

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

A Holografia Estereográfica como Meio de Expressão Artística

José Alberto de Lima Machado Pinto

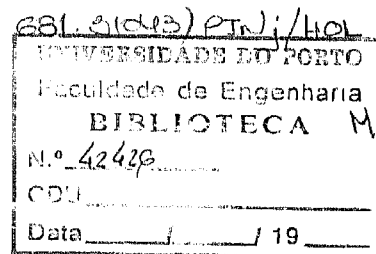
Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
Mestre em Tecnologia Multimédia

Dissertação realizada sob a supervisão de

Prof. Dr. Luís Miguel Bernardo

Do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Porto, Maio de 1999



Resumo

Este trabalho é uma investigação sobre a técnica conhecida por holografia estereográfica no sentido de uma futura aplicação artística. A holografia estereográfica permite, através da aliança entre processos fotográficos e processos holográficos, “transformar” imagens bidimensionais em imagens tridimensionais e autoestereoscópicas. Assim, analisamos, por um lado, as relações existentes entre a geometria de captura fotográfica e a geometria de exposição holográfica, bem como as suas implicações na reconstrução da imagem tridimensional, e, por outro, as contribuições da frequência de amostragem/dimensão da fenda na qualidade de reconstrução estereoscópica.

Abstract

This work is an investigation about the technique known as stereographic holography to be artistically applied in the future. The stereographic holography is a process that allows, through the alliance between photographic processes and holographic processes, the "transformation" of bi-dimensional images in autostereoscopic three-dimensional images. Thus, we analysed on one side, the relationships between the geometry of photographic capture and the geometry of holographic exhibition, as well as its implications in the reconstruction of the three-dimensional image, and on the other side the contributions of the frequency of sampling/dimension of the slit in the quality of stereoscopic reconstruction.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. RESUMO CAPITULAR.....	2
1.3. SOBRE O CONTEXTO TEÓRICO-PRÁTICO.....	4
2. A LUZ – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES.....	7
2.1. COERÊNCIA DA LUZ	14
2.2. LUZ VISÍVEL	16
3. A VISÃO E O ESPAÇO.....	19
3.1. PERCEPÇÃO DA PROFUNDIDADE	22
3.1.1. <i>Factores físicos</i>	23
3.1.2. <i>Factores fisiológicos</i>	24
3.1.2.1. Acomodação.....	25
3.1.2.2. Convergência.....	25
3.1.2.3. Paralaxe binocular (disparidade binocular)	26
3.1.2.4. Paralaxe monocular (movimento monocular).....	28
3.1.3. <i>Factores psicológicos</i>	28
3.1.3.1. Tamanho da imagem na retina	29
3.1.3.2. Perspectiva linear	30
3.1.3.3. Perspectiva aérea.....	31
3.1.3.4. Oclusão.....	32
3.1.3.5. Sombra	32
3.1.3.6. Textura	33
3.2. O ESPAÇO NA ARTE.....	33
3.2.1. <i>A estereografia criativa</i>	38
3.2.1.1. Inversão espacial	38
3.2.1.2. Escalamento espacial	38
3.2.1.3. Síntese espacial	39

4. A HOLOGRAFIA	41
4.1. HISTÓRIA DA HOLOGRAFIA	43
4.2. CARACTERÍSTICAS DOS HOLOGRAMAS	46
4.3. IMAGEM REAL E IMAGEM VIRTUAL	47
4.4. APLICAÇÕES DA HOLOGRAFIA	47
4.5. CLASSIFICAÇÃO DOS HOLOGRAMAS	50
4.5.1. <i>Hologramas in-axis</i>	50
4.5.2. <i>Hologramas off-axis</i>	51
4.5.3. <i>Holograma de transmissão de Fresnel</i>	52
4.5.4. <i>Holograma de arco-íris</i>	54
4.5.5. <i>Holograma de reflexão</i>	58
4.5.6. <i>Hologramas de transferência</i>	60
4.5.7. <i>Hologramas de amplitude / fase</i>	62
4.5.8. <i>Hologramas planos e hologramas de volume</i>	63
4.5.9. <i>Hologramas por cunhagem (embossed)</i>	65
4.5.10. <i>Hologramas de imagem</i>	66
4.5.11. <i>Hologramas estereográficos</i>	67
5. MATERIAIS DE REGISTO	71
5.1. EMULSÃO DE HALOGENETOS DE PRATA	72
5.1.1. <i>Composição</i>	73
5.1.2. <i>Formação da imagem latente</i>	75
5.1.3. <i>Processamento</i>	76
5.2. GELATINA DICROMATADA	77
5.3. FOTOPOLÍMEROS	78
6. CONDIÇÕES DE REGISTO	79
6.1. ESTABILIDADE	79
6.2. COERÊNCIA	80
6.3. EFICIÊNCIA DE DIFRAÇÃO	80
6.4. CONTRASTE E RAZÃO ENTRE OS FEIXES REFERÊNCIA E OBJECTO	81

6.5.	RESOLUÇÃO DO MATERIAL DE REGISTO	82
6.6.	POLARIZAÇÃO.....	83
6.7.	FILTROS ESPACIAIS	84
7.	PRINCÍPIOS E ASPECTOS METODOLÓGICOS	87
7.1.	PRINCÍPIOS	88
7.1.1.	<i>O modelo.....</i>	<i>89</i>
7.1.2.	<i>Registo holográfico</i>	<i>93</i>
7.1.3.	<i>A reconstrução do espaço num estereograma</i>	<i>95</i>
7.1.4.	<i>Geometria da câmara fotográfica.....</i>	<i>97</i>
7.1.5.	<i>Formas de recentragem com uma câmara fotográfica normal</i>	<i>103</i>
7.1.6.	<i>Transferência</i>	<i>104</i>
7.1.7.	<i>Dimensão da fenda.....</i>	<i>106</i>
7.1.8.	<i>Ângulo da paralaxe estereoscópica.....</i>	<i>107</i>
8.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	109
8.1.	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DE CAPTURA FOTOGRÁFICA.....	109
8.2.	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DE REGISTO HOLOGRÁFICO.....	110
8.3.	CARACTERÍSTICAS DO LASER.....	112
8.4.	PROCESSAMENTO QUÍMICO	113
8.5.	GRUPO A.....	114
8.5.1.	<i>Registo fotográfico</i>	<i>114</i>
8.5.2.	<i>Registo holográfico</i>	<i>116</i>
8.6.	GRUPO B.....	123
8.6.1.	<i>Registo fotográfico</i>	<i>123</i>
8.6.2.	<i>Registo holográfico</i>	<i>125</i>
8.7.	SOBRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	126
9.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO	131
10.	REFERÊNCIAS	135

