona de conforto de Percival para distâncias grandes é baseado nos pontos de rutura, não inclui o plano do ecrã estereoscópico, dado que este já não se encontra dentro da zona de conforto.

Portanto, um estímulo para não ser percebido em diplopia, os olhos têm de convergir para próximo da distância objeto. Quando os erros vergenciais são pequenos, a fusão ocorre, mas também há redução na estereoacuidade. Se os erros vergenciais ultrapassam esse limite ocorre a rutura da visão binocular.

Kim et al (89) investigaram de que forma as propriedades temporais do estímulo de visualização

pode provocar desconforto através do conflito vergência-acomodação. A ligação acomodação-vergence é constituída por duas componentes: a fásica e a tónica. A componente fásica do processo acomodação-vergence diz respeito às mudanças visuais a curto prazo, por exemplo uma simples mudança de ponto de fixação. A componente tónica apenas está presente em alterações a longo prazo, como é o caso do uso de uma lente oftálmica. Assim, as mudanças rápida operadas pela componente fásica são mais difíceis de gerir para o sistema visual. Exige um grande equilíbrio visual devido à quantidade de vezes que se repetem por minuto. Desse modo, os autores consideraram um estímulo acomodativo constante para a distância de visualização, enquanto que o estímulo de vergência variou em três frequências espaciais: 1, 1.4 e 2 ciclos por grau. Os autores concluíram que jovens adultos apresentaram mais desconforto visual quando as variações de vergência são mais rápidas, principalmente em condições de maior discrepância entre os diferentes estímulos.

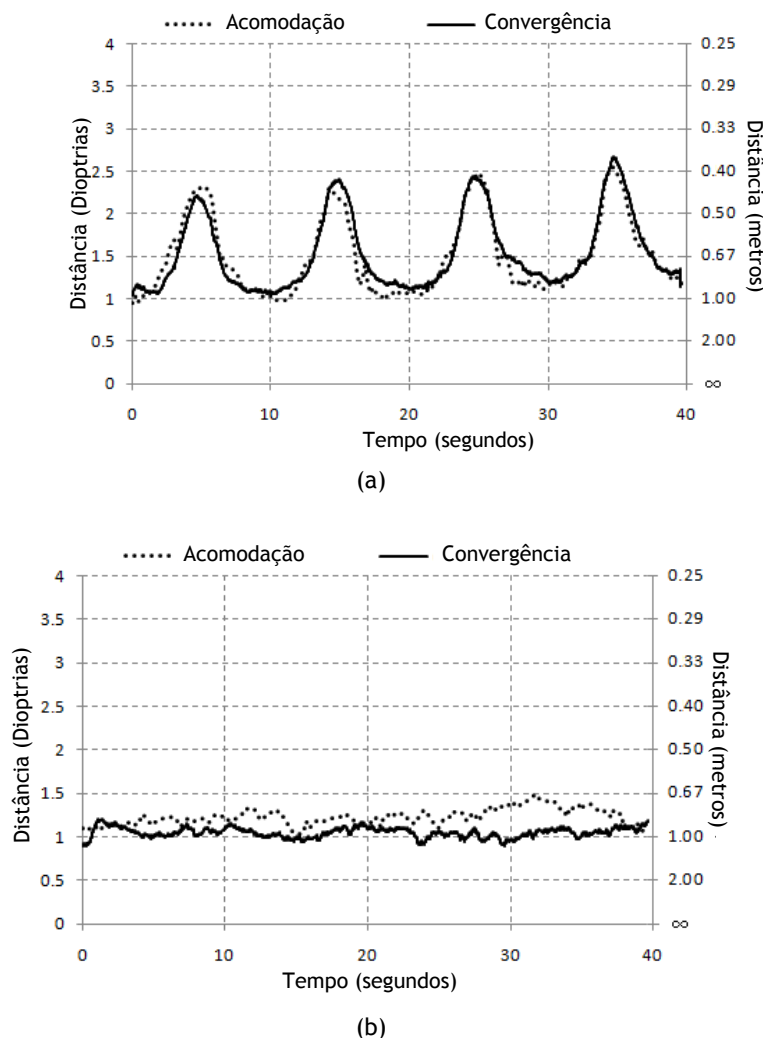


Figura 3.10: Comportamento da acomodação e da vergência de um participante do estudo (adaptado de (90)). (a) Visualização Estereoscópica. (b) Visualização Bidimensional.

Todavia, um estudo recente desenvolvido por Hori et al, (90) onde são comparadas a acomoda-

ção e a vergência em imagens 2D e 3D, verificou-se que os valores das distâncias de convergência e distância focal são semelhantes para jovens cujo poder acomodativo é elevado. O gráfico da figura 3.10 demonstra estas conclusões para um dos participantes do estudo. A acomodação e a convergência são muito similares (gráfico da figura 3.10a) durante a visualização estereoscópica, tal como ocorre na visualização de imagens 2D (gráfico da figura 3.10b). O movimento do olho em condições estereoscópicas é semelhante em condições naturais, isto é, a vergência é sempre acompanhada por acomodação e vice-versa. Os autores sugerem que as diferenças entre os estímulos de acomodação e vergência podem não ser o principal motivo da fadiga visual, mas sim as imagens 3D utilizadas (problemas abordados na subseção 3.2.5.1). Outro estudo semelhante, com as mesmas conclusões sobre a acomodação durante a exposição estereoscópica foi apresentado por Oliveira et al, no qual não se constataram diferenças significativas entre os estímulos acomodativo e vergencial (91).

3.3 Conclusão

Com a experiência realizada por Wheatstone em 1832, deu-se início à técnica 3D. No entanto, após essa data muitos autores desenvolveram trabalhos para a sua evolução tal como a conhecemos hoje em dia.

Relacionado com a utilização desta tecnologia cada vez mais presente, muitos estudos comprovam as suas implicações na saúde. Maino designou como síndrome da visão 3D, todos os sinais e sintomas consistentes após a visualização estereoscópica. Maioritariamente, os sintomas apresentadas pelos observadores são a visão desfocada, fadiga visual, diplopia e náuseas. Quando o sistema visual ainda se encontra em desenvolvimento, este tipo de experiências pode afetar o desempenho binocular e a estereopsia em particular. Todavia, a estereopsia pode ser recuperada mesmo em idade adulta através do método de Aprendizagem Percetual, com a melhoria do controlo vergencial e do processamento cortical da disparidade.

Determinado através de questionários, a visualização estereoscópica causa desconforto visual. A fadiga visual diz respeito ao esforço fisiológico da exercitação do sistema visual, podendo ser medido de forma objetiva. Alguns estudos encontram variações no sistema visual aquando de visualizações estereoscópicas. Os parâmetros alterados encontrados são a resposta pupilar, acomodação e amplitude fusional. Sabe-se ainda que a fadiga visual é mais propensa nos homens, idades superiores a 20 anos e pode estar associada a fatores genéticos.

A fadiga visual associada à tecnologia 3D pode deve-se a muitos fatores. Fazendo uma análise, podem-se agrupar em dois grupos: os problemas no conteúdo da imagem 3D e o conflito acomodação-vergência. Relacionado com o conteúdo da imagem, existem duas características intrínsecas entre si: a disparidade excessiva do ecrã de representação e a disparidade apresentada. O limite de disparidade altera proporcionalmente com o tamanho do estímulo. Contudo

as disparidades grandes só podem ser fusionadas com estímulos de baixas frequências espaciais. A fadiga visual aumenta drasticamente quando os limites fusionáveis são ultrapassados.

Até à pouco tempo atrás, o conflito acomodação-vergência era apresentado como a principal causa da fadiga visual. Nos ecrãs estereoscópicos, o estímulo acomodativo e vergencial não eram semelhantes, dado que variavam constantemente. Na presença de uma imagem estereoscópica apresentada mais próxima ou afastada do observador (paralaxe negativa ou positiva), a acomodação mantém o ecrã focado, garantido a visão nítida, enquanto que a variação do sistema vergencial assegura que a imagem do objeto permaneça na fóvea de cada olho e seja percebida como única. Como as distâncias focal e vergencial não são semelhantes, pelo menos por momentos, ocorre conflito entre estes dois processos. Após um longo período de visualização onde estes processos são constantemente alterados, estariam criadas as condições para a fadiga visual.

Recentemente foi comprovado que a resposta acomodativa e a resposta vergencial, tal como acontece na visualização bidimensional, são semelhantes e que provavelmente existirá outra justificação para os sintomas referidos pelos consumidores desta técnica.

Como todos os processos do sistema visual estão relacionados entre si, alguns autores tentaram encontrar outras explicações, caso disso é o estudo dos limites da visão de conforto. O sistema visual só mantém o objeto nítido e único quando a disparidade não é superior a 1° . A distância de visualização é um fator fundamental para conforto visual, uma vez que o limite de visão confortável é diretamente proporcional à distância de visualização.

Capítulo 4

Ensaio Clínico

"Uma mudança deixa sempre patamares para uma nova mudança."

Niccolo Maquiavel

4.1 Introdução

Este capítulo pretende descrever detalhadamente a parte experimental da investigação. Tendo em conta a literatura analisada, considerou-se importante a avaliação do comportamento da visão sensorial quando exposta às tecnologias 3D e qual a sua interação com a parte motora visual. O desenho do estudo iniciou-se com a definição dos critérios de inclusão/exclusão e do equipamento/material necessário para a realização do estudo, apresentados na secção 4.2. O procedimento experimental, apresentado na secção 4.3, foi dividido em duas fases. A primeira diz respeito a análise optométrica para a seleção da amostra, a segunda fase à recolha de dados. A recolha de dados foi dividida em três sessões com variação do tempo de exposição a estímulos estereoscópicos em 20, 40 e 60 minutos. Antes e imediatamente após à exposição esteresocópica, foram realizadas sequencialmente as medições da estereopsia, as vergências fusionais, heteroforia e por fim a disparidade de fixação e curva de vergências forçadas. Na secção 4.4 encontram-se os resultados obtidos bem como as principais conclusões do estudo. Por fim, a discussão dos resultados é feito na secção 4.5.

4.2 Metodologia Experimental

O estudo apresentado é prospetivo e analítico. Tem como objetivo principal verificar se após exposição a estímulos estereoscópicos existe ou não variação de alguns parâmetros da função visual, nomeadamente, alteração da estereopsia, reserva fusional positiva, reserva fusional negativa, disparidade de fixação ou da heteroforia. Como objetivo secundário tenta-se estabelecer uma relação de causalidade entre a exposição e o efeito produzido, a fadiga e desconforto visual.

O estudo realizado obedeceu à Declaração de Helsínquia na qual foram salvaguardados os princípios éticos da experimentação com seres humanos. Para tal foi elaborada uma proposta de projeto de investigação, solicitada pelos autores, à Comissão de Ética da Faculdade de Ciências da Saúde da UBI. Esta proposta foi avaliada e da qual se obteve um parecer favorável, apresentado no anexo A.1.

A recolha dos dados experimentais decorreu num laboratório de investigação do Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior (UBI).

4.2.1 Caraterização da Amostra

A tamanho da amostra foi de 30 indivíduos, sendo constituída por 17 do género feminino e 13 do género masculino. A média das idades foi de $23,33 \pm 4.32$ anos.

Na seleção da amostra foram **critérios de inclusão** os indivíduos com as seguintes características:

- Ausência de patologia ou lesões oculares;
- Ausência de anomalias binoculares estrábicas;
- Ausência de heteroforia descompensada;
- Ausência de hiperforia;
- Presença de estereopsia;
- Acuidade Visual igual ou superior à unidade com a melhor compensação.

Os critérios de exclusão são todas as situações que não respeitem os critérios de inclusão.

Todos os participantes foram informados dos objetivos principais do trabalho, todas as implicações que poderiam surgir durante ou após a recolha de dados, bem como a possibilidade de não dar continuidade de permanência no estudo se assim fosse a vontade deste. Todos os participantes assinaram o Consentimento Informado de livre vontade, que é apresentado no anexo A.2, tendo sido esclarecidas todas as dúvidas dos participantes nos diferentes momentos do estudo.

4.2.2 Material e Equipamento Utilizado

No estudo foram analisados cinco parâmetros a estereopsia, reservas fusionais negativas, reservas fusionais positivas, heteroforia e disparidade de fixação. O material e equipamento utilizado para a medição dos parâmetros foi o disponível na instituição. Na medição da **estereopsia** o teste usado foi o **Randot Stereo Test**, representado na figura 4.1. O grupo utilizado para a discriminação de profundidade foi a mais fina do teste, com dez níveis de disparidade, variando assim entre os 400" e os 20". Foi pedido ao participante que indicasse em cada placa horizontal qual a argola que continha a informação de profundidade. Com a utilização deste teste foi feita também o despiste de supressão, através de controlo da supressão representado pela placa vertical composta pelas letras R e L e uma cruz.

As **régua de lentes prismáticas**, ilustradas na figura 4.2 foram utilizadas com diferentes técnicas para diferentes parâmetros analisados. A medição da **heteroforia** foi realizada com a barra de prismas em conjunto com a técnica do cover test, avaliando de forma objetiva a presença,



Figura 4.1: Teste Randot Stereo (adaptado de (92)).

direção e magnitude da heteroforia dos participantes. O **cover unilateral**, seguido do **cover uncover** foi necessário para verificar o tipo do desvio e a sua direção, indicado na análise da heteroforia (93). Foi também assegurado o controlo da acomodação com uma carta acomodativa de perto para uma acuidade visual igual à unidade, para que os valores do desvio quantificados pela barra de prismas não fossem sobre ou subestimados. As **vergências fusionais** positivas e negativas foram medidas com o teste de vergências a passos.

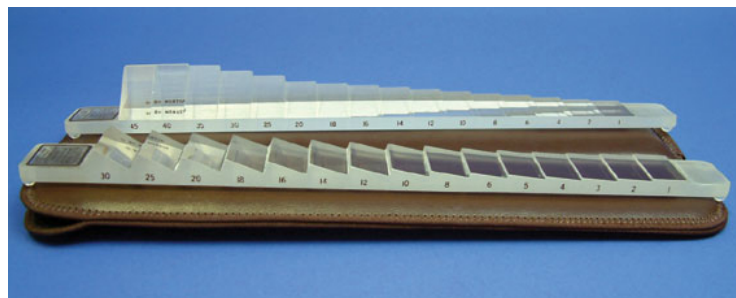


Figura 4.2: Barra de prismas vertical e horizontal (adaptado de (94)).

Com a finalidade de medir a **disparidade de fixação**, foi desenvolvido em laboratório um programa baseado na carta de Wesson. Pode-se verificar na figura 4.3, a janela principal do programa mostrada ao participante. O programa consiste no princípio da rutura da visão binocular com a utilização de filtros verde-vermelho. Neste caso, o olho direito com o filtro vermelho, vê a barra superior, enquanto que o olho esquerdo com o filtro azul, vê a barra inferior.

As barras são idênticas e subentendem um ângulo na retina de 2° . Na lateral esquerda bem como no parte inferior da janela principal contêm os campos com as características e especificações da medição. Na lateral existe o tamanho horizontal e vertical do monitor onde foi realizada a observação e a distância que este se encontrava do plano das lentes dos óculos anaglifos. As barras encontram-se dentro de um quadrado de contornos de cor preta de forma a facilitar a percepção da diplopia quando se rompe a fusão, servindo também de âncora periférica. Existe também no programa a opção de controlar a saturação das imagens vistas por cada olho, bem como o detalhe das barras, alterando assim o ângulo subentendido na retina. Todos estes parâmetros foram fixados para a análise da disparidade de fixação. O teste foi realizado

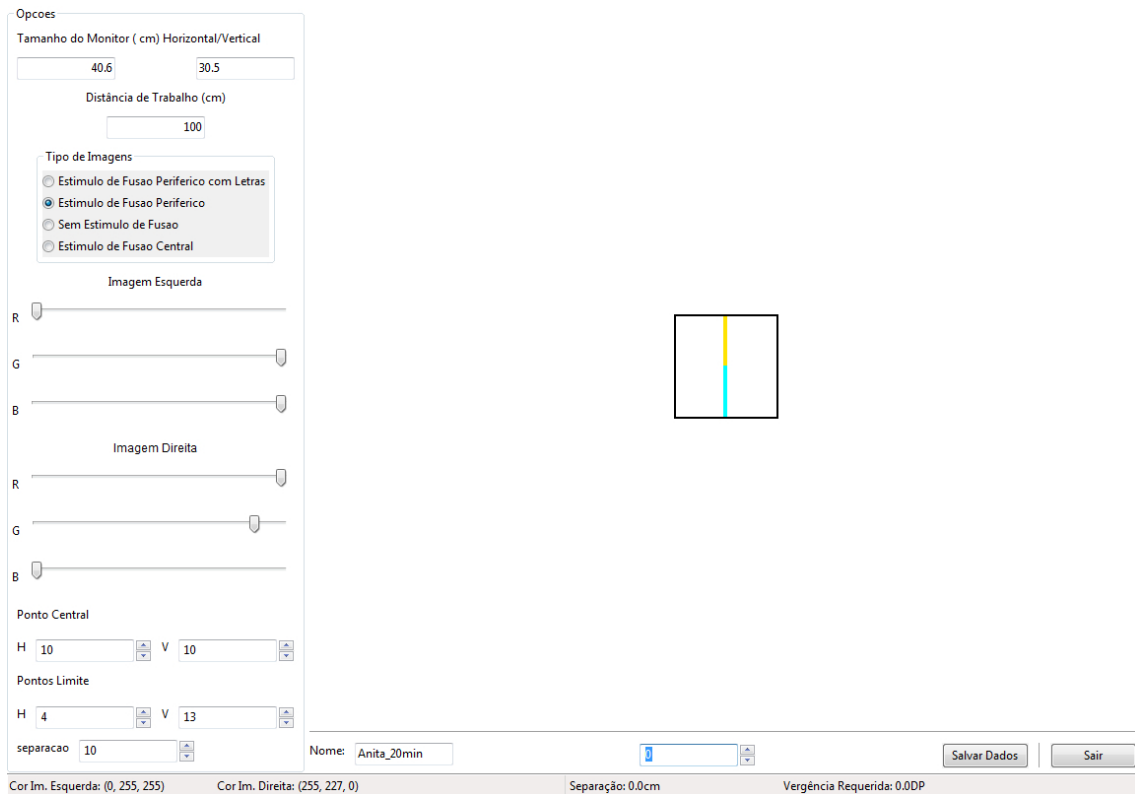


Figura 4.3: Janela principal do software desenvolvido para o estudo.

para a distância de 1 metro. O programa foi apresentado num monitor Sony GDM-F 520 do tipo CRT de 20 polegadas.

As barras têm tamanho horizontal de $1.5mm$ e comprimento de $19mm$, sendo que não há separação entre elas. Cada deslocamento de uma barra corresponde a 0.02° ($\approx 1.2mm$). Ao participante foi pedido o alinhamento vertical das barras. De modo a adquirir mais informação sobre o comportamento do sistema visual sob condições de *stress*, foi pedido também ao participante que alinhasse as barras enquanto se incrementava o valor prismático. Acabando por se realizar a medição da disparidade de fixação com vergência forçada. A metodologia seguida foi igual às restantes cartas comercializadas com a mesma finalidade, por exemplo da Carta de Wesson ou o Disparómetro de Sheedy. Nunca se excederem os $15s$ para cada lente prismática incrementada de forma a evitar a adaptação prismática.

4.3 Procedimento Experimental

O procedimento experimental realizou-se em duas etapas distintas. A consulta optométrica foi a primeira etapa realizada no estudo para assegurar os critérios de inclusão. Desse modo, foi realizado o despiste de patologia ocular, a determinação do erro refrativo (testes de Retinoscopia, Subjetivo Monocular e Binocular), a avaliação da visão binocular dos participantes através da verificação do valor das heteroforia, reservas fusionais positiva e negativa, a determinação da flexibilidade acomodativa monocular e binocular (FAM e FAB), retinoscopia de MEM e por fim

a medição da estereopsia. Assim sendo, os objetivos da consulta optométrica consistiram na avaliação da saúde ocular, a ametropia presente, e as condições de binocularidade dos participantes.

A segunda etapa consistiu na parte experimental, cujo protocolo se desenhou da seguinte forma: A recolha dos dados foi feita em três dias distintos. Portanto existiram 3 sessões em que os participantes foram expostos a estímulos estereoscópicos, variando o tempo de exposição entre os 20, 40 e 60 minutos. A razão destas durações prendeu-se com a visualização de um filme por exemplo numa sala de cinema. Os 20 minutos seriam metade da primeira parte antes de um intervalo. Os 40 minutos correspondem sensivelmente a metade do filme e os 60 minutos seriam quase a totalidade do filme. A ordem das sessões foi aleatório em cada sessão para cada participante.

4.3.1 Parâmetros Analisados

Antes e depois de cada exposição foram avaliados cinco parâmetros visuais. Inicialmente avaliaram-se dois parâmetros da visão sensorial, quantitativamente a estereopsia e a análise qualitativa da fusão sensorial através do despiste de supressão. Seguidamente foi realizada a avaliação da visão motora exaustivamente. Todos os parâmetros motores foram medidos, desde as vergências fusionais, heteroforia, disparidade de fixação e Curva de Vergências Forçadas. No esquema da figura 4.1 encontra-se a sequência da medição dos parâmetros. Antes da exposição estereoscópica foram medidos pela seguinte ordem a estereopsia, seguido da divergência e convergência, disparidade de fixação e por fim, a Curva de Vergências Forçadas. Imediatamente após a exposição foram medidos os mesmos parâmetros. Não se manteve a sequência feita antes da exposição, uma vez que a disparidade de fixação e a Curva de Vergências Forçadas foram medidas no ecrã de apresentação do filme, evitando assim deslocações.

Tabela 4.1: Sequência do método experimental utilizado

MEDIÇÃO	Estereopsia
	Divergência
	Convergência
	Disparidade Fixação
	Curva de Vergências Forçadas
EXPOSIÇÃO 3D	
MEDIÇÃO	Disparidade Fixação
	Curva de Vergências Forçadas
	Divergência
	Convergência
	Estereopsia

Várias foram as condições implícitas no procedimento da experiência, tais como o estímulo utilizado, o ambiente em que se desenvolveu a experiência e a montagem da mesma.

4.3.2 Estímulo Estereoscópico

O estímulo estereoscópico utilizado no estudo foi o filme "A Invenção de Hugo" segundo a intitulação portuguesa. O título original é "Hugo", foi dirigido por Martin Scorsese e a produção por Johnny Deep e Tim Headington. A co-produção é da Graham King - GK Films. A escolha do filme deveu-se particularmente aos prémios arrecadados tais como o óscar na categoria de melhores efeitos visuais e com a mesma categoria o prémio na BEFTA (British Academy of Film and Television Arts). O filme 3D foi realizado, segundo o diretor, com disparidade essencialmente negativa em que a separação das câmeras variou entre 1 e 18 polegadas (aproximadamente entre 2.5 e 45.7 cm).

4.3.3 Protocolo Experimental

Uma vez que era pretendido tornar a experiência o mais realista possível, ou seja, proporcionar uma sensação mais parecido possível ao que acontece na sala de cinema, a visualização do filme ocorreu num ambiente mesópico.

O monitor utilizado para apresentar o estímulo estereoscópico foi um Sony GDM-F 520, tipo CRT (Cathodic Ray Tube) de 21 polegadas, com a resolução de 1152×864 (resolução máxima), e *refresh rate* de 100Hz (mínimo para a visualização estereoscópica). A placa gráfica que gerou a dissociação das imagens foi a NVidia modelo GeForce GTX 550 Ti. O vídeo cuja resolução espacial é de 1920×1080 , foi visualizado através de óculos de barramento (wireless shutter glasses), na qual a imagem vista por cada olho é mostrada alternadamente de acordo com a vista apresentada no ecrã. Este tipo de dissociação permite uma total perceção das cores e de profundidade independentemente da posição da cabeça do observador.

Os participantes encontravam-se a 1m do monitor, em linha com o centro do ecrã, tal como apresentado no esquema da montagem experimental da figura 4.4. A cabeça dos participantes foi apoiada numa mentoneira para garantir a mesma distância durante a visualização e evitar deslocamentos da cabeça.

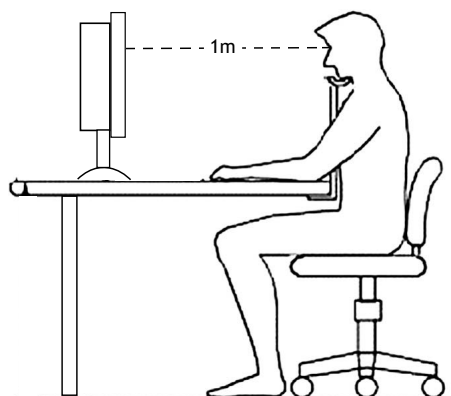


Figura 4.4: Montagem experimental do estudo.

4.4 Resultados

Os resultados foram obtidos para uma amostra de $n = 30$ indivíduos. A análise estatística foi realizada com o programa estatístico SPSS versão 21. Para cada variável foi inicialmente, realizada uma análise descritiva através da verificação das médias e respetivos desvios padrão. Posteriormente averiguou-se a normalidade dos dados obtidos com o teste Shapiro-Wilk para um nível de significância (p) de 0.05. Com a estatística analítica verificou-se que apenas alguns parâmetros não seguiam a normalidade, nomeadamente a estereopsia e a sessão de 60 minutos das reservas fusionais positivas. Nestes parâmetros foi calculada a assimetria e a curtose para averiguar a sensibilidade de cada variável pelas medidas da forma de distribuição. Como os valores absolutos foram inferiores a $|3|$ e $|7|$, respetivamente, foram considerados indicadores de sensibilidade psicométrica e ajustamento próximo à distribuição normal (95). Uma vez que os parâmetros respeitaram estas duas características estatísticas, procedeu-se à aplicação do T -test para amostras emparelhadas. Ainda assim, através do teste Wilcoxon para amostras emparelhadas verificou-se que os resultados não apresentaram diferenças comparativamente aos testes paramétricos.

4.4.1 Análise da Estereopsia

Os resultados obtidos para a estereopsia estão representados no gráfico da figura 4.5, onde no eixo das ordenadas estão os valores da estereopsia, expressa em segundos de arco ("). No eixo das abcissas encontram-se as diferentes sessões: 20, 40 e 60 minutos. Para cada sessão os resultados são apresentados antes e após a exposição. Encontra-se também no gráfico o comportamento da média da estereopsia para cada sessão. A verde claro estão representadas as medições feitas antes de cada sessão, enquanto que a verde escuro está representada medição após a exposição estereoscópica. Pela análise do gráfico da figura 4.5 verifi-

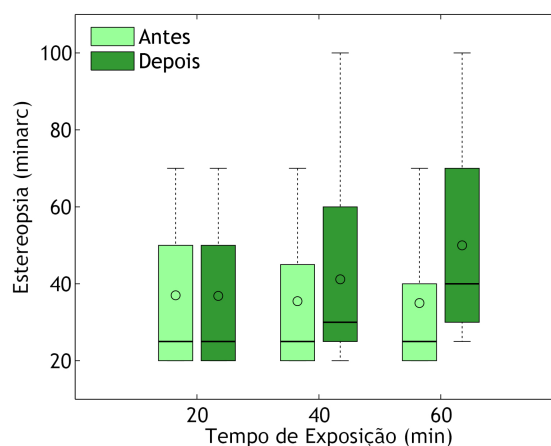


Figura 4.5: Gráfico representativo das variações da estereopsia antes e após da exposição a estímulos estereoscópicos. Os símbolos \circ e $-$ representam a média e a mediana, respetivamente.

ca-se que antes da exposição 3D nas diferentes sessões não existem diferenças estatisticamente significativas ($p_{20-40} = 0.379$, $p_{20-60} = 0.315$, $p_{40-60} = 0.264$), mantendo-se semelhantes

os intervalos de estereopsia. Ao fim de 20 minutos de exposição não existem quaisquer variações neste parâmetro visual ($p = 0.326$). Após 40 e 60 minutos verifica-se um aumento da estereopsia ($p < 0.001$), constatado pelo aumento do valor médio e da mediana. Comparando as medições de todas as sessões após constatam-se resultados semelhantes, sendo $p_{20-40} = 0.076, p_{20-60} < 0.001, p_{40-60} < 0.001$). A variação da estereopsia ao fim de 60 minutos de exposição a este tipo de estímulos é de aproximadamente 30”.

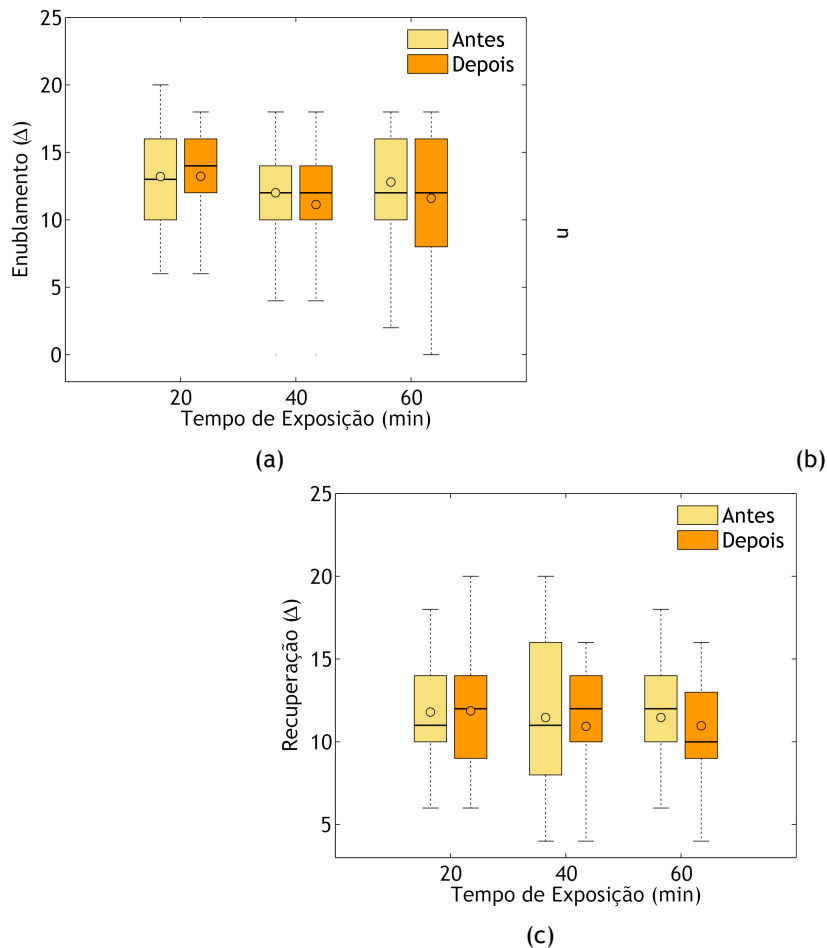


Figura 4.6: Gráficos das reservas fusoriais negativas antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos. Os símbolos \circ e $-$ representam a média e a mediana, respetivamente. (a) Valores de Enublamento, (b) Rotura e (c) Recuperação.

4.4.2 Análise das Vergências Fusoriais Negativas

Tendo em conta que foram medidos os valores de enublamento, rotura e recuperação para a análise das reservas fusoriais, também a análise incidiu nestes três parâmetros como mostra os gráficos da figura 4.6a, 4.6b e 4.6c, respetivamente. O eixo das ordenadas representa em dioptrias prismáticas (Δ) o valor obtido para o enublamento, rotura e recuperação nos diferentes tempos de exposição (eixo das abcissas). A cor laranja claro representa a medição feita antes da exposição estereoscópica, enquanto que a cor laranja escura é referente à medição após a exposição. Observando apenas as medições efetuadas antes de cada exposição, verifica-se que

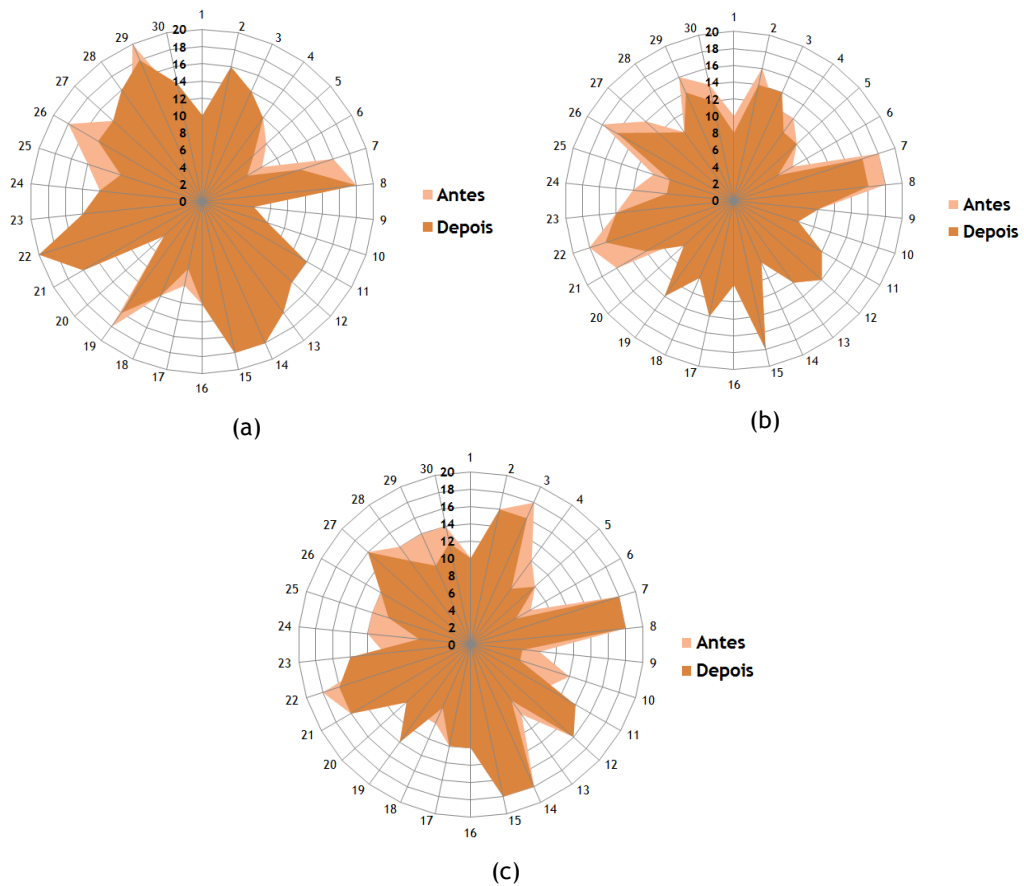


Figura 4.7: Gráficos de superfície dos valores obtidos na divergência antes e após a exposição de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos. As linhas concêntricas, sequencialmente centro-periferia, contém o aumento do valor prismático e cada raio da circunferência representa um participante do estudo.

não existem variações significativas no enublamento, rotura e recuperação. No enublamento comprovado pelo $p_{20-40} = 0.363$, $p_{20-60} = 0.914$ e $p_{40-60} = 0.489$; na rotura por ($p_{20-40} = 0.261$, $p_{20-60} = 0.701$ e $p_{40-60} = 0.352$) e na recuperação por ($p_{20-40} = 0.531$, $p_{20-60} = 0.544$ e $p_{40-60} = 0.100$). Os valores de enublamento após as sessões de 20, 40 e 60 minutos não apresentam variações estatisticamente significativas, $p = 0.738$, $p = 0.061$ e $p = 0.065$ (gráfico da figura 4.6a). Os mesmos resultados foram obtidos para os valores de rotura após as diferentes sessões, tal como demonstrado no gráfico da figura 4.6b, com $p = 0.952$, $p = 0.140$ e $p = 0.072$. Também sem variações estatisticamente significativas após a visualização 3D encontram-se os valores da recuperação, com $p = 0.882$, $p = 0.161$ e $p = 0.105$ na sessão de 20, 40 e 60 minutos, respetivamente (gráfico 4.6c). A análise estatística de todas as sessões após a visualização nos três parâmetros avaliados reforça os resultados obtidos para a variação antes e depois de cada tempo de visualização. No enublamento obteve-se $p_{20-40} = 0.073$, $p_{20-60} = 0.190$ e $p_{40-60} = 0.394$; na rotura $p_{20-40} = 0.0069$, $p_{20-60} = 0.062$ e $p_{40-60} = 0.423$, por fim na recuperação $p_{20-40} = 0.082$, $p_{20-60} = 0.087$ e $p_{40-60} = 0.934$.

Apesar das alterações produzidas nas reservas fusionais negativas não serem significativas, pela análise da divergência (valor de enublamento ou rotura quando o primeiro não se verifica) apre-

sentada nos gráficos da figura 4.7 aparenta uma ligeira tendência para a diminuição ao longo do tempo de exposição estereoscópica.

4.4.3 Análise da Vergências Fusionais Positivas

O eixo das abcissas representa as diferentes sessões 20, 40 e 60 minutos. Os resultados para a convergência são apresentados nos gráficos da figura 4.8, onde o eixo das ordenadas corresponde ao valor do enublamento, rotura e recuperação, gráficos 4.8a, 4.8b e 4.8c, respetivamente. Pela análise das reservas fusionais positivas apresentadas no gráfico da figura 4.8 verifica-se que tal como nas reservas fusionais negativas, os valores medidos antes de cada sessão não são significativos para o enublamento ($p_{20-40} = 0.800$, $p_{20-60} = 0.622$ e $p_{40-60} = 0.469$), rotura ($p_{20-40} = 0.596$, $p_{20-60} = 0.769$ e $p_{40-60} = 0.646$) e para recuperação ($p_{20-40} = 0.405$, $p_{20-60} = 0.346$ e $p_{40-60} = 0.600$).

Após a sessão de 20 minutos, os três parâmetros não têm variações estatisticamente significativas (enublamento - $p = 0.309$, rotura - $p = 0.0495$ e recuperação - $p = 0.945$). Nas sessões de 40 e 60 minutos constata-se o inverso, em todos os parâmetros $p \leq 0.001$. As reservas fusionais positivas diminuem com o aumento do tempo de exposição.

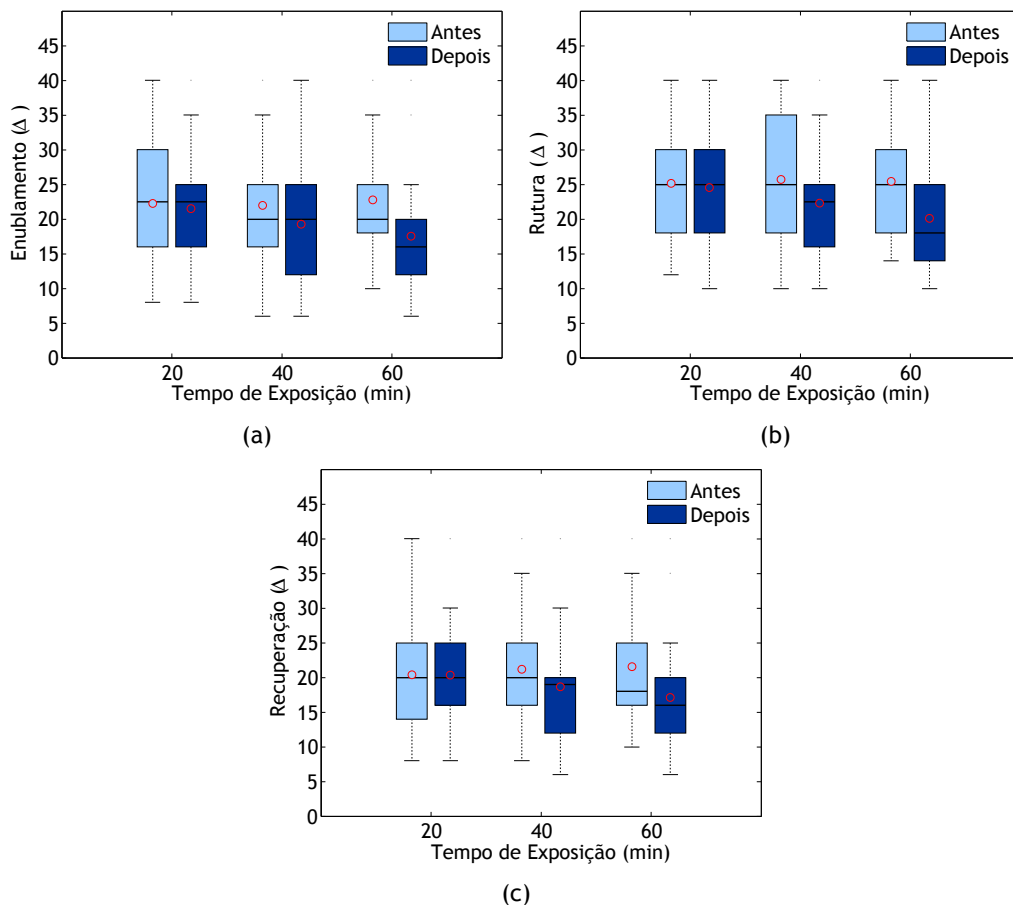


Figura 4.8: Gráficos das reservas fusionais positivas antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos. Os símbolos \circ e $-$ representam a média e a mediana, respetivamente. (a) Valores de Enublamento, (b) Rotura e (c) Recuperação.

Pelos gráficos da figura 4.9, pode analisar-se a variação da convergência nas diferentes sessões. O valor utilizado para a convergência foi o enublamento e só quando este não existiu é que se utilizou o valor de rotura. Com o aumento do tempo de exposição a estímulos estereoscópicos a convergência diminui progressivamente.

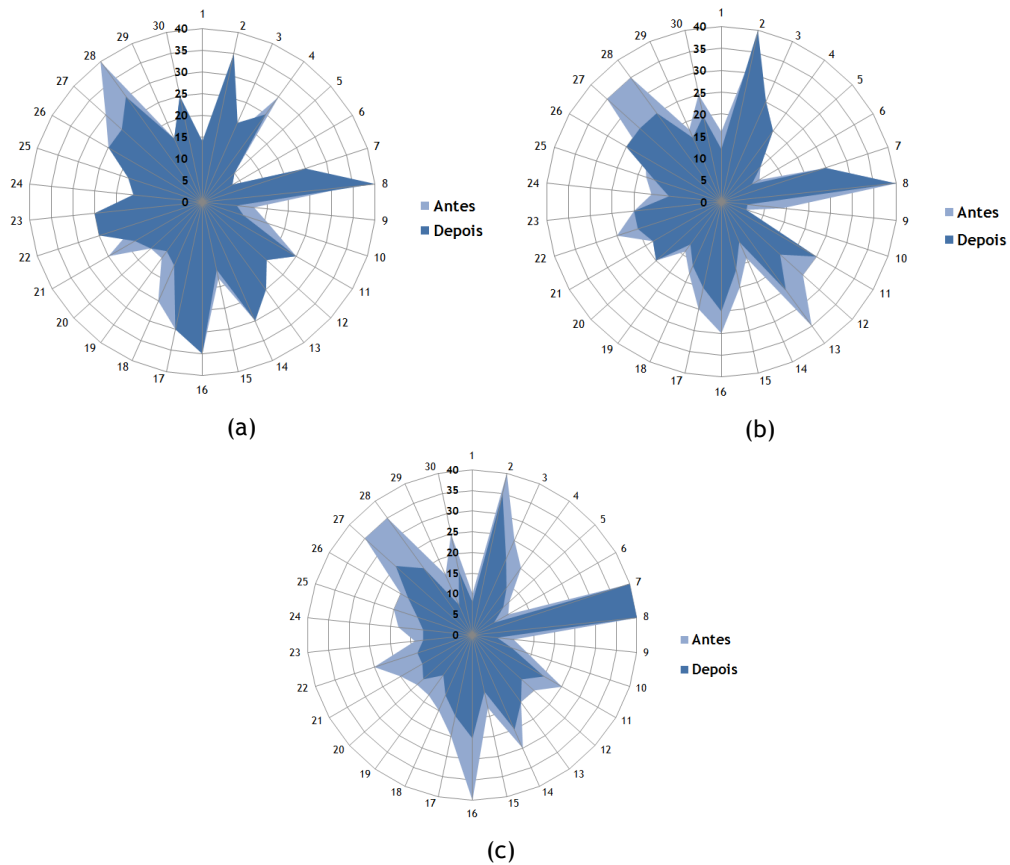


Figura 4.9: Gráficos de superfície dos valores obtidos na convergência antes e após exposição de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos. As linhas concêntricas, sequencialmente centro-periferia, contém o aumento do valor prismático e cada raio da circunferência representa um participante do estudo.