1. Introdução

“Os homens colocados num plano afastado não têm olhos, as árvores não têm ramos, as colinas não têm rochas: são indistintos como as sobrancelhas; e as águas longínquas não têm vagas, mas elevam-se e tocam as nuvens”.

Wang Wei (séc. VIII), In I. Binyon, Introduction à la peinture de la Chine et du Japon, 1968

1.1. Apresentação

A tese que agora se apresenta é o resultado da fusão de um estudo experimental de processos para “converter” imagens 2D em imagens 3D (autoestereoscópicas), utilizando processos fotográficos e holográficos e de uma intenção exploratória artística e estética. Tal fusão, que partiu da possibilidade estabelecida no curso de mestrado de Tecnologia Multimédia da FEUP, acabou a ter a sua elaboração no Centro de Estudos de Tecnologia Óptica do Departamento de Física da FAUP.

Não deixaremos, portanto, de sublinhar, que ainda que este estudo tenha um carácter de sistematicidade óptica, ele nasce de uma interdisciplinariedade interna que no seu final compreende uma outra, mais vasta, transdisciplinar, que levará os seus resultados a atravessar outros domínios de aplicações, num futuro, esperemos próximo, como os da estética e das artes plásticas no seu geral.

Neste sentido, o que se pretendeu foi a criação de estereogramas sem a necessidade dos tradicionais apetrechos ópticos normalmente essenciais à sua correcta percepção (tais como óculos coloridos, filtros polarizadores, etc.). Assim, investigaram-se as possibilidades da holografia estereoscópica; a tridimensionalidade construída a partir de diferentes imagens 2-D.

As imagens 2-D foram, para o efeito, criadas através de um programa de computador e posteriormente capturadas em registo fotográfico (filme de diapositivos). Os fotogramas daí decorrentes, ao conterem a informação (bidimensional) do objecto de vários pontos de vista, permitiram, ao fazer corresponder a cada fotograma um holograma na placa holográfica (holograma elementar), que a série sequencial de hologramas elementares adjacentes (o holograma estereográfico total) reconstruísse estereoscopicamente espaços tridimensionais.

1.2. Resumo capitular

Iniciamos, deste modo, este trabalho com uma abordagem às questões que se prendem com as características e propriedades da luz (capítulo dois), onde são analisadas

noções fundamentais como as de frequência, de comprimento de onda, de amplitude, de fase, de interferência, de polarização e de coerência.

De Pitágoras aos contributos da mecânica quântica, foi realizado um percurso histórico-científico no qual se sintetizaram aspectos significativos ao objectivo concreto desta investigação.

Assim, a análise do espaço desenvolveu-se levando em linha de conta as relações espaciais no sujeito-objecto (capítulo terceiro). Nesta configuração, foram abordadas as questões consensualizadas sobre a visão e a percepção do espaço, nas suas manifestações psicológicas, fisiológicas e físicas. Foram ainda consideradas as formas paradigmáticas da evolução da representação do espaço nas artes plásticas.

Os contributos de Bernardo, Thompson, Okoshi, Mueller, Panofsky, White, Ivins, Pinchbeck e Mondrian entre outros, sugeriram-se imprescindíveis, apresentando-se num riquíssimo leque, abrindo-se desde as ciências exactas às experiências artísticas.

A travessia pela recente história da holografia, desde Gabor passando por Leith e Upatnieks, Denisyuk, Cross, a DeBitetto e Benton, pareceu-nos ser de todo necessária como balanço para nos debruçarmos, desde aí, às características dos hologramas e suas aplicações em geral, até à análise, mais vasta, sobre as diferentes formas de classificações e tipos de hologramas (capítulo quarto).

Nesta continuidade, o capítulo quinto cruza os aspectos técnicos relativos aos materiais normalmente usados como suporte do registo de hologramas de exibição. A sua análise, conduziu-nos à escolha da emulsão de halogeneto de prata, pelas suas características práticas e funcionais (tal como se poderá constatar em Bjelkhagen entre outros).

O sexto capítulo vem, sequencialmente, abordar o tratamento das questões práticas da holografia em geral, fazendo uma resenha dos factores e condições necessários para uma boa qualidade do registo holográfico.

Os princípios e os aspectos metodológicos que presidiram aos contornos da experimentação reúnem-se no sétimo capítulo. Neste, a análise incide sobre as implicações das geometrias de captura fotográfica e de exposição holográfica e suas inter-relações, bem como, as contribuições da frequência de amostragem/dimensão da fenda na qualidade de reconstrução estereoscópica.

Desta metodologia os resultados experimentais apresentam-se, assim, ao longo do capítulo oitavo, sendo por este que algumas das conclusões se podem já antever.

O nono capítulo, que abrange as conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro, encerra o conjunto e a síntese das investigações tratadas neste trabalho.

1.3. Sobre o contexto teórico-prático.

De um modo geral o contexto no qual se desenvolveu a investigação não prescindiu do rigor experimental. O seu sucessivo desenvolvimento foi executado passo a passo numa busca praxiológica que todavia nunca perdeu de vista o terreno da idealização do qual afinal partiu.