4.4.4 Análise da Heteroforia

A análise gráfica da heteroforia encontra-se na figura 4.10 no qual os valores negativos representam exoforia, os valores positivos a endoforia e zero a ortoforia. Analisando o gráfico verifica-se que a amostra é ligeiramente exofórica, como o esperado para uma população normal (1). As medições realizadas antes das diferentes exposições não apresentaram variações significativas ($p_{20-40} = 0.522$, $p_{20-60} = 0.326$ e $p_{40-60} = 0.769$). Os resultados obtidos após a exposição de 20 e 40 minutos também não diferiram significativamente, $p = 0.161$ e $p = 0.277$ respetivamente. Ao fim da sessão de 60 minutos verificou-se uma variação estatisticamente significativa ($p \leq 0.001$) na heteroforia. Existe uma diminuição do valor absoluto da heteroforia na totalidade da amostra, tornando-se mais exofórica com o aumento do tempo de exposição, como apresentado na figura 4.11.

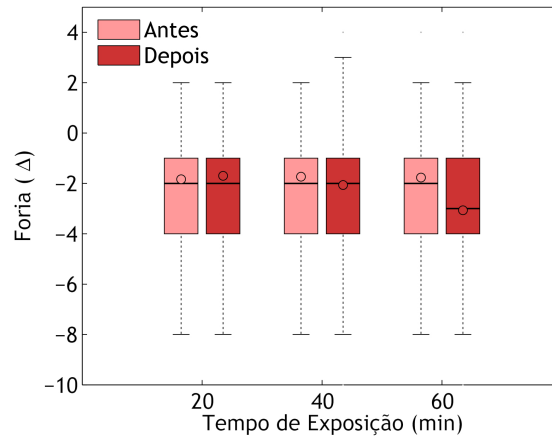


Figura 4.10: Gráfico das variações da heteroforia antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos. Considere-se com valor positivo a endoforia, valor negativo a exoforia, os símbolos \circ e $-$ como a média e a mediana, respetivamente.

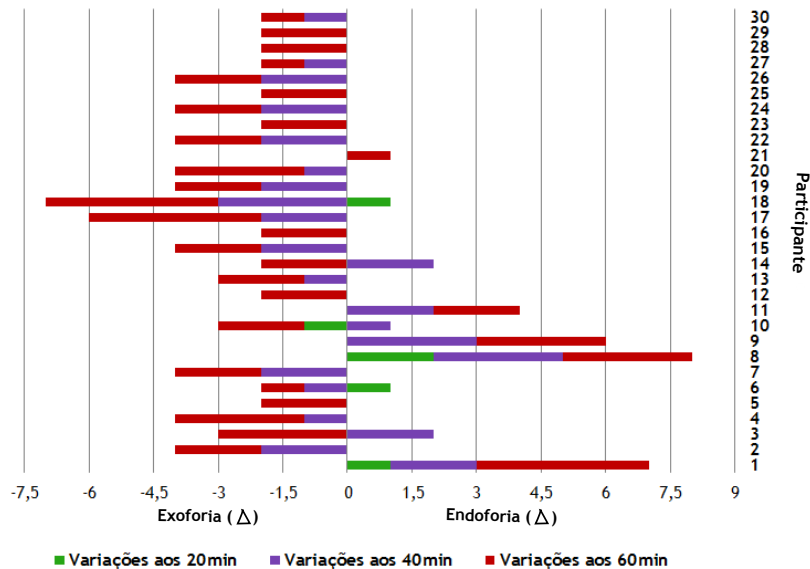


Figura 4.11: Gráfico das variações da heteroforia em cada participante nas diferentes sessões. Considere-se a exoforia com valor negativo e a endoforia com valor positivo.

4.4.5 Análise da Disparidade de Fixação

Os resultados obtidos para a disparidade de fixação encontram-se no gráfico da figura 4.12. A disparidade de fixação exo é considerada com valor negativo e a endoforia com valor positivo.

Analisando as medições antes de cada sessão constata-se que não há variações significativas entre elas, $p_{20-40} = 0.609$, $p_{20-60} = 0.072$ e $p_{40-60} = 0.157$. Após a exposição de 20 e 40 minutos também não se verificou alterações estatisticamente significativas ($p = 0.471$ e $p = 696$, respetivamente). Todavia, ao fim de 60 minutos observou-se uma tendência para a disparidade de fixação exo ($p < 0.001$), também demonstrado na figura 4.13.

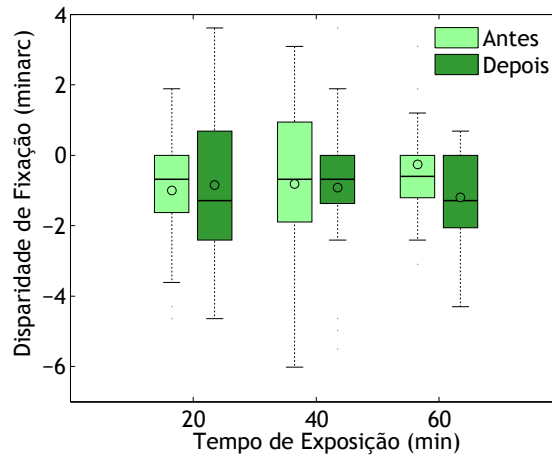


Figura 4.12: Gráfico das variações da disparidade de fixação antes e após a exposição a estímulos estereoscópicos. Considere-se a disparidade de fixação exo com sinal negativo e a disparidade de fixação endo com sinal positivo, os símbolos \circ e $-$ como a média e a mediana, respetivamente.

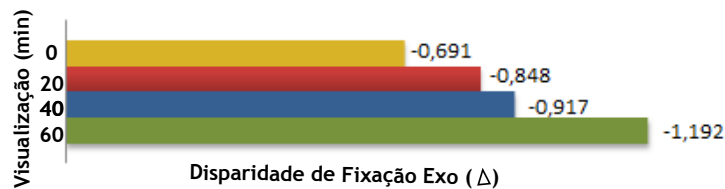


Figura 4.13: Gráfico da disparidade de fixação média antes e após as diferentes sessões.

4.4.5.1 Análise da Curva de Vergências Forçadas

A Curva de Vergências Forçadas (CVF) sendo uma função de estímulo-resposta, a cada estímulo por disparidade está associada uma determinada resposta do mecanismo de vergência. A CVF representa a direção e magnitude de disparidade exercida em diferentes níveis de *stress* vergencial (convergente e divergente). Desse modo, os resultados foram obtidos por pontos (estímulo-resposta) para cada participante nos diferentes tempos de exposição. Considere-se as dioptrias prismáticas com valor negativo às medições obtidas com prismas de base interna, enquanto que os valores positivos dizem respeito às medições com prismas de base externa. A disparidade de fixação apresentada no eixo das ordenadas na parte de valores positivos representa a disparidade de fixação Endo, sendo que na parte negativa está representada a disparidade de fixação Exo.

Inicialmente foi encontrada a melhor curva de ajuste para cada individuo nas diferentes sessões. Verificou-se que maioritariamente o melhor ajuste para as respostas obtidas, é a função polinomial cúbica. Todavia, não foi possível fazer uma análise global simplista deste parâmetro, dado que as curvas obtidas são distintas de participante para participante. Um exemplo das curvas obtidas consta nos gráficos da figura A.3.27 que representa os resultados do participante 27 nos diferentes de tempos exposição. Os gráficos dos restantes participantes encontram-se no anexo A.3.

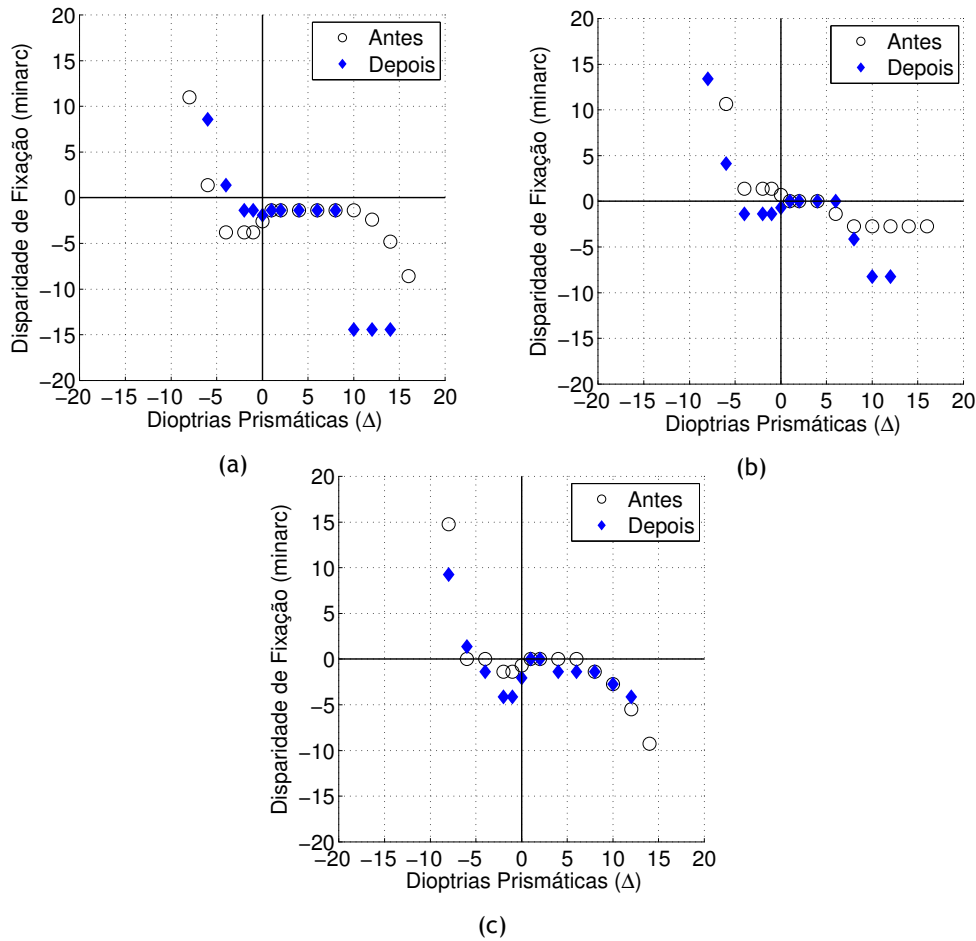


Figura 4.14: Curva de Vergências Forçadas do participante 27 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

Utilizou-se uma abordagem com base no erro quadrático médio (*EQM*), expresso pelo somatório do quociente entre o quadrado das diferenças da resposta e do estímulo correspondente $((x_i - y_i)^2)$; com o número de pontos (estímulo-resposta) tidos em conta (n), tal como apresentado na equação 4.1:

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2; \quad (4.1)$$

O n usado na expressão não foi igual para todos os participantes devido às diferentes reservas fusionais de cada indivíduo após cada sessão, ou seja, apenas foram considerados estímulo-resposta existentes nas CVF's antes e após a exposição. Foi também considerado como referência, a CVF medida antes das respetivas sessões. Por isso, o *EQM* será tanto menor quanto menor for a diferença das respostas após a exposição comparada com sua referência. Os resultados são descritos na tabela 4.2.

Feita uma análise global do *EQM* das CVF em cada sessão dos participantes, constata-se que não existe um padrão de comportamento para a totalidade da amostra. Todavia, uma análise mais pormenorizada, na qual a amostra foi dividida em dois grupos, um com erros baixos e

Tabela 4.2: Erro Quadrático Médio obtido para cada participante nas diferentes sessões.

Participante	EMQ			Participante	EMQ		
	20	40	60		20	40	60
1	10,523	119,039	4,649	16	15,702	14,858	5,289
2	60,224	4,501	22,178	17	60,587	19,037	65,580
3	48,457	3,664	3,584	18	5,673	9,303	206,417
4	1,066	15,265	3,509	19	1,280	8,782	2,740
5	2,260	4,521	40,154	20	2,878	12,626	1,085
6	4,622	12,129	5,227	21	16,985	5,836	29,922
7	125,961	28,596	19,858	22	4,008	5,180	8,534
8	4,944	4,064	13,872	23	37,104	6,376	11,219
9	12,532	22,036	10,020	24	443,589	49,550	100,918
10	15,464	30,709	61,686	25	201,858	118,158	16,998
11	2,698	2,583	13,492	26	2,367	8,288	8,524
12	1,182	14,856	1,169	27	38,375	17,246	4,364
13	58,021	5,082	1,492	28	7,885	10,182	7,300
14	0,095	1,471	1,389	29	132,962	90,689	20,565
15	1,539	3,675	4,550	30	1,549	9,084	40,332

outro com erros elevados pode-se constatar alguns casos semelhantes, tal como apresentado nas tabelas 4.4 e 4.3. Como para o *EQM* não existem valores *standard* para classificar um erro, considerou-se como valor de referência o valor médio de todos os *EQM* obtidos, $EQM = 30$.

Em suma, os resultados obtidos neste parâmetro de estudo são inconclusivos, dado a diversidade de situações encontradas. Para se avaliar de forma eficiente as CVF, seria necessário aumentar o tamanho da amostra e verificar se realmente existe a predominância de algum comportamento. Acrescentando também o aumento da sensibilidade do teste de forma a evitar a transição brusca ("saltos") da deslocação das barras até ao alinhamento.

Tabela 4.3: Erro Quadrático Médio grande em pelo menos duas sessões.

	Participante	Sessão			Observações
		20min	40min	60min	
EMQ Grande	10	15,464	30,709	61,686	Quanto maior tempo, maior erro
	7	125,961	28,596	19,858	
	16	15,702	14,858	5,289	
	25	201,858	118,158	16,998	Quanto maior tempo, menor erro
	27	38,375	17,246	4,364	
	29	132,962	90,689	20,565	
	2	60,224	4,501	22,178	
	17	60,587	19,037	65,580	Diferença inferior na sessão 40min
	21	16,985	5,836	29,922	
	24	443,589	49,550	100,918	

Tabela 4.4: Erro Quadrático Médio pequeno em pelo menos duas sessões.

	Participante	Sessão			Observações
		20min	40min	60min	
EMQ Pequeno	15	1,539	3,675	4,550	Quanto maior tempo, maior erro
	22	4,008	5,180	8,534	
	14	0,095	1,471	1,389	Semelhança nas sessões 20,40 e 60 min
	8	4,944	4,064	13,87	Semelhança nas sessões 20 e 40min
	11	2,698	2,583	13,492	
	3	48,457	3,664	3,584	Semelhança nas sessões 40 e 60min
	26	2,367	8,288	8,524	
	12	1,182	14,856	1,169	Semelhança nas sessões 20 e 60min
	28	7,885	10,182	7,300	
	13	58,021	5,082	1,492	Diferença superior na sessão 20min
	23	37,104	6,376	11,219	
	1	10,523	119,039	4,649	Diferença superior na sessão 40min
	4	1,066	15,265	3,509	
	6	4,622	12,129	5,227	
	9	12,532	22,036	10,020	
	19	1,280	8,782	2,740	
20	2,878	12,626	1,085		
5	2,260	4,521	40,154	Diferença superior na sessão 60min	
18	5,673	9,303	206,417		
30	1,549	9,084	40,332		

4.5 Discussão

Com a realização deste estudo verifica-se que a exposição prolongada a estímulos estereoscópicos produz alterações visuais, nomeadamente nos sistemas motor e sensorial. É difícil identificar um mecanismo quando o problema é associado aos sistemas de controlo motor ou sensorial. As mudanças objetivas e subjetivas visuais associadas à técnica 3D podem não ser necessariamente um problema. Para que as imagens possam ser vistas nítidas e simples, é imprescindível que alguns parâmetros visuais alterem o seu estado, ou seja, o sistema visual tem de se adaptar à nova situação. O problema ocorre quando a variação dos parâmetros visuais são significativos e/ou o observador relata sintomas associados a esta tarefa. Portanto as mudanças objetivas podem resultar da adaptação ou da fadiga associada à visualização de estímulos estereoscópicos, enquanto que as mudanças subjetivas estão relacionadas com o aumento/diminuição na prevalência ou severidade dos vários sintomas.

A análise da estereopsia após a exposição estereoscópica revela que esta é diretamente proporcional ao tempo de exposição, ou seja, quanto maior é duração da exposição, maior é a degradação da estereopsia, que em termos numéricos se traduz no aumento do valor numérico.

Torna-se uma alteração estatisticamente significativa ($p \leq 0.001$) após 40 minutos de visualização com este tipo de estímulos. Rutstein considera a estereopsia como um excelente teste de triagem para a detecção de problemas em muitos processos visuais (96), daí também ser denominada por o *barómetro da binocularidade* (97). Quando um paciente tem a estereopsia normal, a probabilidade de ter algum problema grave no sistema oculomotor e refrativo é muito baixa. Quando existe algum problema no sistema visual, a capacidade estereoscópica é afetada (25). Estes são os resultados que se obtiveram no estudo.

Todos os participantes tem estereopsia normal e com o passar do tempo este parâmetro vai-se deteriorando. Se a capacidade estereoscópica não é boa, ocorre a disfunção sequencial dos processos binoculares (98). Um exemplo de um processo que afeta também a estereopsia é o erro refrativo descompensado. Este diminui a acuidade visual, o que por sua vez, gera problemas na fusão motora e sensorial. Por outro lado, pacientes com estereopsia inexistente ou reduzida não implica que tenham necessariamente problemas no sistema binocular.

Kim et al (99), num estudo com 130 participantes com estereopsia anormal (estrabismos, ambliopia e anisometropia), verificou que após visualização 3D, a percepção de profundidade diminui. E os sujeitos com melhor estereopsia apresentaram também maior desconforto ocular e sistémico. Este fato poderá estar com a tentativa, ainda existente, de fusão, nesses casos.

Ao considerarmos a estereopsia como o patamar privilegiado da binocularidade, a disparidade de fixação é o fator de controlo mais próximo e direto. Qualquer circunstância que aumente a disparidade de fixação irá aumentar também o limiar estereoscópico (piorando a estereopsia), o que leva à diminuição da qualidade de percepção estereoscópica (25). A disparidade de fixação na clínica não é fácil de se determinar. Adicionando o fato de ter sido avaliada com um software desenvolvido, encontraram-se algumas limitações, sendo a mais preponderante a sensibilidade do teste, em que o detalhe mínimo possível era 1 pixel (0.265 mm) e obrigava a deslocação ser feita de modo discreto. Visualmente, a barra "salta" de posição. Contudo, a disparidade de fixação com o aumento do tempo de exposição aumentou no sentido exo ao fim de 60 minutos ($p < 0.001$), tal como seria de esperar. Segundo Yekta, quando o sistema visual é sujeito a uma tarefa em visão próxima (entre 20 até 100cm) durante algum tempo, a disparidade de fixação exo tende a aumentar (100, 101).

Para a curva de vergências forçadas, os resultados obtidos não são conclusivos. Verificou-se que inicialmente, os participantes não perceberam corretamente qual o objetivo do teste, nomeadamente com o que se pretendia em termos de "alinhamento das barras". Segundo Ogle, as Curvas de Vergências Forçadas, apresentam dois pontos problemáticos. O primeiro é que a confiança do teste depende da correspondência retiniana (20, 102, 103). Em sujeitos normais, a posição subjetiva (identificada pelo observador) e a posição do olho (objetiva), nem sempre são correspondentes. Isto verifica-se, por exemplo, durante a fusão de um esteograma e durante *stress* vergencial nos quais a correspondência retiniana muda (104). O segundo problema pren-

de-se com a posição do olho, que pode ser diferente nas condições do teste (condição artificial) das condições de visualização natural. A restrição de contornos nas áreas periféricas diminui a eficiência da fusão e permite que os olhos se desviem da ortoposição (105). Este fato, pode ser explicado através das áreas de Panum, uma vez que são mais largas na periferia do que no centro (28). Também é importante de referir que as linhas de nonius (monoculares) competem com o fundo e acabam por suprimir tudo o que está em volta. Portanto, os testes com âncora central e estímulos monoculares nas áreas paracentrais demonstram ter valores mais pequenos e menos variáveis (106). No programa desenvolvido, continha um quadrado como estímulo periférico, todavia também existia alguma informação lateral (ver 4.3), o que poderá ter proporcionado o efeito contrário, tornando-se em elementos distrativos.

Quanto aos valores de heteroforia, verificou-se que existiram variações significativas ($p = 0.001$) no sentido exofórico após 60 minutos de exposição. Karpicka e Howarth com um protocolo semelhante, ou seja, através da medição da heteroforia antes e após duas sessões 2D e 3D, chegaram à conclusão que existem alterações significativas após 20 minutos dos indivíduos terem iniciado o jogo com paralaxe positiva. Com o estímulo bidimensional o mesmo não se constatou, pelo que a diferença das duas condições revelou-se significativa. Apesar disso, não encontraram relação direta entre esta alteração e o desconforto visual, uma vez que não existiram sintomas (107). A investigação destes autores confirmou também que a paralaxe positiva induz adaptação heterofórica, no sentido da exoforia, devido à estimulação constante da disparidade retiniana homónima. Também neste trabalho se verificou uma tendência exofórica com o mesmo tipo de estímulo estereoscópico. Ukai (78) afirma também que a variação da heteroforia está diretamente associada ao conflito acomodação-vergência, através da discrepância entre o estímulo acomodativo e vergencial.

Relativamente aos valores obtidos das reservas fusionais positivas e negativas, estes são coerentes com a literatura (46, 108, 109). Ao fim de 40 minutos de exposição 3D constataram-se variações estatisticamente significativas apenas nas reservas fusionais positivas. Como o sistema vergencial comanda a resposta proximal, ocorrem alterações do estado vergencial e acomodativo (110-112). Assim sendo, durante uma exposição estereoscópica prolongada (<1h) resultam mudanças adaptativas na ligação acomodação-vergência, exigindo assim o movimento do olho ao longo do tempo (113). Ukwade (114) verifica que a velocidade vergencial, dentro das áreas de Panum, não é um fator essencial que limita a percepção estereoscópica. Emoto (46), porém não verifica variações na relação AC/A ao fim de 60 minutos de exposição de imagens 2D e 3D. Seria de esperar que a relação AC/A se altera-se, embora temporariamente com a variação das condições de visualização (86). O autor, no mesmo estudo, sugere contudo que as reservas fusionais podem ser um indicador da fadiga visual (46), dado que obteve variações significativas na amplitude fusional dos participantes após a exposição estereoscópica.

Fazendo a observação geral do estudo têm-se as seguintes conclusões:

1. Paralaxe Positiva;
2. Tendência para a Disparidade de Fixação Exo;
3. Tendência para a Exoforia;
4. Diminuição das Reservas Fusionalis Positivas;
5. Degradação da Estereopsia.

A esquema-resumo destes resultados, encontra-se no diagrama da figura 4.15. O estímulo utilizado neste estudo - paralaxe positiva, incita a disparidade retiniana homónima, aumentando a disparidade de fixação Exo, ocorrendo deste modo a adaptação exofórica (107). Em situação exofórica constata-se a redução das reservas fusionalis positivas para as distâncias de longe e perto, uma vez que há dificuldade de convergência (93). Por fim como consequência de todas estas alterações acontece a degradação da estereopsia. Este raciocínio seria validado com uma montagem experimental em que fossem avaliados os mesmos parâmetros com paralaxe negativa de conteúdo 3D. Esperar-se-ia que existisse da mesma forma a degradação da estereopsia, contudo tendência não só para a disparidade de fixação endo mas também para a endoforia e a diminuição das reservas fusionalis negativas.

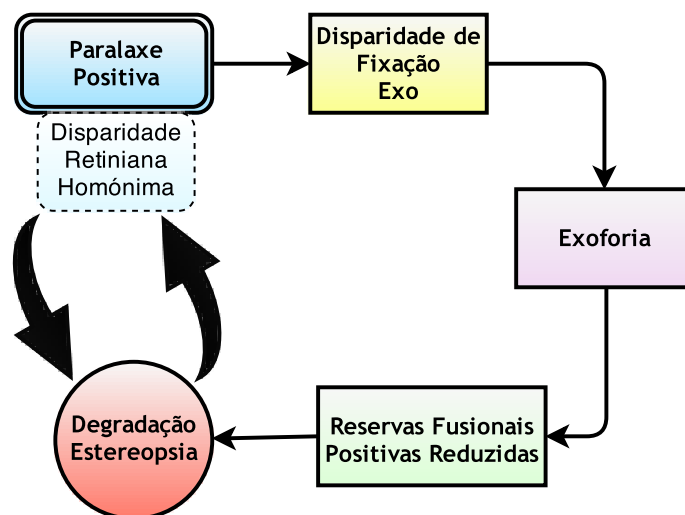


Figura 4.15: Diagrama demonstrativo dos resultados obtidos no estudo.

4.6 Conclusão

Este capítulo apresenta pormenorizadamente a metodologia experimental seguida no estudo, bem como os resultados obtidos e a discussão do mesmos.

Os participantes foram expostos a um filme com paralaxe positiva. Antes e após três exposições estereoscópicas, com diferentes tempos 20, 40 e 60 minutos, foram medidos cinco parâmetros visuais, nomeadamente a estereopsia, disparidade de fixação, foria, vergências fusionalis negativas e vergências fusionalis positivas.

Para a totalidade da amostra, a estereopsia revela-se diretamente proporcional ao tempo de exposição. Quanto às reservas fusionalis negativas não apresentam diferenças significativas ao

longo das sessões estereoscópicas. Ao contrário das reservas fusionais negativas, com o aumento do tempo de exposição as reservas fusionais positivas sofrem uma diminuição estatisticamente significativa. Na heteroforia e disparidade de fixação constatou-se uma tendência significativa para o sentido exo, na generalidade da amostra.

Fazendo uma analogia entre as lentes prismáticas e a técnica 3D, pode dizer-se que enquanto as mudanças prismáticas são fixadas pela magnitude do prisma utilizado, a disparidade apresentada num ecrã pode ser variável e ter diferentes direções em diferentes períodos durante a visualização 3D. Dessa forma, pode-se esperar variações em diferentes parâmetros de acordo com o tipo de disparidade implícita.

Neste estudo, o estímulo utilizado foi a paralaxe positiva, que estimula a disparidade retiniana homónima. Com a variação do tempo de exposição, a disparidade de fixação torna-se mais exo, levando a heteroforia a deslocar-se na mesma direção. Ao fim de um longo período de tempo a capacidade de convergência é prejudicada, verificando-se uma diminuição das vergências fusionais positivas. Todas estas variações no sistema binocular, são acompanhadas por uma alteração na capacidade de perceção estereoscópica, comprovada pela degradação da estereopsia.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

"Uma coisa é certa, que é o facto de não podermos dar nada por certo; sendo assim, não é certo que não podemos dar nada por certo."

Samuel Butler

Este capítulo está dividido em duas secções. A primeira apresenta as conclusões do estudo realizado para dissertação de mestrado. A segunda secção contém algumas sugestões relacionadas com o trabalho desenvolvido que poderão ser exploradas futuramente.

5.1 Conclusões

O trabalho de investigação descrito nesta dissertação aborda as alterações visuais associadas à tecnologia 3D. Apesar desta não ser uma tecnologia recente, a indústria 3D está cada vez mais presente na vida do consumidor. Os equipamentos eletrónicos como telemóveis, televisões e jogos já contemplam esta funcionalidade ou aplicações para o uso do 3D. Com este aumento de interesse na utilização desta tecnologia existem alguns sinais e sintomas associados, como dor de cabeça, visão desfocada, desconforto e fadiga visual. A este conjunto de sinais e sintomas, Maino atribuiu o termo síndrome de visão 3D.

O desconforto e a fadiga visual têm sido os parâmetros mais estudados para avaliar subjetiva e objetivamente, as implicações associadas à visualização de estímulos estereoscópicos. A avaliação subjetiva é determinada com a utilização de questionários, enquanto que a avaliação objetiva é realizada através da medição objetiva de parâmetros visuais como acomodação, diâmetro pupilar e amplitude fusional. A combinação dos dois métodos de avaliação permitem uma avaliação mais robusta, dado que as alterações nos parâmetros visuais fazem-se acompanhar da avaliação subjetiva. As principais causas da fadiga e desconforto visual apresentadas na literatura dividem-se em dois grupos. Um deles associado diretamente com o conteúdo 3D, o outro relacionado com o conflito acomodação-vergência.

Os problemas no conteúdo da imagem estereoscópica dizem respeito às propriedades do ecrã e aos artefatos gerados nas diferentes fases da criação da imagem estereoscópica. A qualidade da imagem é afetada pelo tamanho do ecrã. Se as características de visualização não forem as corretas para o qual a imagem foi criada, ocorrem representações pouco reais. Com a diminuição da qualidade, estão também associados os artefatos inerentes às fases da criação do conteúdo 3D, nomeadamente a distorção angular, curvatura de campo, efeito cartolina, distor-

ção de Shear, *crosstalk*, inversão de imagem e efeito de barramento.

Até 2011, o conflito acomodação-vergência foi considerado a principal causa de desconforto e fadiga visual associada à exposição de estímulos 3D. Os autores acreditavam que as distâncias vergencial e focal eram diferentes, contrariamente ao que acontece em condições normais. Contudo, atualmente sabe-se que as diferenças entre a acomodação e a vergência são muito pequenas durante a visualização estereoscópica, tal como ocorre na visualização 2D.

Face a estas constatações, a proposta de trabalho nesta dissertação centra-se na possível verificação de alterações a nível visual após exposição estereoscópica com paralaxe positiva. Em três sessões com tempos distintos 20, 40 e 60 minutos foram analisados parâmetros da visão motora e sensorial, tais como: reservas fusionais positiva e negativa, heteroforia, disparidade de fixação e estereopsia. Após a realização da experiência, verificou-se que com o aumento do tempo de exposição alguns parâmetros apresentam alterações estatisticamente significativas. Contudo, as variações não produzem obrigatoriamente efeitos negativos. Há a necessidade do sistema visual se adaptar à tarefa proposta. Ainda assim, tornam-se relevantes quando se fazem acompanhar de sintomatologia e/ou de variações significativas.

Esta conclusão aplica-se à estereopsia que após 1 hora de visualização aumenta significativamente. Considerada como "barómetro da binocularidade", a estereopsia é um parâmetro fundamental na avaliação da visão binocular. Na presença de um problema binocular, a estereopsia encontra-se degradada, levando a uma menor capacidade estereoscópica.

Atendendo à classificação de patamar privilegiado, a estereopsia tem relação direta com a disparidade de fixação. Esta representa o fator de controlo mais próximo da estereopsia. Quando a disparidade de fixação aumenta, o valor da estereopsia também aumenta, o que gera uma menor qualidade de perceção estereoscópica. No estudo, essa situação é verificada. Apesar de se verificar uma diminuição da capacidade estereoscópica, a disparidade de fixação também apresenta uma tendência significativa para a disparidade de fixação exo. Esta tendência é esperada sempre que um indivíduo realize uma tarefa em visão próxima.

As vergências forçadas são o único parâmetro para o qual os resultados são inconclusivos. Não há uma tendência para qualquer valor ou tipo de comportamento. A justificação passa, provavelmente, pelo método escolhido para a sua medição. Foi utilizado um software desenvolvido para o estudo cuja sensibilidade de teste é limitada a 1 pixel, tornando brusco o deslocamento das barras na transição das lentes prismáticas. O programa contém ainda alguma informação periférica o que poderá ser um elemento distrativo.

Na heteroforia os resultados são semelhantes aos da disparidade de fixação. Verificam-se variações estatisticamente significativas, na tendência para a direção exofórica. Um estudo recente (107) comprova que a paralaxe positiva induz uma adaptação heterofórica, no sentido da exoforia, devido à constante estimulação da disparidade retiniana homónima. A alteração da heteroforia pode estar associada com a discrepância entre os estímulos acomodativo e vergencial e com a variação das reservas fusionais.

Uma vez que a variação de um objeto no espaço, produz alterações no sistema vergencial e acomodativo, em exposições prolongadas podem ocorrer alterações adaptativas devido à constante alteração da posição espacial da imagem estereoscópica. Como tal, neste estudo, as reservas fusionais positivas variam significativamente a partir de 40 minutos de exposição. As reservas fusionais negativas mantêm-se inalteradas. Este fato, pode dever-se ao tipo de disparidade utilizada.

Na exposição com paralaxe positiva, a imagem estereoscópica é colocada para trás do plano de apresentação. Deste modo, é também estimulada a disparidade retiniana homônima, porque a imagem incide em pontos nasais da retina. A exposição constante a este tipo de estímulo aumenta a disparidade de fixação exo e a permanência do eixo visual nesta posição (para fora), incitando uma adaptação exofórica. Nesta condição, as reservas fusionais positivas encontram-se diminuídas, devido à pouca capacidade de convergência dos eixos visuais. Todas estas alterações podem provocar a degradação da estereopsia e da capacidade estereoscópica.

Em suma, a estereopsia e a reserva fusional positiva variam significativamente após exposição estereoscópica prolongada. Com uma tendência significativa para a direção exo têm-se a heteroforia e a disparidade de fixação. Os objetivos propostos foram cumpridos e são relevantes para a área em estudo, dado que existem parâmetros visuais que ainda não foram explorados com a visualização estereoscópica.

5.2 Trabalho Futuro

Muitos são os estudos futuros que poderiam surgir no âmbito desta temática. Contudo, numa primeira fase três linhas de investigação podem ser propostas.

De modo a validar o raciocínio apresentado anteriormente de que a utilização de paralaxe positiva desencadeia alterações vergenciais no sentido exo, pode sugerir-se como trabalho futuro, a investigação dos efeitos da visualização de estímulos 3D com paralaxe negativa.

Como não foram considerados problemas binoculares não estrábicos no estudo, poderia aplicar-se a mesma metodologia nestes casos e verificar quais as alterações visuais obtidas.

Seria também interessante complementar estes estudos com a avaliação subjetiva do conteúdo estereoscópico. Como este tipo de avaliação requer a realização imediata à exposição, teria de ser feita independentemente dos testes objetivos, através de um outro procedimento experimental.

Bibliografia

1. Benjamin WJ. Borish's Clinical Refraction. 2 ed. China: Elsevier; 2006. 6, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 57
2. Rosenfield M, Logan N. Optometry: Science, Techniques and Clinical Management. 2 ed. London: Elsevier; 2009. 7
3. Manning ML, Finlay DC, Neill RA, Frost BG. Detection threshold differences to crossed and uncrossed disparity. *Vision Res.* 1987;27:1683-86. 7
4. von Noorden GK, Campos EC. Binocular Vision and Ocular Motility. 5 ed. United States of America: Mosby; 2002. 8, 9, 12, 18, 20, 23
5. Erkelens CJ, Collewijn H. Eye movements and stereopsis during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Res.* 1985;25:1689-1700. 8
6. Lambooi M, Ijsselstein W. Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *J Imaging Sci Technol.* 2009;53 (3):030201-14. 11, 33
7. Julesz B. Binocular depth perception of computer-generated patterns. *Bell Syst Tech J.* 1960;39:1125-1162. 11
8. Ogle KN. Disparity limits of stereopsis. *AMA Archs Ophthal.* 1952;48:50-60. 11
9. Zaroff CM, Knutelska M, Frumkes TE. Variation in stereoacuity: normative description, fixation disparity, and the roles of aging and gender. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2003;44:891-900. 11
10. Kasthurirangan S, Glasser A. Influence of amplitude and starting point on accommodative dynamics in humans. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2005;46:3463-72. 14
11. Rosenfield, Ciuffreda KJ, Hung GK, Gilmartin B. Tonic accommodation: a review I. Basic aspects. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1993;13:266-284. 15
12. Ciuffreda KJ, Wang B, Wong D. Foveal and near retinal peripheral contribution to the human depth-of-focus. *Vision Res.* 2005;45:2650-58. 16
13. Wang B, Ciuffreda KJ. Depth-of-focus of the human eye in the near retinal periphery. *Vision Res.* 2004;44:1115-1125. 16
14. Schor CM, Alexander J, Cormack L, Stevenson S. Negative feedback control model of proximal convergence and accommodation. *Ophthal Physiol Opt.* 1992;12:307-318. 18
15. Rosenfield M, Ciuffreda KJ, Hung GK. The linearity of proximally induced accommodation and vergence. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1991;32:2985-91. 18
16. Lambooi M, Ijsselstein W. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review. *J Imaging Sci Technol.* 2009;53:030201-14. 19

17. Fincham EF. Accommodation and convergence in the absence of retinal images. *Vision Res.* 1962;1:425-440. 19
18. Rosenfield M, Ciuffreda KJ, Hung GK, Gilmartin B. Tonic accommodation: a review. *Ophthal Physiol Opt.* 1992;13:266-284. 20
19. Reading RW. Comparison of two fixation disparity determinations. *Optom Vis Sci.* 1989;66:612-615. 20
20. Fogt N, Jones R. Comparison of fixation disparity obtained by objective and subjective methods. *Vision Res.* 1998;38:411-421. 20, 63
21. London R, Crelier RS. Fixation disparity analysis: Sensory and motor approaches. *Optometry.* 2006;77:59-608. 21, 22
22. Shor CM. The influence of rapid prism adaptation upon fixation disparity. *Vision Res.* 1979;19:757-765. 21
23. Sheedy JE, Saladin JJ. Association of symptoms with measures of oculomotor deficiencies. *Am J Optom Physiol Opt.* 1978;55:670-676. 21, 26, 33
24. Saladin JJ. Effects of heterophoria on stereopsis. *Optom Vis Sci.* 1995;72:487-92. 23, 24
25. Saladin JJ. Stereopsis from a performance perspective. *Optom Vis Sci.* 2005;82:186-205. 24, 63
26. Peli E. The Visual Effects of Head-Mounted Display (HMD) are not Distinguishable from those of Desk-Top Computer Display. *Vision Res.* 1998;38:2053-66. 24
27. Emoto M, Niida T, Okana F. Repetead Vergence Adaptation Causes the Decline of Vsual Functions in Watching Stereoscopic Television. *J Disp Technol.* 2005;1:328-340. 24
28. Shibata T, Kim J, Hoffman DM, Banks MS. The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *J Vis.* 2011;11(8):1-29. 25, 26, 31, 36, 42, 43, 64
29. Shippman S, Cohen KR. Relationship of heterophoria to stereopsis. *Arch Ophthalmol.* 1983;101:609-10. 26
30. Evans BJW. *Pickwell's Binocular Vision Anomalies.* 5th ed. Elsevier; 2007. 27
31. Javidi B, Okano F, Son JY. *Three-Dimensional Imaging, Visualization and Displays.* Springer; 2009. 29
32. Howard IP, Rogers BJ. *Binocular Vision and Stereopsis.* Oxford University Press; 1995. 30
33. Produção de filmes 3D ao longo das décadas;. [Acedido a 3 Fevereiro 2014]. Available from: http://www.pwc.com/gx/en/entertainment-media/pdf/Eye_Wide_Open_3D_Tipping_Points.pdf. 31

34. Maino DM, Chase C. Asthenopia: a technology induced visual impairment. *Review of Optometry*. 2011;148:28-35. 32
35. Maino DM. You can help your patients see 3-D. *Review of Optometry*. 2011;148:54-63. 32
36. Ding J, Levi DM. Recovery of stereopsis through perceptual learning in human adults with abnormal binocular vision. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2011;108:733-741. 32, 33
37. Levi DM, Polat U, Hu YS. Improvement in Vernier acuity in adults with amblyopia. Practice makes better. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1997;38:1493-1510. 32
38. Li RW, Levi DM. Characterizing the mechanisms of improvement for position discrimination in adult amblyopia. *J Vis*. 2004;4:476-487.
39. Zhou Y. Perceptual learning improves contrast sensitivity and visual acuity in adults with anisometric amblyopia. *Vision Res*. 2006;46:739-750. 32
40. Julesz B. Stereopsis and binocular rivalry of contours. *J Opt Soc Am*. 1963;53:994-999. 33
41. Wilcox LM. The role of binocular stereopsis in monoptic depth perception. *Vision Res*. 2007;47:2367-2377. 33
42. Lambooi M, IJsselsteijn W, Heynderickx I. Visual Discomfort in Stereoscopic Displays: A Review. In: Andrew J Woods JOMMTBIEM Neil A Dodgson, editor. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV*. vol. 6490. San Jose, California, USA; 2007. . 33, 42
43. Kennedy RS, Lilienthal MG, Berbaum KS, Baltzley DR, McCauley ME. Simulator Sickness in U.S. Navy Flight Simulators. *Aviat Space Environ Med*. 1989;60:10-16. 34, 35
44. Lambooi M, Fortuin MF, IJsselsteijn WA, Heynderickx I. Reading performance as screening tool for visual complaints from stereoscopic content. *Displays*. 2012;33:84-90. 34
45. Kim D, Sohn K. Visual Fatigue Prediction for Stereoscopic Image. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*. 2011;21(2):231-236. 34, 38
46. Emoto M, Nojiri Y, Okano F. Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. *Displays*. 2004;25:67-76. 34, 64
47. Yano S, Ide S, Mitsuhashi T, Thwaites H. A study of visual fatigue and visual comfort for 3D HDTV/HDTV images. *Displays*. 2002;23:191-201. 34
48. Kim D, Choi S, Park S, Sohn K. Stereoscopic visual fatigue measurement based on fusional response curve and eye-blinks. In: *Digital Signal Processing (DSP), 2011 17th International Conference on*; 2011. p. 1-6. 34
49. Kim J, Lee EC, Lim JS. A new objective visual fatigue measurement system by using a remote infrared camera. In: *Computer Science and Software Engineering (JCSSE), 2011 Eighth International Joint Conference on*; 2011. p. 182-186.