Poderemos dizer que a vivência contextual desta investigação corroborou totalmente o que a epistemologia no seu aprofundamento teórico-prático vem afirmando desde há trezentos anos, o princípio do circuito “mirabolante” entre a hipótese e a prova. Com efeito, no universo da minha experiência artística, a relação teoria-prática prescinde da adequação das provas e prescinde de tal modo que nesse universo o desafio torna-se exactamente a subversão das provas, tal é o caso flagrante do surrealismo, por exemplo. A disciplina e o rigor na adequação à realidade reafirmam este diferencial entre ciência e arte. Mas, se por um lado, este ressalta evidente no seu processo construtivo, por outro, acabamos a compreender que apenas se atravessam caminhos diferentes para se chegar a um mesmo fim e que, nesses diferentes caminhos, um mesmo labor se mantém na procura do conhecimento que seguirá sendo sempre um processo criativo e em construção. Conhecimento e criação, parecem assim pertencer ao mesmo patamar, ao de uma razão imaginante; usem as linguagens que usarem, lógica-matemática ou poética, experimental ou simplesmente mimética.

Estariamos pois em crer que a afirmação de Pessoa recobra sentido cada vez mais vivo e com este afirmaríamos também que é tão bela a Vénus de Milo como o binómio de Newton.

2. A luz – características e propriedades

A luz sempre atraiu a atenção de muitos estudiosos, desde os filósofos aos cientistas, originando ao longo da história várias teorias acerca da luz. Pitágoras (séc. VI a.C.), por exemplo, considerava-a constituída por raios que saíam dos olhos. Outros, como Epicuro (séc. III a.C.), consideravam a luz como tendo origem em fontes exteriores que emitiam raios que ao serem reflectidos pelos objectos penetravam nos olhos. Só no século X, da nossa era, é que a teoria de Epicuro foi unanimemente aceite, tendo ficado a dever-se ao esforço do matemático e físico árabe Alhazen (Bernardo, 1995).

Entre os fundadores da ciência moderna encontramos, ao lado de Galileu (1564-1642) e Isaac Newton (1643-1727), o holandês Cristiaan Huygens (1629-95). Huygens, defendia que a luz não arrastava matéria no seu movimento e era constituída por ondas, movimentos vibratórios propagando-se no espaço, como as ondas do oceano – **teoria ondulatória da luz**.

Com o surgimento da teoria da emissão – **teoria corpuscular da luz** – de Newton, geraram-se várias rivalidades que só terminaram no século seguinte com as

contribuições de Young (1773-1829) e Fresnel (1788-1827) a favor da teoria ondulatória. No entanto, continuava, por explicar a natureza do meio, o éter, onde se propagavam essas vibrações luminosas.

Muito se escreveu sobre este assunto, mas só com base nas experiências de Michelson - Morley (1887) foi possível provar não existir tão “misterioso” éter (Bernardo, 1995).

Foi Einstein que em 1905, retomando em parte a teoria corpuscular de Newton e recordando a lei dos quanta de Planck, “ainda duvidosa e aplicada ao problema restrito do corpo negro”, “teve a ideia de que a energia luminosa se encontra sempre concentrada sob a forma de grãos, os «quanta de luz» a que agora chamamos fótons” segundo a fórmula de Planck (Lochak, 1969).

$$E = h \nu \quad (2.1)$$

onde: h é a constante de Planck;
 ν é a frequência.

Actualmente, e fruto da mecânica quântica, deixou de existir contradição entre os conceitos de partícula e onda. Assim, a interpretação de um fenómeno electromagnético pode ser feita utilizando na descrição termos de onda ou de partícula, dependendo apenas da facilidade na exposição (Bernardo, 1995).

Apesar de, hoje em dia, palavras como **frequência** ou **comprimento de onda** serem usadas quotidianamente, poderá ser útil relembrar o seu significado. Assim, consideremos o fenómeno produzido quando se deixa cair uma pedra na superfície calma

de um lago; podemos ver, desde logo, ondas circulares oriundas do ponto de impacto da pedra e que progressivamente se afastam, pouco a pouco, até cobrir toda a superfície. Pode constatar-se facilmente que as ondas se propagam com uma certa velocidade, sendo contudo menos evidente que a matéria, neste caso a água, não é também arrastada na propagação, o que pode ser evidenciado se colocarmos uma rolha a flutuar. Esta descreve um movimento vibratório vertical, isto é, sobe e desce ao ritmo da passagem das ondas sem se afastar do ponto onde foi colocada. A propagação da onda não é, portanto, “uma propagação de matéria, mas sim uma «maneira de ser» da matéria” (Lochak, 1969).

Esta oscilação revela a periodicidade do fenómeno ondulatório. Se definirmos o **período da onda** (t) como o tempo que decorre entre dois instantes sucessivos em que a rolha ocupa a mesma posição, por exemplo, o seu ponto mais alto, a **frequência da onda** que se designa pela letra grega ν (niu) será igual ao número de períodos por unidade de tempo.

Além da periodicidade temporal, pode verificar-se que, na onda, a distância entre duas cristas ou duas depressões sucessivas é sempre a mesma; a esta distância dá-se o nome de **comprimento de onda** e designa-se pela letra grega λ (lambda). Assim, como durante um período de tempo t , a onda avança um comprimento igual a λ , se representarmos por c a velocidade de propagação, teremos a seguinte relação fundamental:

$$\lambda = c t \tag{2.2}$$

Torna-se portanto equivalente falar de frequência, período ou comprimento de onda, desde que se conheça a velocidade de propagação da onda no vazio que é para a luz, denominada pela letra c , cerca de 300.000.000 Km/s.

No entanto, para caracterizar completamente uma onda, ainda é necessário definir mais duas grandezas. A primeira, muito simples, é a sua **amplitude**. O seu valor é igual a metade da distância vertical entre a crista e a depressão da onda; no caso do nosso exemplo, é igual a metade daquilo que normalmente se designa por altura da vaga. A outra grandeza, mais subtil, é a **fase**.