50. Bolecek L, Kaller O, Ricny V. Influence of the Viewing Angle on the Spatial Perception for Various 3D Displays. In: 22nd International Conference Radioelektronika; 2011. .
51. Mun S, Park MC, Park S, Whang M. SSVEP and ERP measurement of cognitive fatigue caused by stereoscopic 3D. *Neurosci Lett*. 2012;525:89-94. 34
52. Jaschinski W, Bonacker M, Alshuth E. Accommodation, convergence, pupil diameter and blinks at a CRT displays flickering near fusion limit. *Ergonomics*. 1996;39:152-164. 34
53. Gray LS, Gilmartin B, Winn B. Accommodation microfluctuations and pupil size during sustained viewing of visual display terminals. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2000;20 (1):5-10. 34
54. Lee JH, Song JK. Individual variation in 3D visual fatigue caused by stereoscopic images. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*. 2012 May;58(2):500-504. 34
55. Kennedy RS, Stanney KM. Postural Instability induced by Virtual Reality Exposure: Development of a Certification Protocol. *Int J Human-Comput Interact*. 1996;8:25-47. 35
56. Yeh YY, Silverstein LD. Limits of fusion and depth judgment in stereoscopic color displays. *Hum Factors*. 1990;32(1):45-60. 36
57. Patterson R, Martin WI. Human Stereopsis. *Hum Factors*. 1992;34:669-692. 36
58. Howard IP, Rogers BJ. *Seeing in Depth: Basic Mechanisms*. vol. 1. Porteous Publishing; 2002. 36
59. Liu Y, Wang F, Wang C. The research on visual fatigue factor in stereoscopic image observation. In: *Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design, 2009. CAID CD 2009. IEEE 10th International Conference on; 2009*. p. 1882-1887. 36
60. Yano S, Emoto M, Mitsuhashi T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images. *Displays*. 2004;25:141-150. 36
61. Heckmann T, Shor CM. Panum's fusional area estimated with a criterion-free technique. *Perception & Psychophysics*. 1989;45:297-306. 37, 41
62. Mai Z, Pourazad MT, Nasiopoulos P. Contrast effect on 3D and 2D video perception. In: *Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2011 Third International Workshop on; 2011*. p. 173-176. 37
63. Shigemasa H, Sato T. Effects of the amount of monocular shape information on stereo scaling problem. *Japanese Psychological Research*. 2012;54:27-37. 37
64. Taya D, Ichikawa M. Effects of binocular disparity on impressions. *Japanese Psychological Research*. 2012;54:38-53. 37
65. Tyler CW. Spatial organization of binocular disparity sensitivity. *Vision Res*. 1975;15:583-590. 37

66. Tyler CW. Stereoscopic vision: Cortical limitations and a disparity scaling effect. *Science*. 1973;181:276-278. 37
67. Polonen M, Salmimaa M, Hakkinen J. Effect of ambient illumination level on perceived autostereoscopic display quality and depth perception. *Displays*. 2011;32:135-141. 37
68. Kim D, Sohn K. Visual Fatigue Prediction for Stereoscopic Image. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*. 2011 Feb;21(2):231-236. 38
69. Ijsselsteijn W, Ridder H, Hamberg R, Bouwhuis D, Freeman J. Perceived depth and the feeling of presence in 3DTV. *Displays*. 1998;18:207-214. 38
70. Meesters LMJ, Ijsselsteijn WA, Seuntjens PJH. A survey of perceptual evaluations and requirements of three-dimensional TV. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*. 2004;14(3):381-391. 38, 39
71. Boev A, Gotchev A, Egiazarian K, Aksay A, Akar GB. Towards compound stereo-video quality metric: a specific encoder-based framework. In: *Image Analysis and Interpretation, 2006 IEEE Southwest Symposium on*; 2006. p. 218-222. 38
72. Ntuen CA, Goings M, Reddin M, Holmes K. Comparison between 2-D & 3-D using an autostereoscopic display: The effects of viewing field and illumination on performance and visual fatigue. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2009;39:388-95. 38
73. Pastoor S. Human Factors of 3D Displays in Advanced Image Communications. *Displays*. 1993;14:150-157. 38
74. Kooi FL, Toet A. Visual Comfort of Binocular and 3D Displays. *Displays*. 2004;25:99-108. 38
75. Stelmach LB, Tam WA, Speranza F, Renaud R, Martin T. Improving the visual comfort of stereoscopic images. *Proc SPIE*. 2003;5006:269-282. 39
76. Pastoor S, Wopking M. 3-D displays: A review of current technologies. *Displays*. 1997;17:100-110. 39
77. Hoffman DM, Girshick AR, Akeley K, Banks MS. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *J Vis*. 2008;8(3):1-30. 40
78. Ukai K, Howarth PA. Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories and observations. *Displays*. 2008;29:106-116. 40, 64
79. Rushton SK, Riddell PM. Development visual systems and exposure to virtual reality and stereo displays: some concerns and speculations about the demands on accommodation and vergence. *Appl Ergon*. 1999;30:69-78. 40
80. Hasabe S, Graf EW, Schor CM. Fatigue reduce tonic accommodation. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2001;21 (2):151-160. 40

81. Jaschinski W, Kruza T. Eyestrain in VDU users: viewing distance and the resting position of ocular muscles. *Hum Factors*. 1991;31 (1):69-83. 41
82. Okada Y, Ukai K, Wolffsohn JS, Gilmartin B, Iijima A, Bando T. Target spatial frequency determines the response to conflicting defocus and convergence-driven accommodative stimuli. *Vision Res*. 2006;46:475-484. 41
83. O'Hare L, Hibbard PB. Visual Discomfort and Blur. *J Vis*. 2013;13:1-12. 41
84. Rempel D, Willms K, Anshel J, Jaschinski W, Sheedy J. The effects of visual display distance on eye accommodation, head posture, and vision and neck symptoms. *Hum Factors*. 2007;49:830-838. 42
85. Jones R, Stevens GL. Horizontal fusional amplitudes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1989;30:1638-42. 42
86. Shor CM, Tsuetaki TK. Fatigue of accommodation and vergence Modifies their mutual Interactions. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1987;28:1250-59. 42, 64
87. Wopking M. Viewing Comfort with Stereoscopic Pictures: An Experimental Study on the Subjective Effects of Disparity Magnitude and Depth of Focus. *J Soc Inf Display*. 1995;3:101-103. 42
88. Nojiri Y, Yamanoue H, Hanazato A, Okano F. Measurement of parallax distribution and its application to the analysis of visual comfort for stereoscopic HDTV. *Proc SPIE*. 2003;5006:195-205. 42
89. Kim J, Kane D, Banks MS. Visual discomfort and temporal properties of the vergence-accommodation conflict. *Proc SPIE*. 2012;8288:828811. 43
90. Hori H, Shiomi T, Kanda T, Hasegawa A, Ishio H, Matsuura Y, Omori M, Takada H, Hasegawa S, Miyao M. *Virtual and Mixed Reality - New Trends*. vol. 6773. 1 ed ed. Springer; 2011. 44
91. Oliveira S, Jorge J, Méijome JG. Dynamic accommodative response to different visual stimuli (2D vs 3D) while watching television and playing Nintendo 3DS console. *Ophthalmol Physiol Opt*. 2012;32:383-389. 45
92. Teste Estereoscópico de Pontos Aleatórios;. [Acedido a 10 Abril 2014]. Available from: <http://www.bibonline.co.uk/products/randot-stereo-test-polarized-specs>. 49
93. Scheiman M, Wick B. *Clinical Management of Binocular Vision, Heterophoric, Accommodative, and Eye Movement Disorders*. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott; 1994. 49, 65
94. Barra de Prismas Vertical e Horizontal;. [Acedido a 10 Abril 2014]. Available from: <http://www.bernell.com/fullsize/73/843>. 49
95. Marôco J. *Análise Estatística com a utilização do SPSS*. 3rd ed. Edições Sílabo; 2007. 53

96. Rutstein RP, Corliss DA. Distance stereopsis as a screening device. *Optom Vis Sci.* 2000;77:135-139. 63
97. Griffin JR. *Binocular Anomalies: Procedures for Vision Therapy.* Chicago: Professional Press; 1982. 63
98. Caloroso EE. A sequential strategy for achieving functional binocularity in strabismus. *J Am Optom Assoc.* 1988;59:378-387. 63
99. Kim SH, Suh YW, Yun C, Yoo EJ, Yeom JH, Cho YA. Influence of stereopsis and abnormal binocular vision on ocular and systemic discomfort while watching 3D television. *Eye.* 2013;27:1243-48. 63
100. Yekta AA, Pickwell LD, Jenkins TCA. Binocular vision without visual stress. *Optom Vis Sci.* 1989;66:815-817. 63
101. Jaschinski W. Fixation disparity at different viewing distances and the preferred viewing distance in a laboratory near-vision task. *Ophthal Physiol Opt.* 1998;18:30-39. 63
102. Erkelens CJ, van Ee R. Capture of the visual direction of monocular objects by adjacent binocular objects. *Vision Res.* 1997;37:1735-1745. 63
103. Shimono K, Ono H, Saida S, Mapp AP. Methodological caveats for monitoring binocular eye position with nonius stimuli. *Vision Res.* 1998;38:591-600. 63
104. Fogt N, Jones R. The effect of forced vergence on retinal correspondence. *Vision Res.* 1998;38:2711-19. 63
105. Kromeier M, Schmitt C, Bach M, Kommerell G. Stereoacuity versus fixation disparity as indicators for vergence accuracy under prismatic stress. *Ophthal Physiol Opt.* 2003;23:43-49. 64
106. Debysingh SJ, Orzech PL, Sheedy JE. Effect of a central fusion stimulus on fixation disparity. *Am J Optom Physiol Opt.* 1986;63:277-280. 64
107. Karpicka E, Howarth A. Heterophoria adaptation during the viewing of 3D stereoscopic stimuli. *Ophthal Physiol Opt.* 2013;33:604-610. 64, 65, 68
108. Kawara T, Ohmi M, Yoshizawa T. Effects on visual functions during tasks of object handling in virtual environment with a head mounted display. *Ergonomics.* 1996;39:1370-80. 64
109. Shor CM. Influence of accommodative and vergence adaptation on binocular motor disorders. *Am J Optom Physiol Opt.* 1988;65:464-475. 64
110. Torii M, Okada Y, Ukai K, Wolfsohn J, Gilmartin B. Dynamic measurement of accommodative responses while viewing stereoscopic images. *J Modern Optics.* 2008;55:557-567. 64

111. Cumming BG, Judge SJ. Disparity-induced and blur-induced convergence eye movement and accommodation in the monkey. *J Neurophysiol.* 1986;55:896-914.
112. Bos JE, Bles W, Groena EL. A theory on visually induced motion sickness. *Displays.* 2008;29:47-57. 64
113. Bando T, Iijima A, Yano S. Visual fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: A review. *Displays.* 2012;33:76-83. 64
114. Ukwade MT, Bedell HL, Harwerth RS. Stereopsis is perturbed by vergence error. *Vision.* 2003;43:181-193. 64

Anexo A

Neste anexo constam os seguintes documentos:

- A1. Parecer favorável ao estudo da Comissão de Ética da Faculdade de Ciências da Saúde da UBI;
- A2. Consentimento Informado fornecido aos participantes;
- A3. Gráficos obtidos para a análise da Curva de Vergência Forçadas de cada participante;
- A4. Trabalho apresentado no âmbito da presente dissertação.

A.1 Parecer da Comissão de Ética

Parecer favorável à proposta de projeto de investigação solicitada pelos autores à Comissão de Ética da Faculdade de Ciências da Saúde da UBI.



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
FACULDADE DE CIÊNCIAS DA SAÚDE

PARECER

Processo: CE-FCS-2013-022

Data conclusão processo: 23-07-2013

Tema Projecto/Proponente: “Consequências visuais da exposição a estímulos estereoscópicos em visão próxima”– Exma. Sra. Dra. Anita Gabriela Moreira Nunes da Costa

Exmo. Sr. Presidente da Faculdade de Ciências da Saúde

Apreciado o pedido referente ao processo acima mencionado esta Comissão não detectou matéria que ofenda os princípios éticos.

Covilhã, 25 de Julho de 2013

O Presidente da Comissão de Ética

Prof. Doutor José Martinez de Oliveira



O Vice-Presidente da Comissão de Ética

Prof. Doutor Joaquim Viana

Figura A.1.1: Parecer favorável da Comissão de Ética.

A.2 Consentimento Informado

Consentimento Informado dado aos participantes do estudo. Este contém os objetivos principais do trabalho, todas as implicações que poderiam surgir durante ou após a experimentação, bem como a possibilidade de não dar continuidade de permanência no estudo se assim fosse a vontade do participante. Todos os participantes assinaram este documento de livre vontade.



Consentimento Informado

Consequências Visuais da Exposição a Estímulos Estereoscópicos em visão próxima

Exmo Sr(a). Vimos por este meio solicitar a vossa participação num trabalho de investigação a decorrer no Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior, que consiste na análise do sistema binocular após a visualização de imagens estereoscópicas (imagens tridimensionais). O objectivo deste estudo é verificar possíveis alterações de alguns parâmetros visuais nomeadamente a estereopsia, foria, disparidade de fixação, e vergências (convergência e divergência). Os testes realizados são indolores, não invasivos e que até ao momento não há registo de riscos nem efeitos secundários associados excepto uma ligeira astenopia (cansaço) passageira.

Declara-se que os dados pessoais são confidenciais, garantindo-se o anonimato em todos os arquivos e a não distribuição dos mesmos para outros fins para além deste estudo.

O presente estudo, assim como os seus coordenadores e colaboradores, não beneficiam de qualquer fonte de financiamento e declara-se que não existem conflitos de interesse.

A sua colaboração nesta investigação será voluntária e pode abandoná-la a qualquer altura, sem que tal facto tenha quaisquer consequências para si.

Eu, _____, consinto participar num estudo sobre a variação do estado binocular durante a visualização 3D. Tenho conhecimento do objectivo experimental do protocolo e foi-me explicado o procedimento dos testes. Fui também informado que poderei interromper a participação na investigação sempre que for esta a minha decisão sem que haja alguma repercussão.

Em caso de ser necessário e para efeitos deste estudo autorizo o meu contacto telefónico:

Não__ Sim__ Telefone_____

_____ de _____ de 2013

Assinatura:_____

Figura A.2.1: Consentimento Informado entregue a cada participante.

A.3 Gráficos das Curvas de Vergências Forçadas

Gráficos das CVF para cada participante nos diferentes tempos de exposição. Estes não contêm as curvas de ajuste, uma vez que não acrescenta informação adicional sobre o comportamento da resposta do participante. Considere-se as dioptrias prismáticas com valor negativo as medições obtidas com prismas de base interna, enquanto que os valores positivos dizem respeito às medições com prismas de base externa. A disparidade de fixação apresentada no eixo das ordenadas na sua parte de valores positivos representa a disparidade de fixação Endo, sendo que na parte negativa a disparidade de fixação Exo.

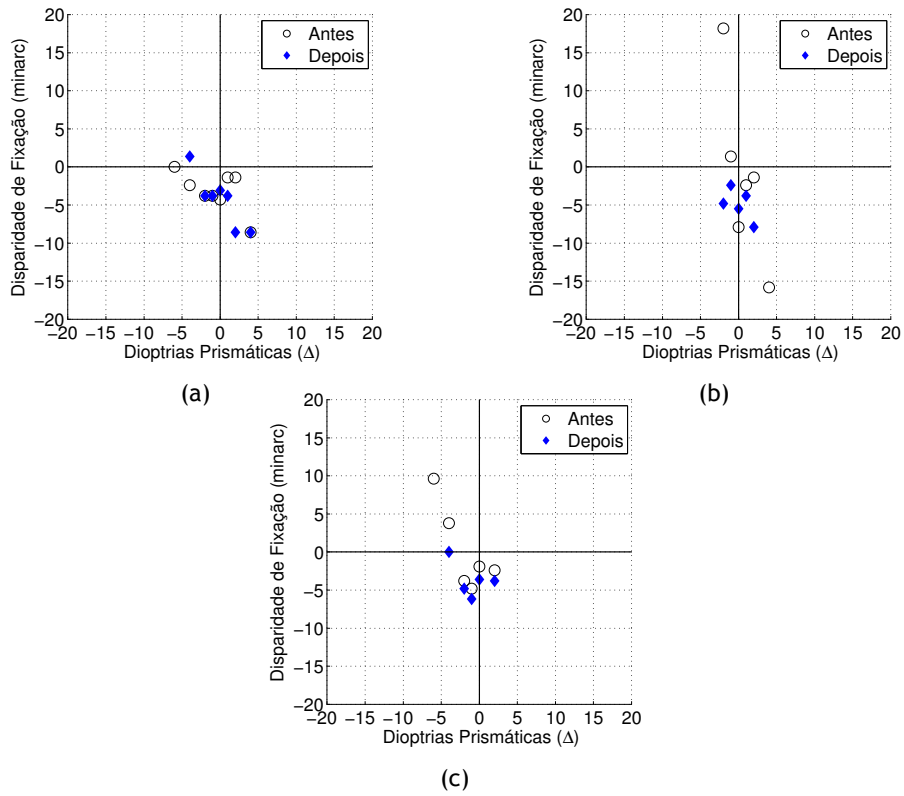


Figura A.3.1: Curva de Vergências Forçadas do participante 1 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

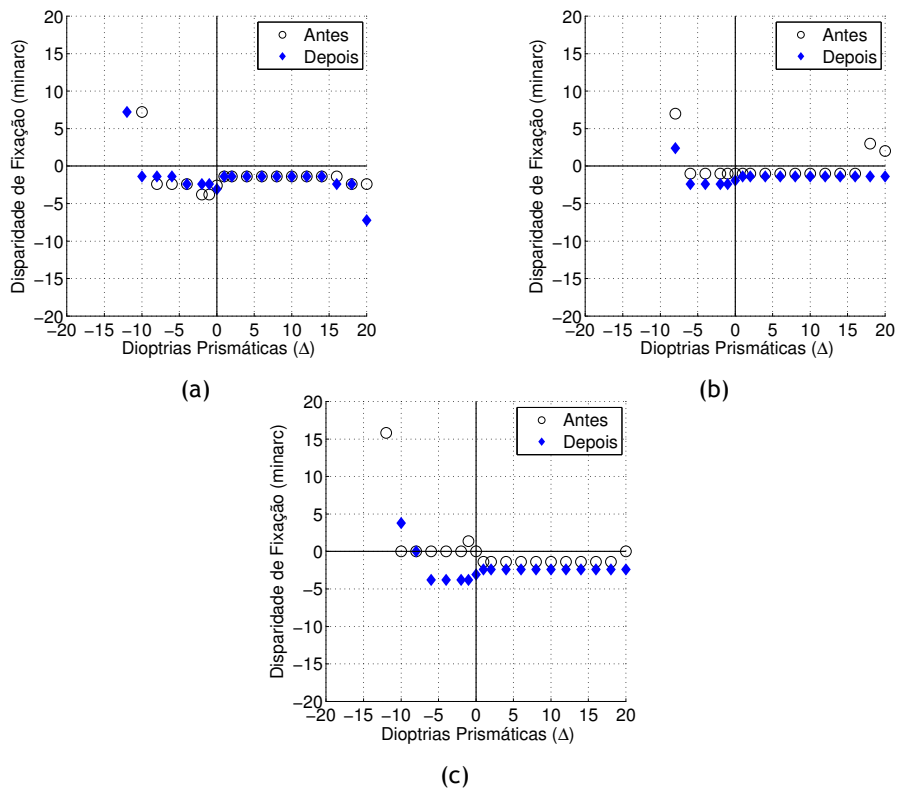


Figura A.3.2: Curva de Vergências Forçadas do participante 2 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

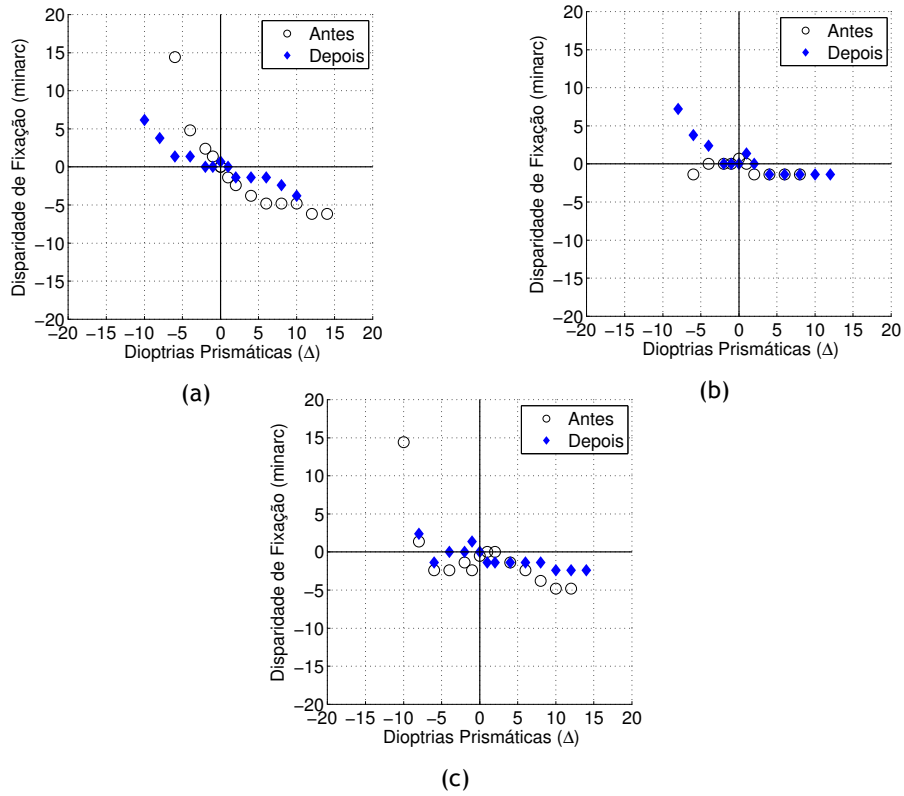


Figura A.3.3: Curva de Vergências Forçadas do participante 3 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

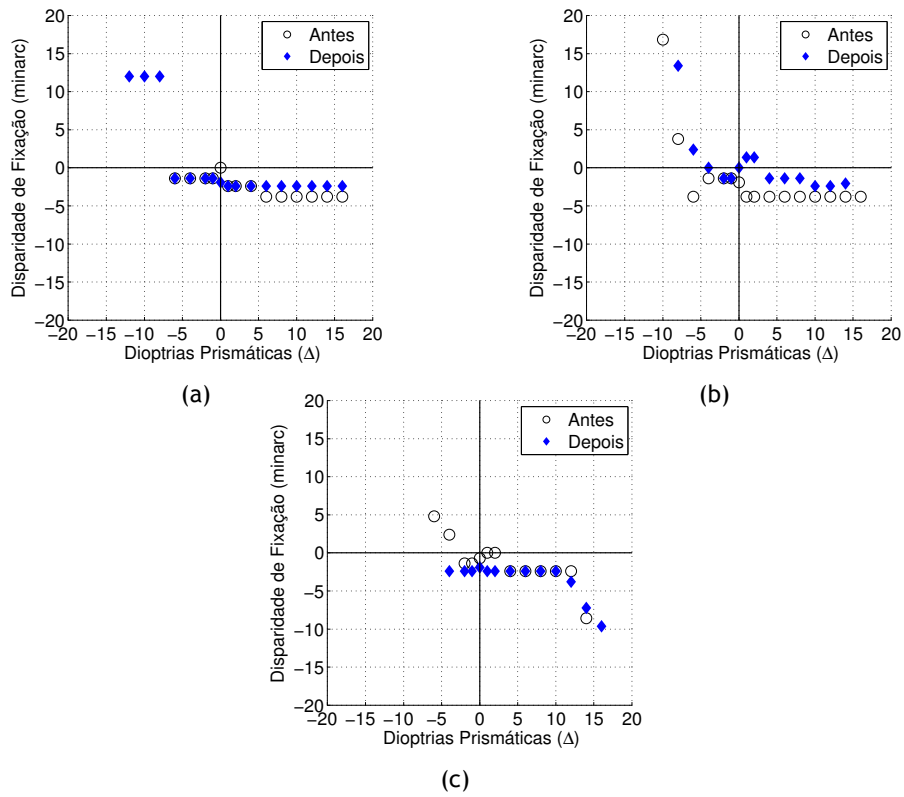


Figura A.3.4: Curva de Vergências Forçadas do participante 4 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

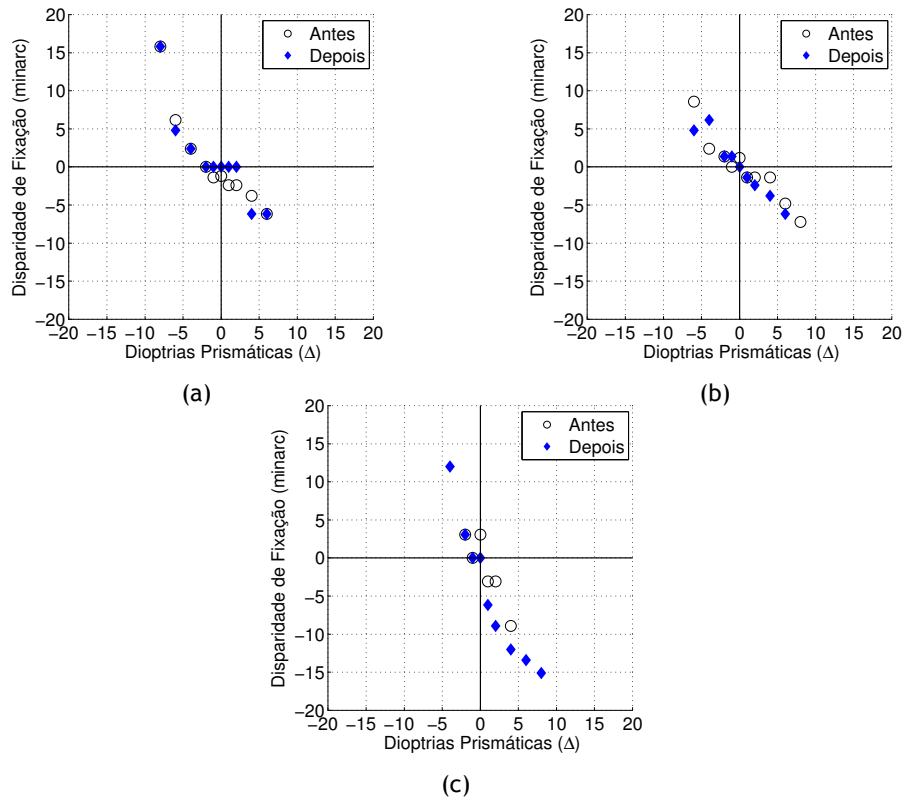


Figura A.3.5: Curva de Vergências Forçadas do participante 5 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

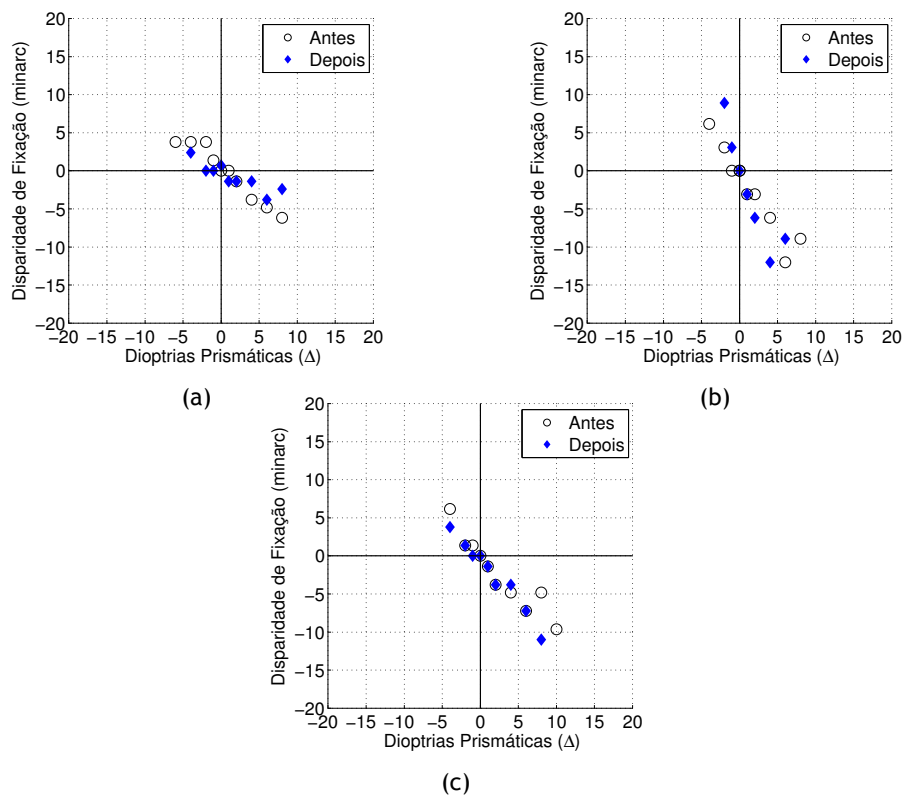


Figura A.3.6: Curva de Vergências Forçadas do participante 6 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

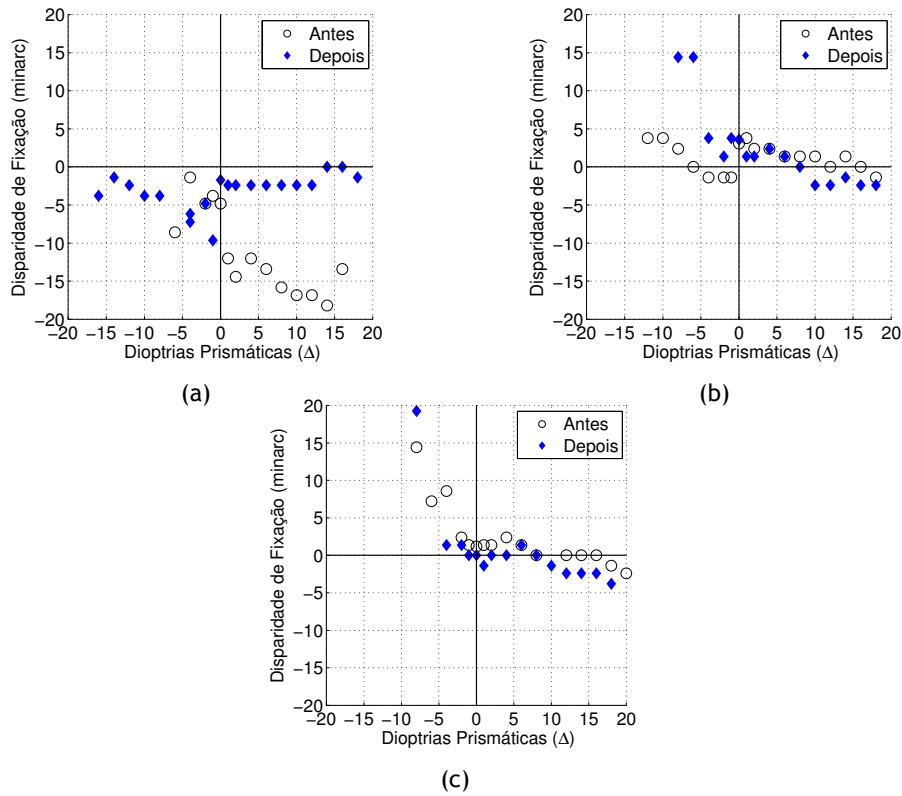


Figura A.3.7: Curva de Vergências Forçadas do participante 7 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

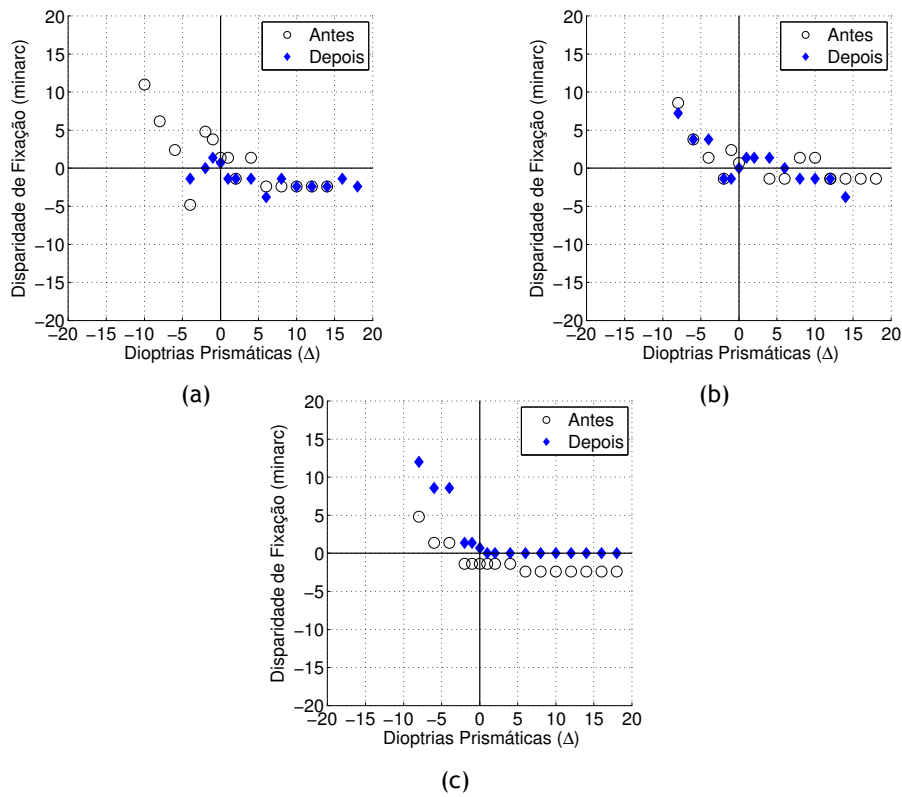


Figura A.3.8: Curva de Vergências Forçadas do participante 8 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

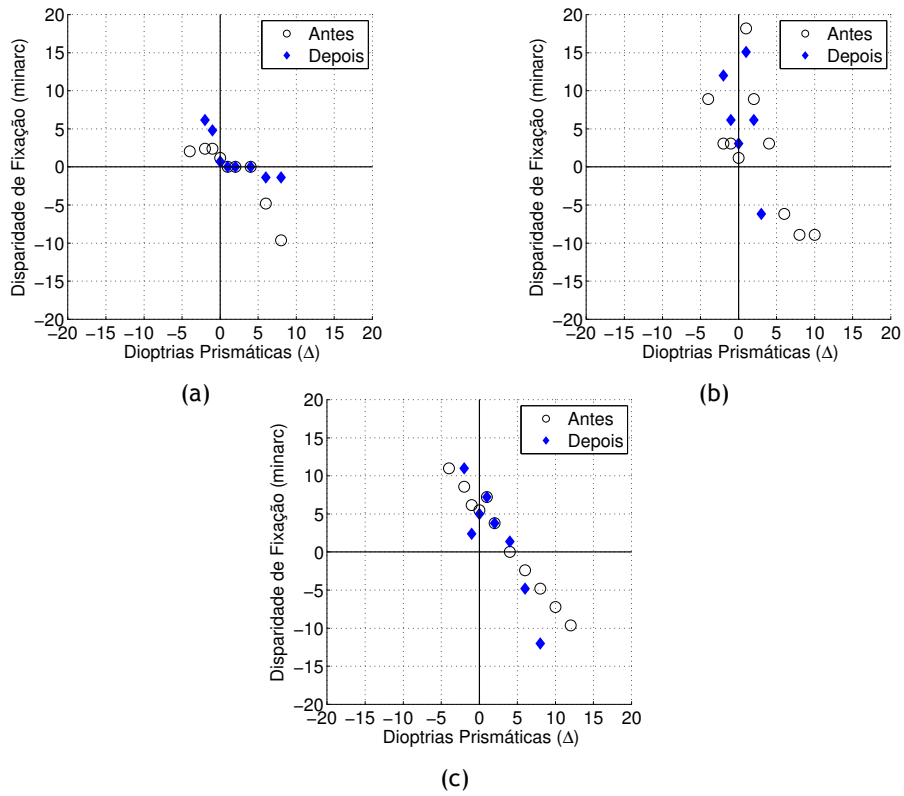


Figura A.3.9: Curva de Vergências Forçadas do participante 9 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

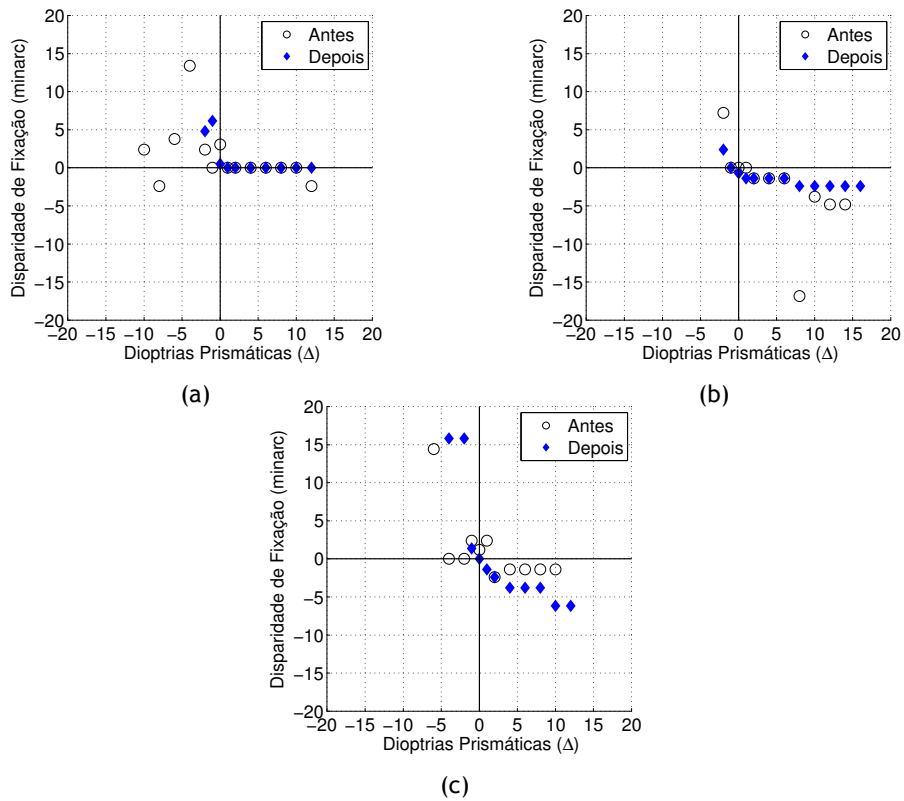


Figura A.3.10: Curva de Vergências Forçadas do participante 10 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

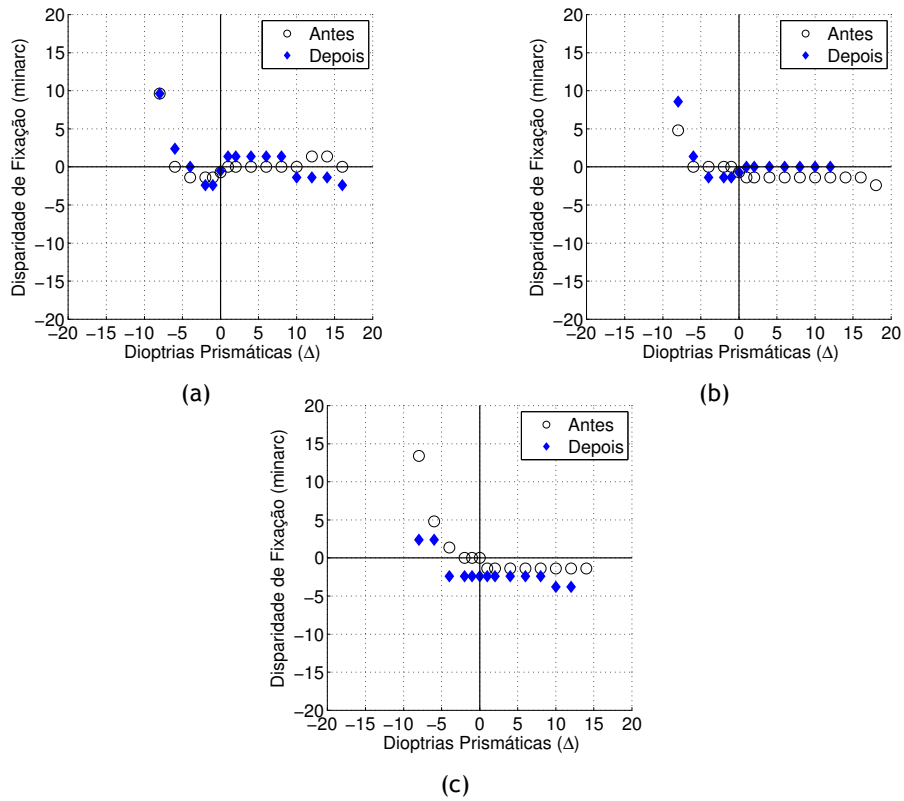


Figura A.3.11: Curva de Vergências Forçadas do participante 11 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

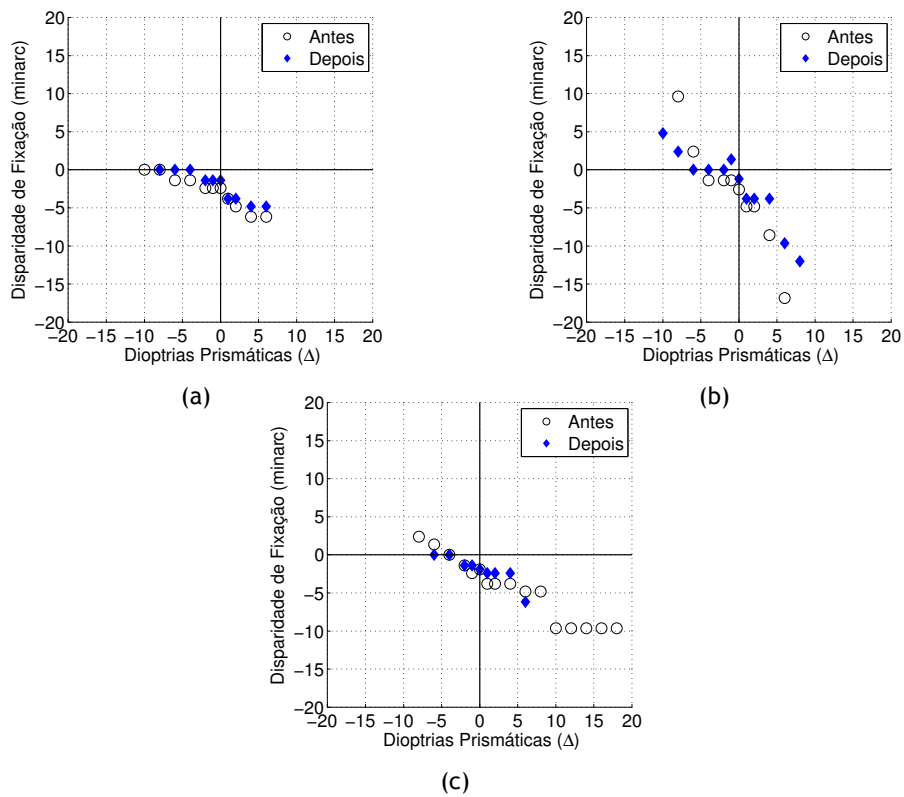


Figura A.3.12: Curva de Vergências Forçadas do participante 12 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

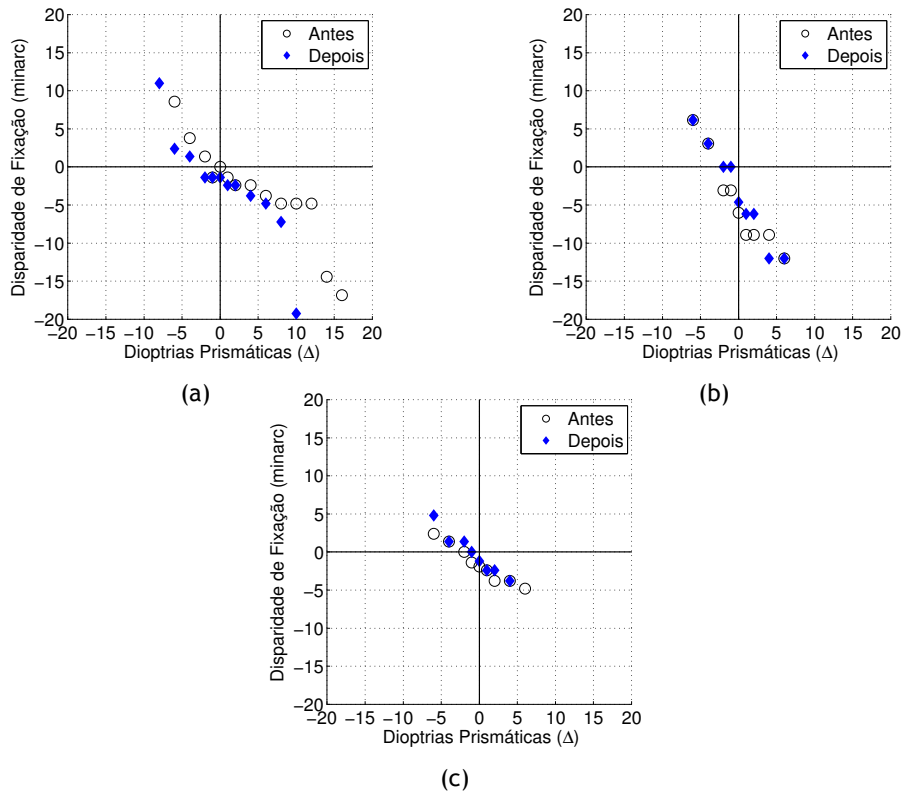


Figura A.3.13: Curva de Vergências Forçadas do participante 13 nas sessões (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