Para compreender esta noção fundamental, consideremos agora um outro exemplo, em tudo semelhante ao primeiro. Deixamos cair simultaneamente, de alturas iguais, duas pedras idênticas, em dois pontos diferentes do lago, dando assim origem a duas ondas com o mesmo período, a mesma amplitude e a mesma velocidade de propagação (ondas mutuamente coerentes). Estas ondas, ao atingirem a rolha, fazem com que esta comece de novo a oscilar verticalmente. A questão agora a saber é se esta vibração tem maior ou menor amplitude do que no primeiro exemplo (uma só pedra).

Se a rolha se encontrar num tal ponto que receba a primeira crista de cada uma das ondas, então continuará a receber ao mesmo tempo todas as outras; nesta situação hipotética, as ondas conjugam os efeitos e a oscilação da rolha terá o dobro da amplitude em relação àquela em que se atirou apenas uma pedra. Se, em contrapartida, a rolha se encontrar numa posição em que coincide a depressão de uma onda com a crista de outra, os efeitos anular-se-ão constantemente e a rolha permanecerá imóvel. No primeiro caso em que as ondas estão em fase, ou em concordância de fase, diz-se que ocorreu uma **interferência construtiva**; no segundo caso, em que as ondas estão em oposição de fase diz-se que ocorreu uma **interferência destrutiva** (note-se que todas as situações intermédias são igualmente possíveis).

Na figura 1 está representado esquematicamente a interferência entre as ondas provocadas pela queda de duas pedras. Os círculos desenhados a cheio representam as

cristas das ondas no instante da observação e os círculos a tracejado as depressões. O lugar geométrico dos pontos em que as duas ondas têm entre si uma mesma diferença de fase é uma hipérbole cujos focos são C_1 e C_2 . Uma das hipérboles corresponde a uma diferença de fase de 2λ e as ondas estão em fase; os pontos a cheio são as cristas da onda resultante e os pontos vazios as depressões. A outra hipérbole corresponde a uma diferença de fase de $4,5\lambda$, as ondas estão em oposição de fase e o nível da água não é alterado.

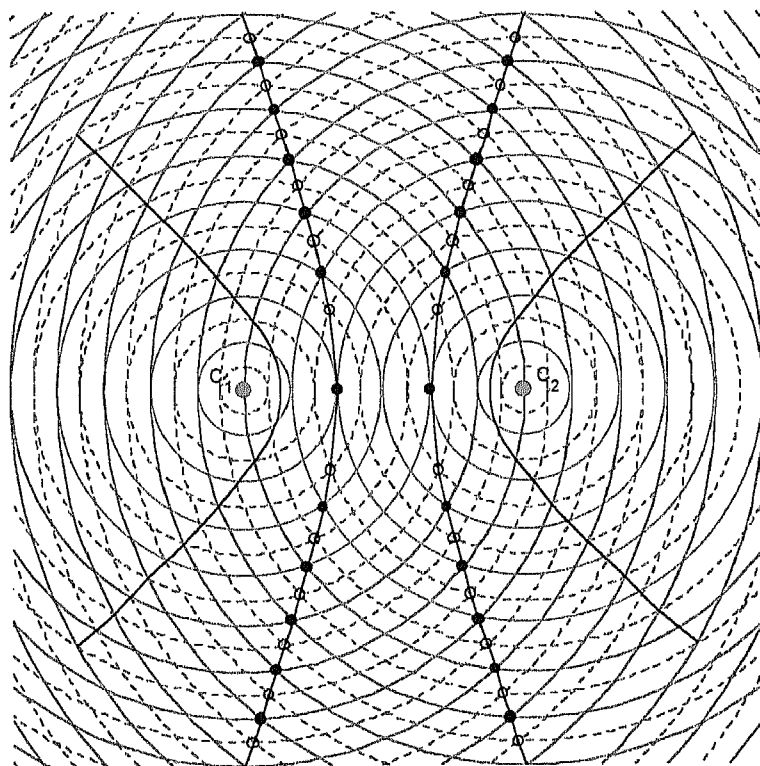


Figura 1 – Interferência entre as ondas provocadas pela queda de duas pedras (adaptado de Lochak, Quanta, Grãos e Campos, 1969).

A interferência, é um fenómeno que ocorre sempre que duas ou mais ondas, mutuamente coerentes, se sobrepõem espacialmente. Manifesta-se, no caso da luz, pelo aparecimento de distribuições luminosas de intensidade variável que quando observadas, por exemplo num plano, são constituídas por zonas luminosa e escuras, chamadas franjas

de interferência. A sua intensidade e separação contêm, respectivamente, a informação da amplitude e da fase das ondas intervenientes.

A representação gráfica da propagação de uma onda faz-se por uma sinusóide, função de z , a deslocar-se na direcção de z com a velocidade v (figura 2). A esta velocidade, que depende do meio em que a onda se propaga, chama-se vulgarmente **velocidade de onda** ou com mais rigor **velocidade de fase**. Quando este meio é o vazio a velocidade de fase é igual à velocidade da luz, denominada pela letra c (Bernardo, 1995).

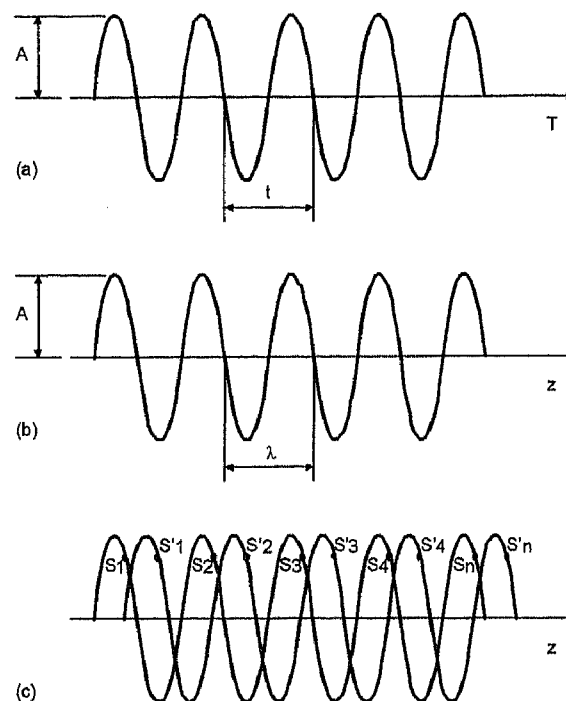


Figura 2 – (a) Representação esquemática de uma onda sinusoidal no tempo, para um ponto fixo do espaço. (b) A mesma onda no espaço para um dado instante. (c) A mesma onda sobreposta após um intervalo de tempo. Os pontos originalmente situados em S_1, S_2, S_3, S_n percorrem uma distância vt , e encontram-se agora em S'_1, S'_2, S'_3, S'_n . Depois de um tempo t (período da onda), os pontos S'_1, S'_2, S'_3, S'_n terão percorrido a distância $vt = \lambda$; encontrando-se então em S'_2, S'_3, S'_4, S'_n ; a onda terá retomado à sua forma original.