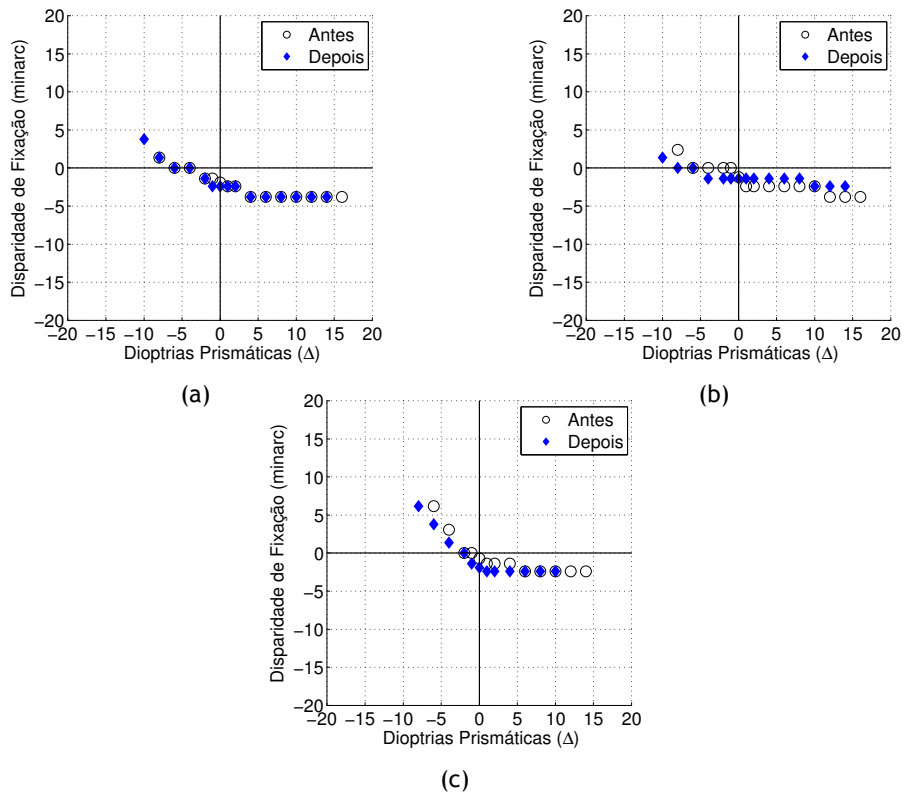


Figura A.3.14: Curva de Vergências Forçadas do participante 14 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

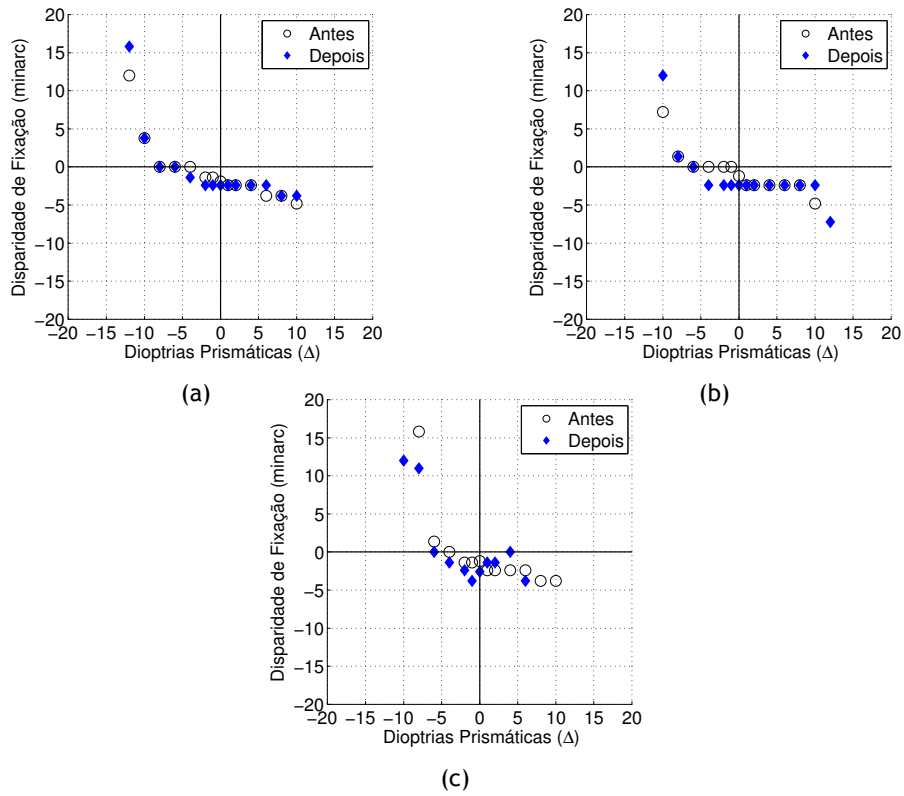


Figura A.3.15: Curva de Vergências Forçadas do participante 15 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

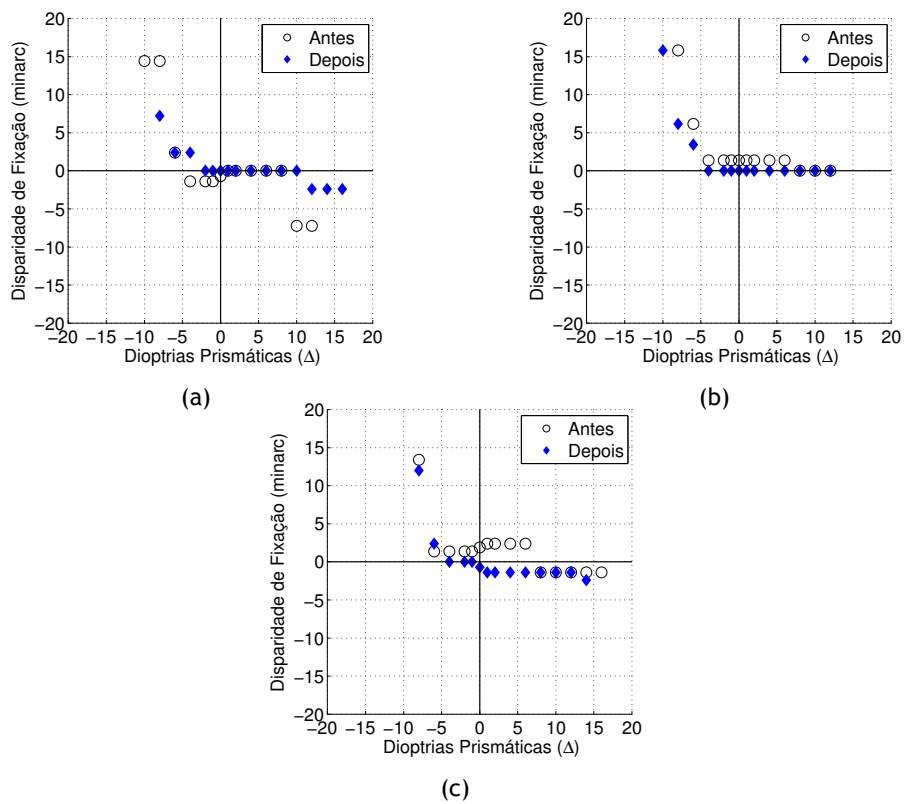


Figura A.3.16: Curva de Vergências Forçadas do participante 16 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

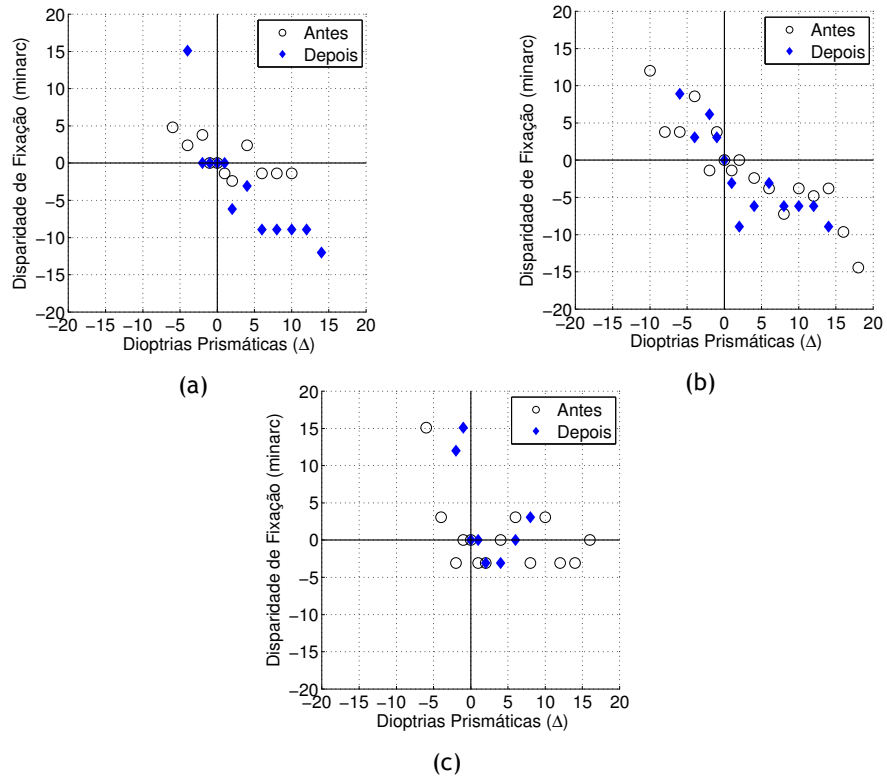


Figura A.3.17: Curva de Vergências Forçadas do participante 17 nas sessões (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

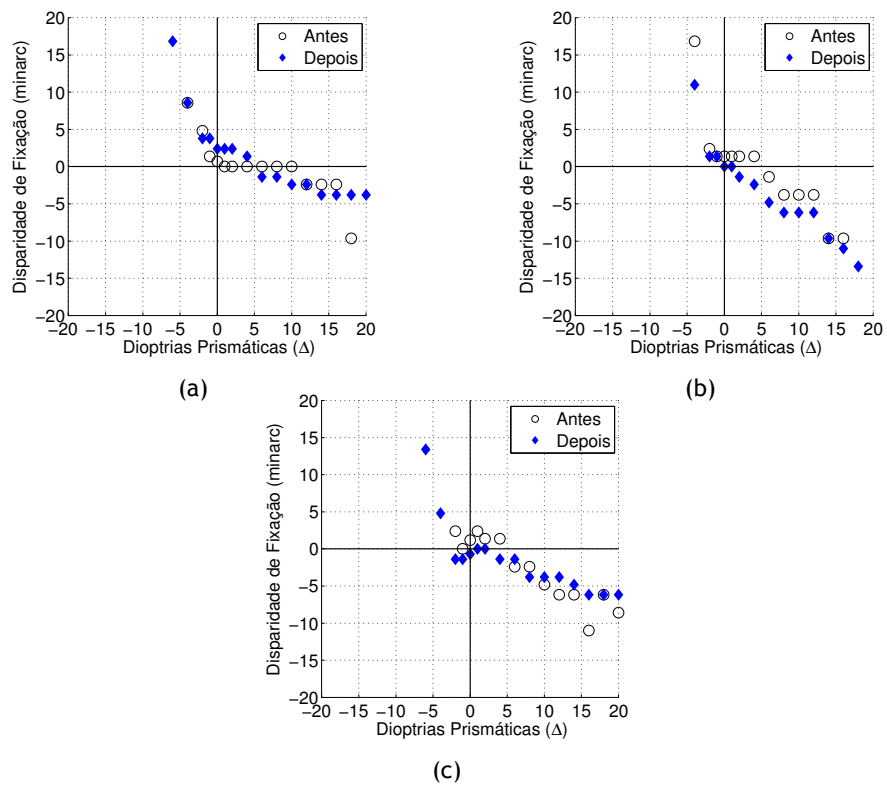


Figura A.3.18: Curva de Vergências Forçadas do participante 18 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

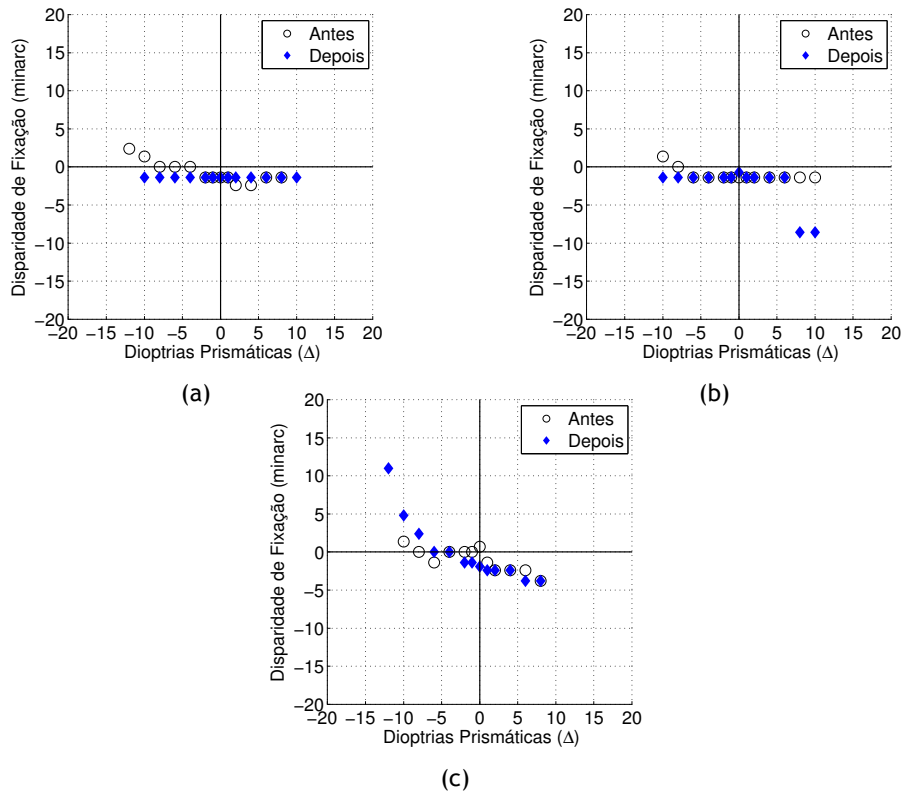


Figura A.3.19: Curva de Vergências Forçadas do participante 19 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

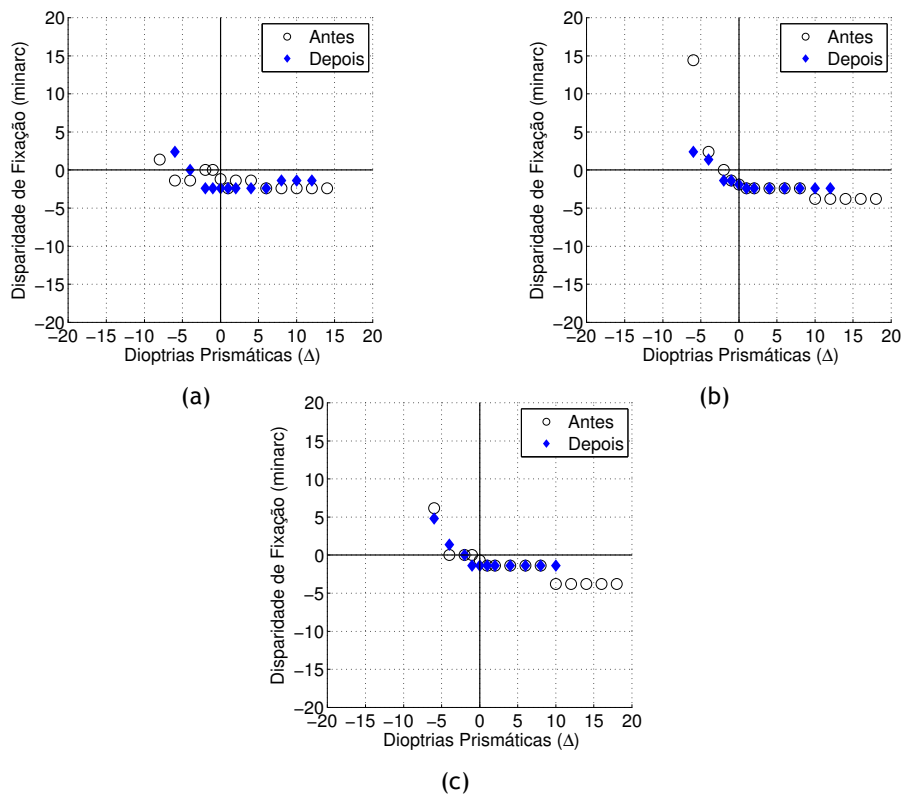


Figura A.3.20: Curva de Vergências Forçadas do participante 20 nas sessões (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

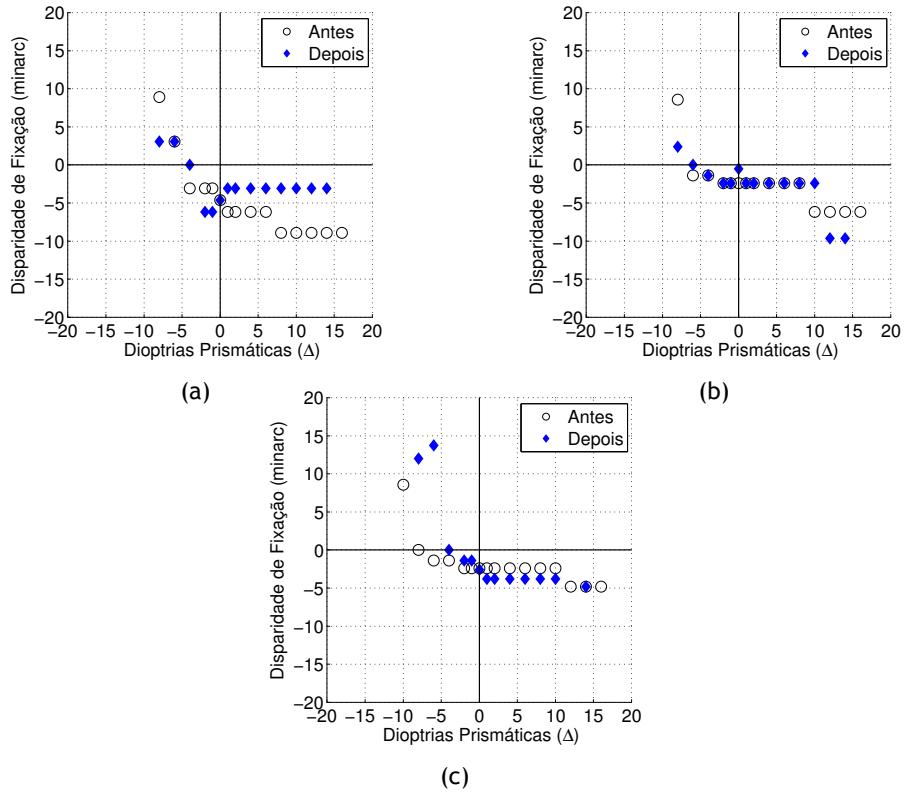


Figura A.3.21: Curva de Vergências Forçadas do participante 21 nas sessões (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

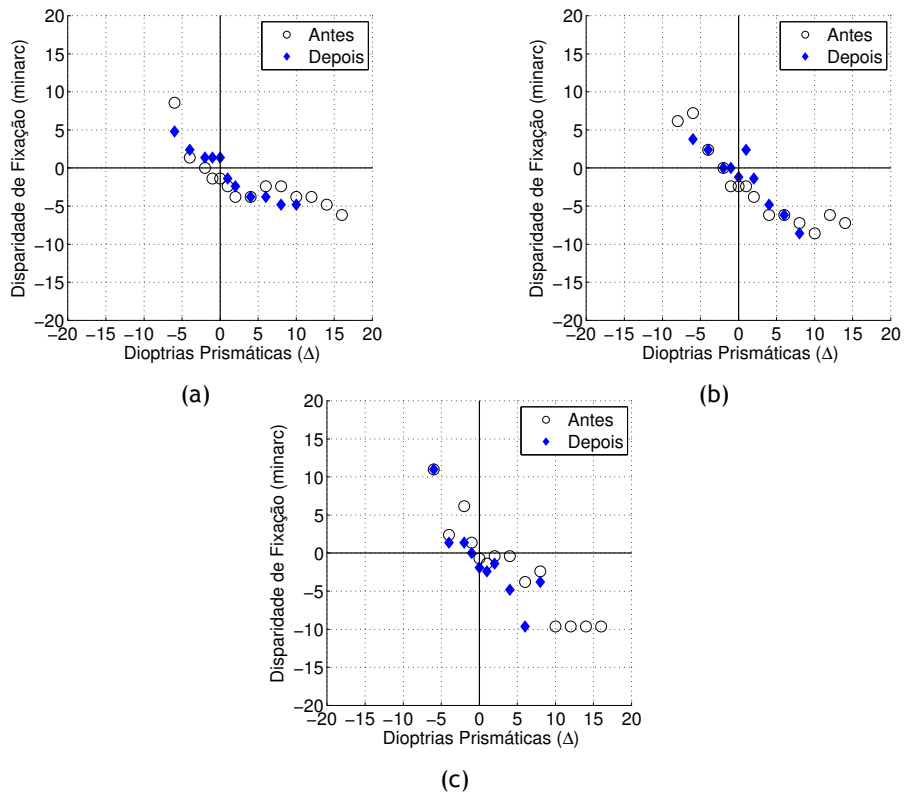


Figura A.3.22: Curva de Vergências Forçadas do participante 22 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

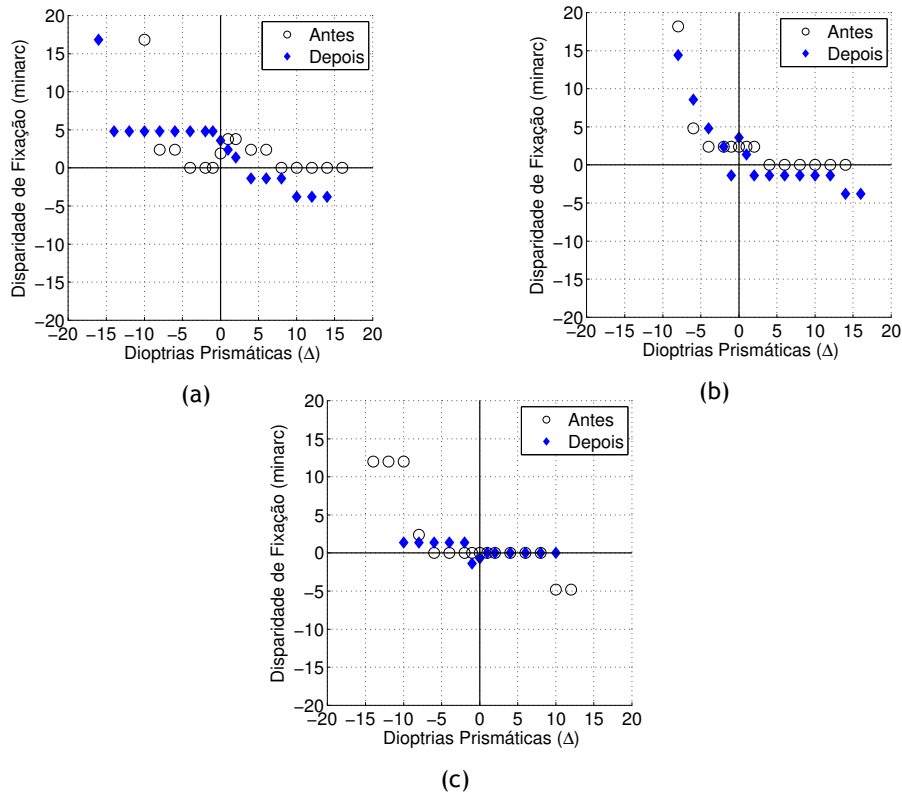


Figura A.3.23: Curva de Vergências Forçadas do participante 23 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