O **índice de refração** (n) de um meio é o quociente entre a velocidade da luz no vazio e a velocidade de propagação de fase (equação 2.3).

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

onde: c é a velocidade da luz no vazio; e

v é a velocidade de propagação de fase

Quando o seu valor depende da frequência (ou comprimento de onda) diz-se que o meio é **dispersivo**. É o fenómeno de dispersão que ocorre, por exemplo, num arco-íris produzido quando um feixe de luz branca é refractado por um prisma ou por uma gota de água de uma nuvem.

Existe uma outra característica inerente a qualquer tipo de ondas que é a **polarização**; esta está ligada à direcção da oscilação da perturbação ou da grandeza física associada à onda.

A luz do sol ou de outra qualquer fonte luminosa é geralmente despolarizada. O mesmo acontece com a luz dos laser. Luz despolarizada é toda aquela em que a polarização varia aleatoriamente no tempo. No entanto, existem meios que permitem transformar, por absorção selectiva, luz despolarizada em luz altamente polarizada; são os **polarizadores lineares** (figura 3) (Bernardo, 1995). Existem ainda os **polarizadores circulares** ou lâminas retardadoras de $\frac{1}{4} \lambda$, e, as lâminas retardadoras de $\frac{1}{2} \lambda$. As **lâminas retardadoras de $\frac{1}{4} \lambda$** transformam a polarização linear em polarização circular ou elíptica e vice-versa. As **lâminas retardadoras de $\frac{1}{2} \lambda$** rodam apenas a direcção da polarização linear, continuando a polarização a ser linear mas com uma direcção diferente (idem).

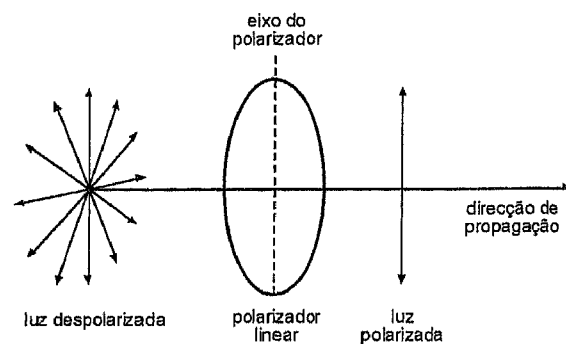


Figura 3 – Esquema da transformação de luz despolarizada em luz polarizada linearmente através de um polarizador linear.

Nos lasers, a obtenção de luz linearmente polarizada faz-se com a chamada **janela de Brewster** que é uma lâmina dielétrica colocada num ângulo tal (ângulo de Brewster) que por reflexão selecciona a direcção de uma determinada polarização (Bernardo, 1995).

2.1. Coerência da luz

Quando os fótons emitidos por uma fonte de luz tem todos a mesma energia e , portanto, uma única frequência ou cor, denomina-se luz **monocromática** ou **temporalmente coerente**. Se, pelo contrário, os fótons são emitidos com diferentes energias, a luz emitida será constituída por um elevado número de comprimentos de onda que formam o seu espectro; é o caso do sol ou das vulgares lâmpadas de iluminação. Estas fontes de luz branca não possuem nenhum mecanismo de sincronização, nem no tempo nem no espaço, e por isso diz-se que são fontes incoerentes. As únicas fontes que se podem considerar coerentes são os lasers.

Os lasers, com efeito, são as únicas fontes que para além de emitirem numa única frequência, **coerência temporal**, emitem também como se toda a fonte fosse apenas gerada por um único átomo, **coerência espacial**. Isto é, todos os fótons, para além de terem a mesma energia, tem a mesma fase. Quando uma luz é temporal e espacialmente coerente diz-se apenas coerente. Os lasers são as fontes ideais para aplicações que exijam, tal como a holografia, um elevado grau de coerência.

A luz emitida pelos lasers, para além de possuir uma grande coerência tem também um grande grau de **colimação**, isto é, a divergência do feixe emitido é muito pequena – normalmente menos de 1:1000.

Quando se trata de radiações na faixa do espectro visível falamos, normalmente, de comprimento de onda em vez de frequência, que como se sabe estão relacionados segundo a seguinte igualdade:

$$\nu \lambda = c \quad (2.4)$$

onde: ν é a frequência;

λ é o comprimento de onda; e

c é a velocidade da luz no vázio.

Assim podemos descrever o comprimento de onda de um laser de He-Ne como sendo 632,8 nm.

Para a luz branca, o comprimento de coerência é apenas alguns nanómetros, para a luz filtrada de uma lâmpada de arco-mercúrio (a usada por Gabor nas suas experiências) é apenas alguns milímetros; mas o comprimento de coerência da luz de um laser pode ser

de 1 ou 2 centímetros a vários metros, dependendo do tipo de laser e de possuir, ou não, um *etalon* (dispositivo óptico que permite aumentar a qualidade monocromática da luz de um laser). Uma forma comum de *etalon*, consiste em duas lâminas de vidro paralelas, inseridas no interior da cavidade de ressonância do laser e separadas de tal maneira que de um feixe de luz incidente, quase monocromático, apenas emergem os comprimentos de onda que são submúltiplos integrais do dobro da separação das lâminas e, portanto, luz monocromática.

Um processo usual para construir fontes de luz branca com maior coerência espacial consiste em usar uma lâmpada de filamento em que este é focado por uma lente para formar uma pequena imagem concentrada, cujo tamanho ainda pode ser mais restringido pela interposição de um diafragma de íris ou *pinhole* (figura 4).

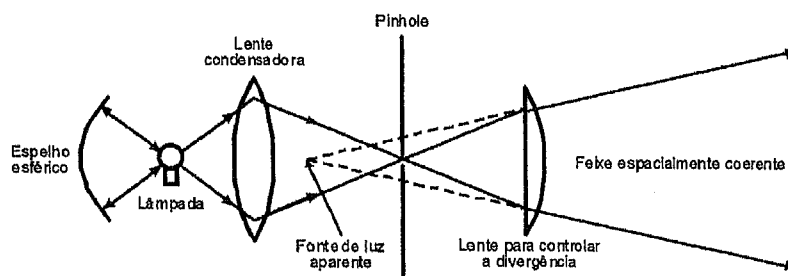


Figura 4 – Diagrama da geometria para produzir um feixe de luz branca com maior coerência espacial.

2.2. Luz visível

A **luz visível**, por normalização da CIE (*Comission Internationale d'Éclairage*) é limitada pelos valores de comprimento de onda de 380 nm a 780 nm (figura 5).

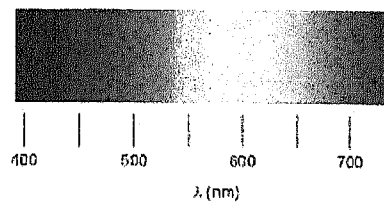


Figura 5 – Representação esquemática do espectro da luz visível em função do comprimento de onda, expresso em nanómetros.

A gama de radiações electromagnéticas considerada como **luz** inclui, para além da luz visível, os infravermelhos e os ultravioletas. A razão desta classificação fica a dever-se ao facto de que os componentes e instrumentos usados com estas frequências (luz visível, infravermelhos e ultravioletas) serem essencialmente do mesmo tipo, enquanto que o mesmo não se passa para o resto do espectro electromagnético, que se estende desde as frequências de rádio até às frequências da radiação gama (γ) como se pode ver esquematicamente da figura 6.

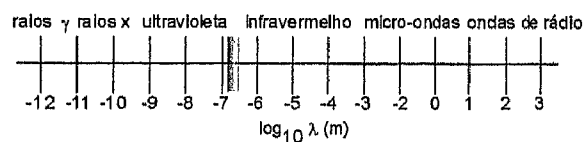


Figura 6 – Representação esquemática do espectro da radiação electromagnética, em função do comprimento de onda, expresso em metros, numa escala logarítmica.

3. A visão e o espaço

Ver é um dos fenómenos sensoriais, tal como ouvir e cheirar, que nos permite à distância ter um conhecimento natural do mundo. O olho é muitas vezes descrito como uma câmara fotográfica. Contudo, são as características não fotográficas da percepção as mais interessantes.

O olho, apesar das semelhanças, é muito mais complexo e adaptável que uma câmara fotográfica. De facto, em termos ópticos o olho humano é composto essencialmente, tal como uma câmara fotográfica, de uma lente e uma cavidade por onde se propaga a luz até ao material fotossensível (figura 7). No olho, a lente é constituída pela **córnea** e pelo **cristalino**, entre as duas situa-se a **íris** cuja finalidade é controlar a abertura por onde passa a luz. Essa abertura, chamada **pupila**, tem um diâmetro que pode variar entre 2 e 8 mm, de acordo com a luminosidade. A luz, após passar o cristalino, é projectada na superfície interna do olho, chamada **retina**. À parte central da retina situada no eixo óptico do olho chama-se **fóvea**.

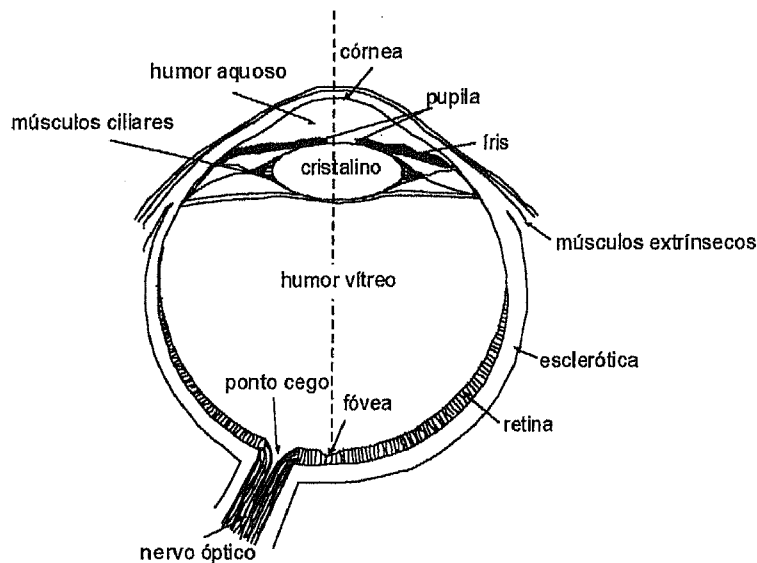


Figura 7 – Representação do olho humano em corte longitudinal.

A retina é constituída por células sensíveis à luz (células fotorreceptoras) de dois tipos: os **bastonetes** (cerca de 120 milhões em cada olho) e os **cones** (cerca de 6 milhões em cada olho), cujas formas deram origem aos seus nomes (Bernardo, 1995).

As células fotorreceptoras contêm um ou mais pigmentos que respondem quimicamente à luz. Estruturalmente, uma das substâncias químicas implicadas na visão, é a vitamina A, razão pela qual a alimentação interfere na visão.