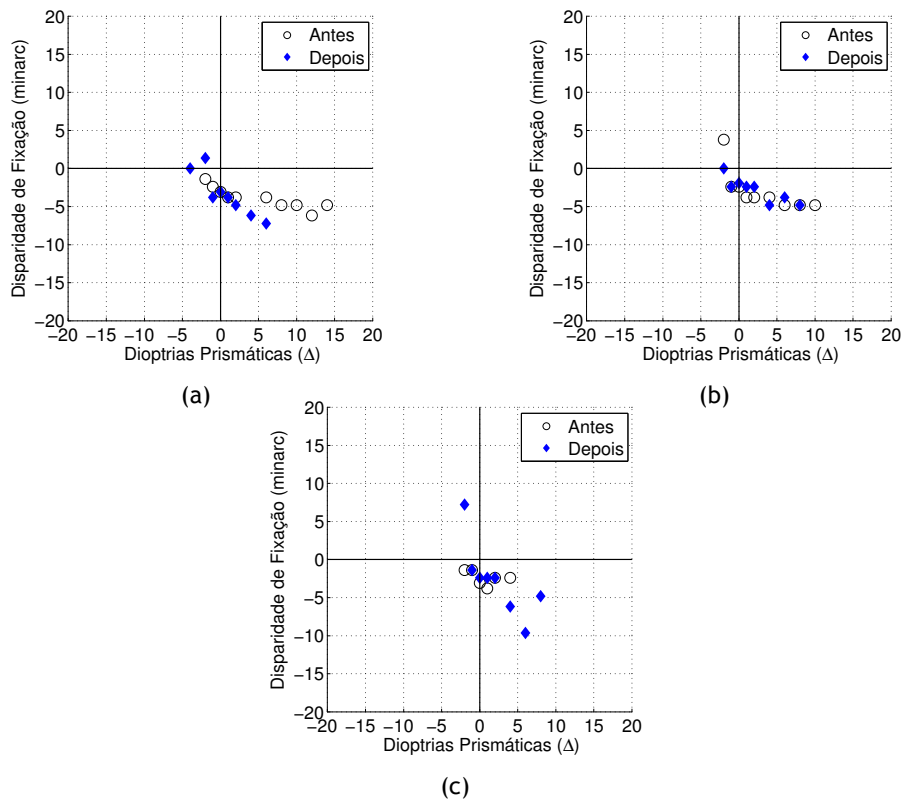


Figura A.3.24: Curva de Vergências Forçadas do participante 24 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

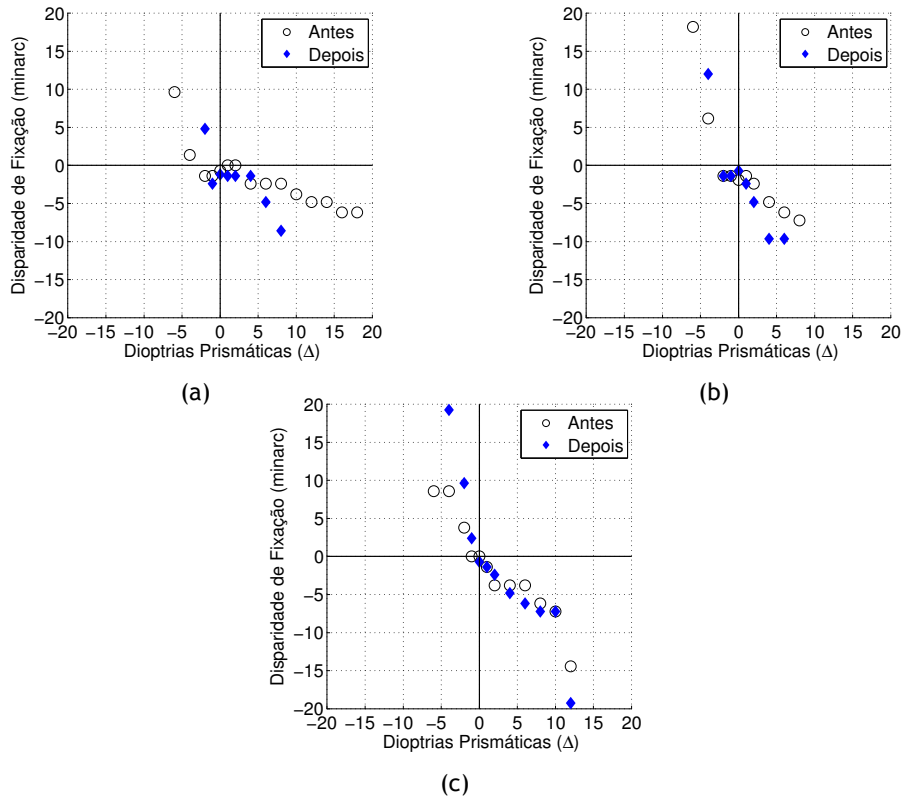


Figura A.3.25: Curva de Vergências Forçadas do participante 25 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

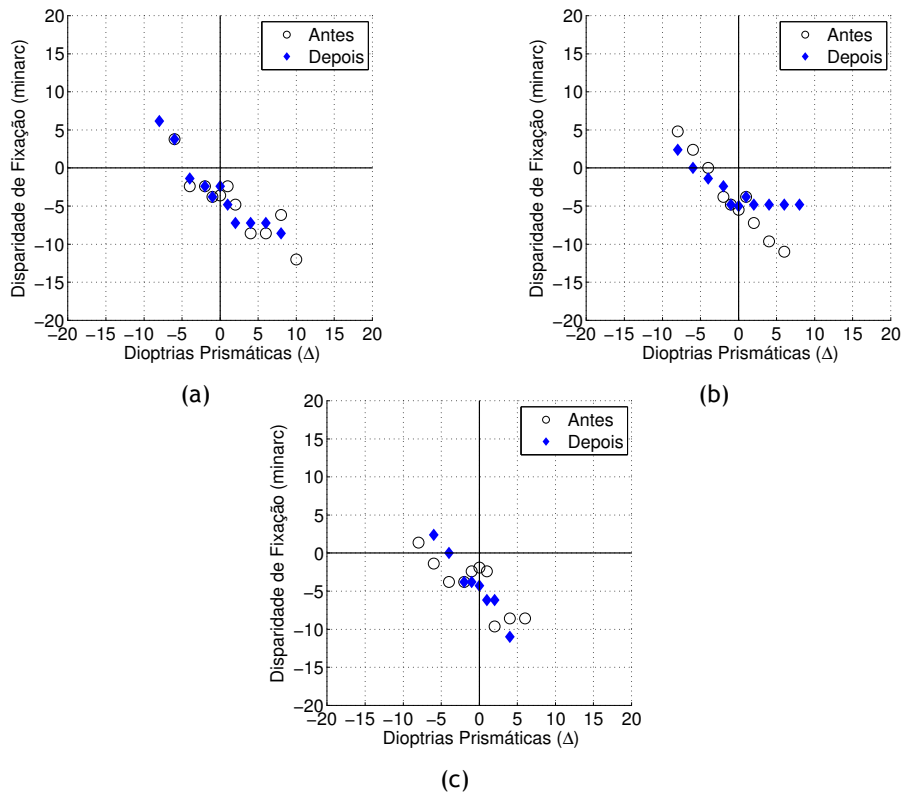


Figura A.3.26: Curva de Vergências Forçadas do participante 26 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

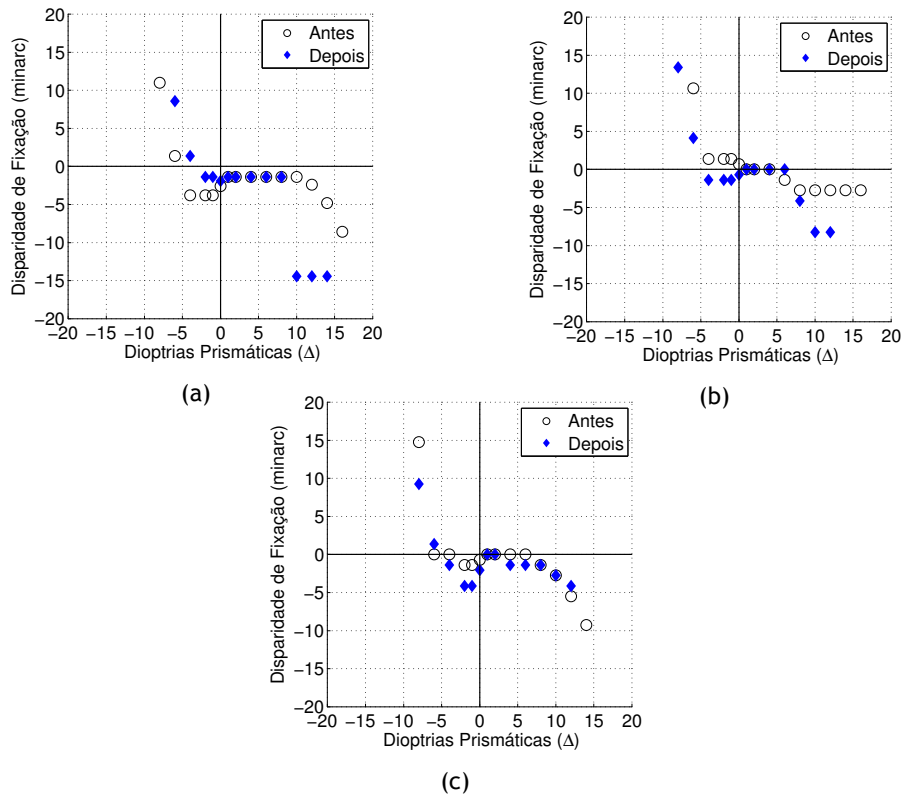


Figura A.3.27: Curva de Vergências Forçadas do participante 27 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

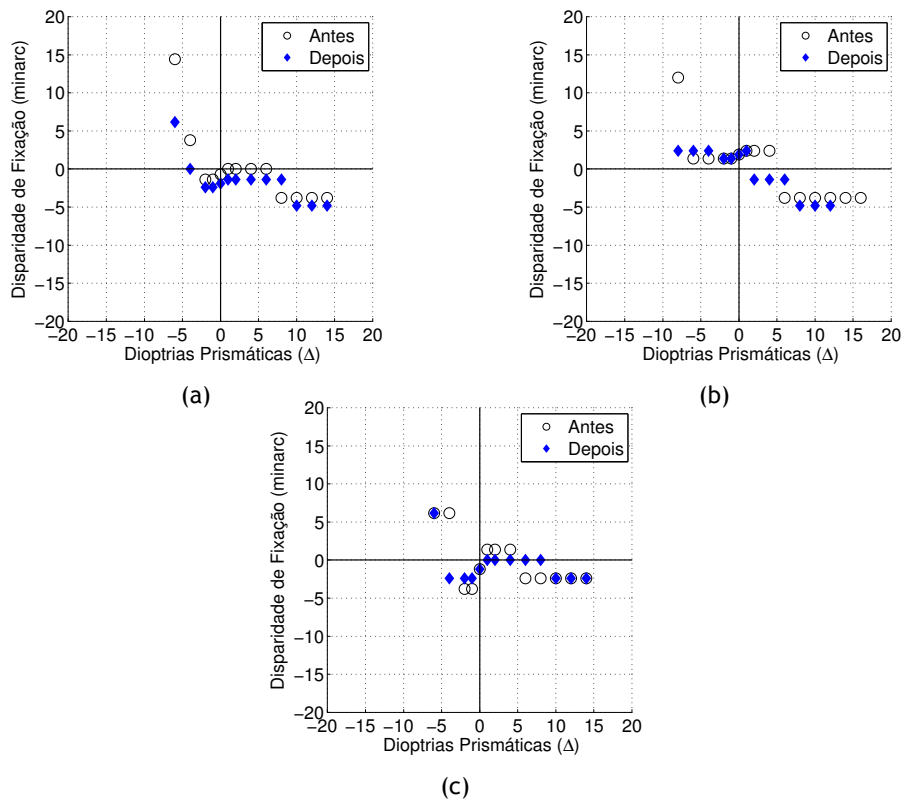


Figura A.3.28: Curva de Vergências Forçadas do participante 28 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

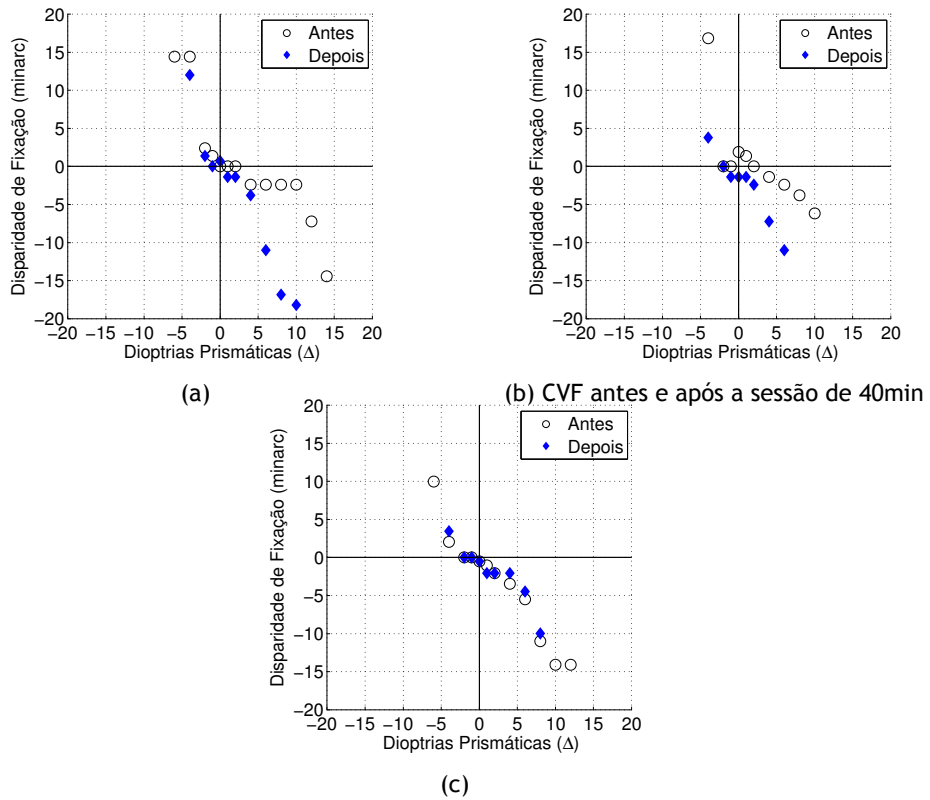


Figura A.3.29: Curva de Vergências Forçadas do participante 29 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

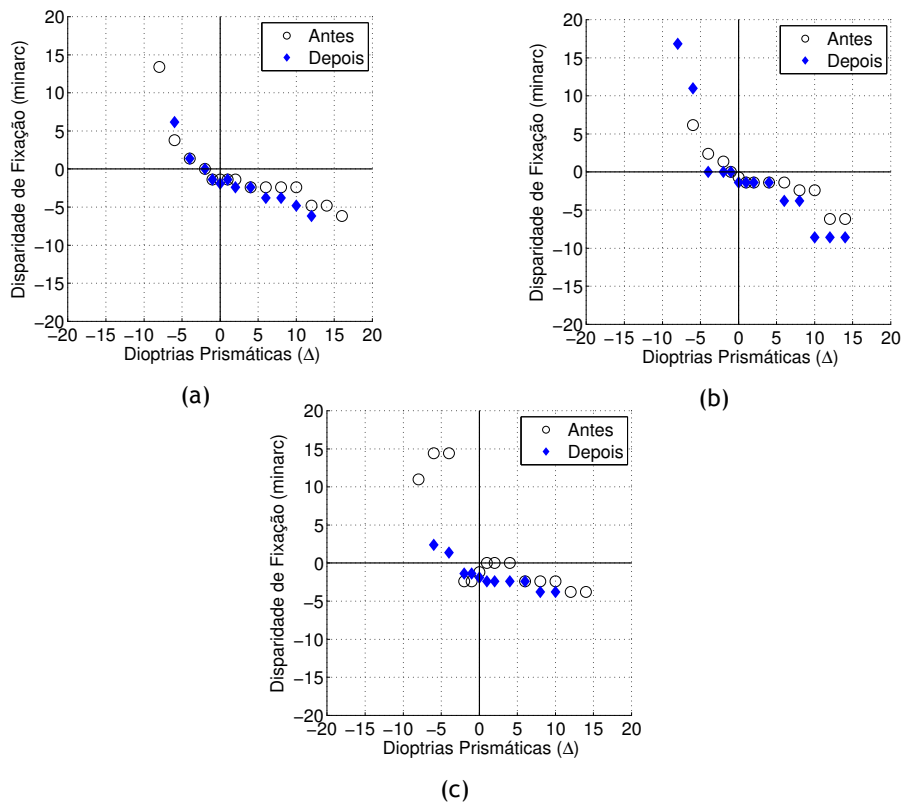


Figura A.3.30: Curva de Vergências Forçadas do participante 30 nas sessões de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos.

A.4 Trabalho apresentado no âmbito da presente dissertação

Poster apresentado em 16-20 Junho de 2013 em Sundsvall, Suécia no *workshop* da *Summer School* do COST Action IC1105 3D content creation, coding and transmission over future media networks (ConTourNet), cujos autores do trabalho são Anita Costa, Professor Doutor António Manuel Gonçalves Pinheiro e Professor Doutor Francisco Brardo Ferreira.



Visual consequences of 3D stimulus exposure

Anita Costa, António M. G. Pinheiro and F. M. Ferreira

University of Beira Interior
Remote Sensing Unit, Department of Physics, University of Beira Interior, Covilhã, PT
Corresponding Author: anitagmnc@gmail.com

Introduction

3D technology expansion and its subsequent adoption by various services and devices, has led to increased consumer interest.

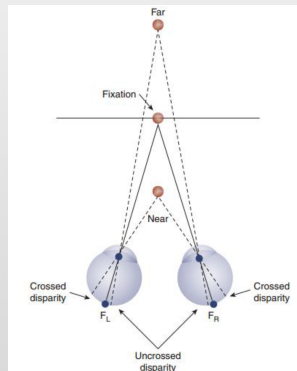
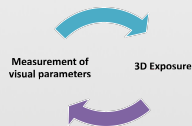
The general public time exposed to stereoscopic stimuli through 3D Cinema/Television, desktop-counterpart in gaming is growing [1, 2].

However, exposure to this type of stimulus results in some visual complaints [3, 4, 5].

In this work, the exposure to 3D stimulus in the near vision is studied. Three binocular parameters of the visual human system are measured: vergence system, stereopsis and phoria.

Methods

- 22 Participants [22 ± 3.98 years];
- Three sessions with exposure time: 20, 40 and 60 minutes;
- Measurement after exposure:
 - 1) Divergence, Convergence, Phoria with a prisms bar;
 - 2) Measurement of Stereopsis with a Randot Stereo Test;
- Statistical analysis applying ANOVA (repeated measures).
- 3D stimulus produced by 'HUGO' movie, containing positive and negative disparity (interaxial separation camera between 1 and 18 inches);



Cues of binocular depth perception:

- Retinal Disparity
- Convergence

Stereopsis:

Human ability of depth perception using retinal disparity only

References

[1] Marc T. M. Lambooji, Wijnand A. Ijsselstein, Ingrid Heynderickx. *Visual Discomfort in Stereoscopic Display: A review*, Stereoscopic Displays and Virtual Reality System XIV 2007.

[2] Frank L. Kooi and Alexander Toet. *Visual comfort of binocular and 3D displays*. Displays 2004.

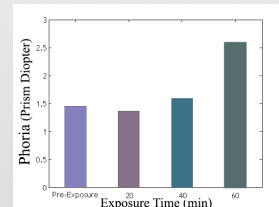
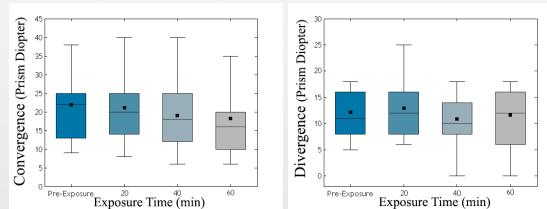
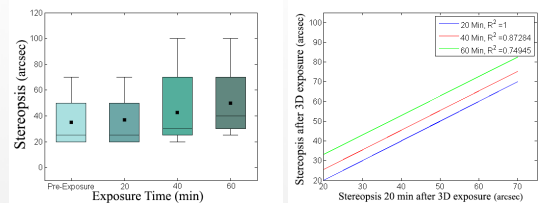
[3] Takehiko Bando, Atsuhiko Iijima, Sumio Yano. *Visual Fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: A review*. Display, 2012.

[4] M. Lambooji, M. F. Fortuin, W. A. Ijsselstein and I. Heynderickx. *Reading performance as screening tool for visual complaints from stereoscopic content*. Display, 2012.

[5] Mazaki Emoto, Yuji Nojiri and Fumio Okano. *Change in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV*. Displays 2004.

Results

- Significant statistical changes in the **Stereopsis** values after 40 min of 3D exposure ($p < 0.001$)
- Convergence significant differences after 60 min of exposure ($p < 0.01$)
- Divergence showed no differences with 60 min of 3D visualization ($p = 1.00$)
- **Phoria** showed exophoric trend, but no exist significant statistical variation ($p = 0.24$)



Conclusions

- The sensitivity of Stereopsis decreases after long exposure to 3D stimuli.
- In 3D technology the Vergence System components, have a different behaviour due to its dynamic:
 - 1) reduction in the **Convergence**
 - 2) no changes on the **Divergence**.
- No changes in phoria. However, there is a tendency for the Exophoria predominance.

EU COST Training School on Plenoptic Capture, Processing and Reconstruction , 16 - 20 June 2013, Sundsvall, Sweden

Figura A.4.1: Poster apresentado no workshop da Summer School do COST 3D-ConTourNet.