Os bastonetes, apenas sensíveis à luminosidade, e os cones, à cor, não se distribuem uniformemente na retina. A fóvea, região onde se encontra projectado o centro do campo visual, não possui bastonetes mas é onde reside a maior densidade de cones que decresce para a sua periferia. Factos pelos quais os objectos situados na periferia do campo visual ou em ambientes mal iluminados não têm cor. A fóvea é a zona que proporciona o maior detalhe visual.

A sensibilidade dos bastonetes é tal que podem, sob determinadas condições, “ver” um único fotão. Assim, quando pretendemos analisar um objecto em ambientes de pouca luz, olhamo-lo de lado, fazendo com que a sua imagem se forme na região periférica

da fóvea onde se encontra a maior densidade de bastonetes. Existem três tipos de cones consoante são sensíveis ao azul, ao verde e ao amarelo.

A zona da retina onde começa o **nervo óptico** não possui células fotorreceptoras, sendo por isso, chamado **ponto cego**. Contudo a descontinuidade provocada na imagem não afecta o processo normal de visão.

As informações recolhidas na retina seguem por vias distintas conforme são geradas no lado exterior ou interior (nasal) da mesma. As informações recolhidas pelas retinas dos lados nasais cruzam-se seguindo para lados opostos do cérebro. As informações provenientes dos lados exteriores das retinas seguem para o mesmo lado do cérebro. Isto quer dizer, obviamente, que o córtex visual do lado direito recebe todas as informações do campo visual esquerdo e o córtex visual do lado esquerdo recebe todas as informações do campo visual direito (figura 8).

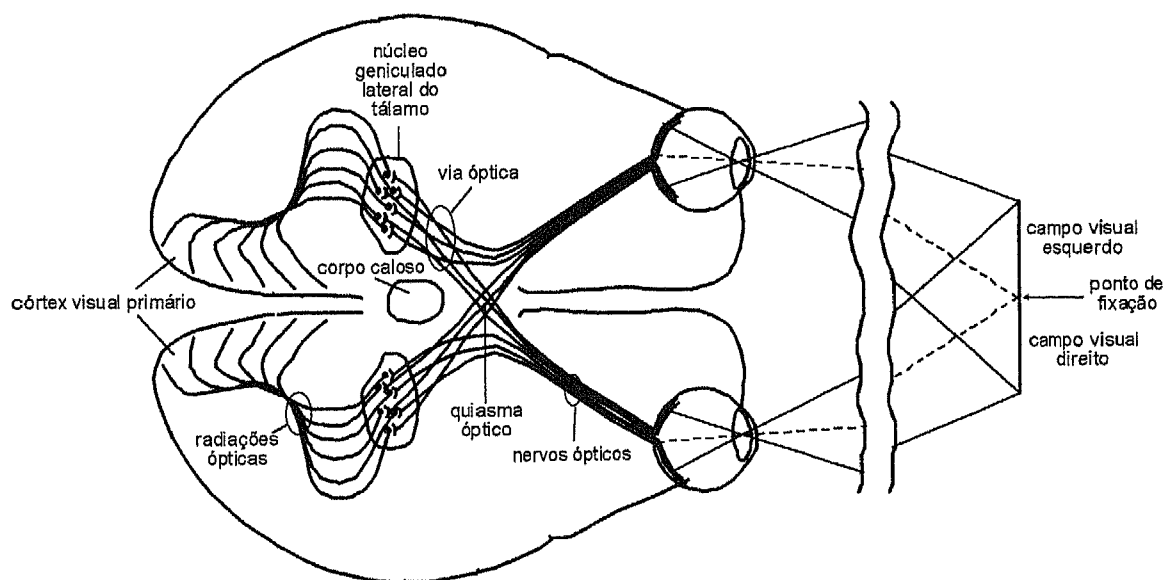


Figura 8 – Representação esquemática dos percursos visuais.

Este cruzamento da informação, transportada pelas fibras nervosas, tem lugar no **quiasma óptico**. As fibras que transportam a informação do quiasma ao sistema nervoso

central são chamadas **via óptica**. A via óptica liga-se ao núcleo geniculado lateral do tálamo por sinapses que se prolongam até ao córtex cerebral.

O **núcleo geniculado lateral** é composto por seis camadas completamente separadas em termos de informação vinda dos olhos. As primeira, terceira e quinta camadas do núcleo geniculado lateral esquerdo recebem informação da metade esquerda da retina esquerda, e as segunda, quarta e sexta camadas recebem informação da metade esquerda da retina direita, e vice-versa para o núcleo geniculado lateral direito (Thompson, 1985). Poderia, assim, parecer ser este cruzamento de informação o factor que permite a percepção da profundidade, mas está provado, por experiências, não ser este o único mecanismo; por exemplo, quando o corpo caloso é cirurgicamente cortado a percepção de profundidade deixa de existir.

3.1. Percepção da profundidade

Apesar de Leonardo da Vinci ter estudado e desenhado a anatomia humana extensamente, os seus desenhos do aparelho visual nunca chegaram a revelar o verdadeiro arranjo anatómico da visão binocular. No entanto, as suas observações artísticas acerca do problema da representação do espaço estavam muito para além do seu tempo. Leonardo escreveu que a arte da pintura nunca poderia reproduzir o espaço porque à pintura falta-lhe a qualidade do relevo dos objectos.

Um aspecto importante do fenómeno da percepção da profundidade reside no facto dos planos da acomodação e da convergência serem coincidentes; isto é, na visão

natural, a convergência dos olhos é automaticamente dirigida para a mesma distância a que os olhos se encontram focados e vice versa. Contudo, uma imagem estereoscópica não pode ser vista sem uma separação destas duas funções – um facto que é muito importante nos sistemas de projecção 3D, principalmente para grandes espaços. Por exemplo, se o observador estiver sentado a 5 metros do ecrã, os seus olhos estarão focados para esses mesmos 5 metros independentemente do lugar onde o objecto parece estar (na superfície do ecrã, atrás do ecrã ou no meio da sala entre o ecrã e o observador). Existem portanto variáveis que devem ser consideradas, porque quanto maior for a separação entre os planos onde os objectos parecem estar e a convergência maior é, também, a probabilidade de desconforto.

3.1.1. Factores físicos

Das características físicas do olho humano, as mais importantes para o estudo da percepção da profundidade são:

- **A distância inter-pupilar** – em média 6,5 cm no adulto;
- **diâmetro da pupila** – 2 a 8 mm dependendo da intensidade luminosa;
- **campo visual** – o campo visual pode ser subdividido em três grupos, cujos ângulos de cobertura podem ser vistos na figura 9.

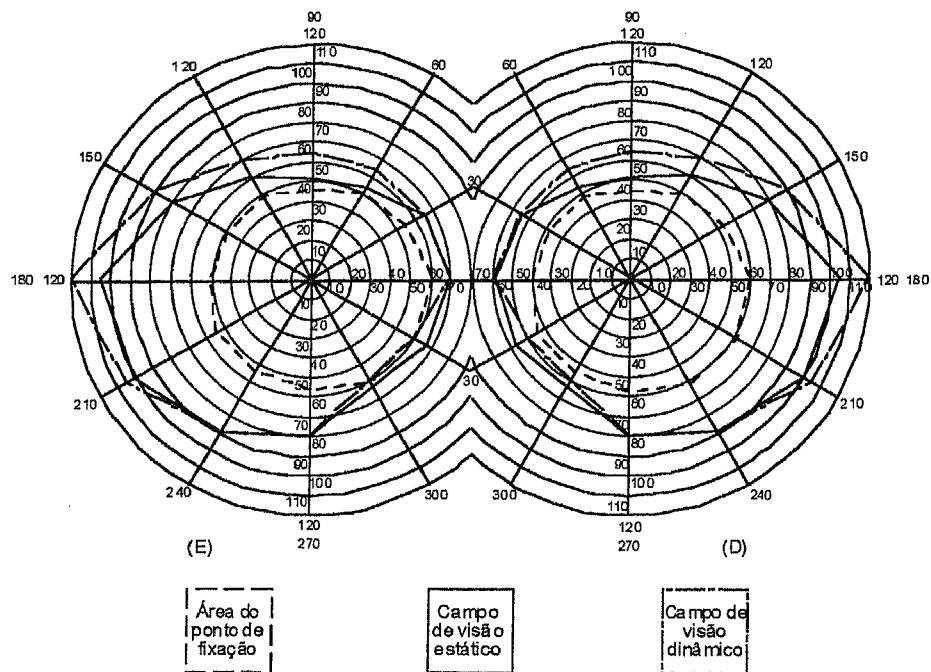


Figura 9 – Área dos campos de visão em graus. (E) olho esquerdo, (D) olho direito (adaptado de: Okoshi, Tree-Dimensional Imaging Techniques, 1976).

3.1.2. Factores fisiológicos

As principais características fisiológicas contribuintes para a percepção da profundidade são:

- A acomodação;
- A convergência;
- A paralaxe binocular (disparidade binocular);
- A paralaxe monocular (movimento monocular).

3.1.2.1. Acomodação

Chama-se **acomodação** ao ajuste na distância focal do cristalino, obtida através da tensão muscular exercida pelos músculos ciliares no cristalino. Esta aumenta com a diminuição da distância do observador ao objecto. A acomodação, contribui para a percepção da profundidade para distâncias inferiores a dois metros, mesmo na visão monoscópica (Okoshi, 1976).

3.1.2.2. Convergência

A sensação de profundidade produzida pela **convergência** dos olhos resulta da tensão no conjunto dos músculos que controlam o seu movimento. A sua grande importância reside no facto de poder controlar a coincidência das imagens por forma a permitir a sua fusão binocular (Okoshi, 1976).

A convergência acompanha-se de uma acomodação e, quando é provocada pela observação de um pormenor a curta distância, de uma contracção da pupila o que permite uma maior profundidade de campo.

Da convergência dos olhos resulta também um fenómeno percebido como imagens duplas, cruzadas e não cruzadas. Por outras palavras: os objectos que se encontram dentro do campo de visão e estão mais próximos do que o ponto sobre o qual os olhos convergem, surgem duplamente e cruzados e, os objectos mais distanciados do que o ponto de convergência, surgem duplamente e não cruzados. O papel destas imagens duplas na percepção da profundidade, por si só, é tão difícil de determinar como o das imagens desfocadas. Ambos os fenómenos são quase subliminares, sendo ignorados na percepção

normal e quotidiana. Na verdade, é difícil apercebermo-nos destas imagens, desfocadas ou duplas, sem algum esforço mental.

A convergência, por si só, apenas contribui para a percepção da profundidade até cerca dos 10 metros (Okoshi, 1976).

3.1.2.3. Paralaxe binocular (disparidade binocular)

A **paralaxe binocular** ocorre sempre que em pontos correspondentes das retinas se formam imagens diferentes. Isto é, quando observamos um objecto, os olhos fixam-se num ponto desse objecto (ponto onde convergem), a imagem desse ponto foca-se em ambos os olhos no centro da retina, isto é na fóvea de cada um dos olhos. Contudo, todos os outros pontos do objecto, não se focam sobre a fóvea, nem tão pouco nas mesmas posições relativas à fóvea, ou seja, não têm posições correspondentes nas retinas. É, precisamente, esta disparidade entre as imagens que se formam nos olhos que permite perceber as diferenças nas distâncias em profundidade.

Para que melhor se entenda este factor, considerado o mais importante para a percepção da profundidade, será necessário recorrer ao horóptero. O horóptero é um círculo que passa pelo ponto de convergência e pelos centros dos cristalinos dos dois olhos (figura 10). Suponhamos que os dois olhos estão a convergir no ponto P. Traçando duas linhas rectas que passam pelos centros dos cristalinos (O_1 e O_2) e unem o ponto M às fóvea de ambos os olhos, os pontos P_1 e P_2 , torna-se evidente que qualquer ponto fora do círculo que passa por P e O_1 e O_2 , a que se chama horóptero, por exemplo o ponto Q na figura, não se foca em posições correspondentes nas retinas.

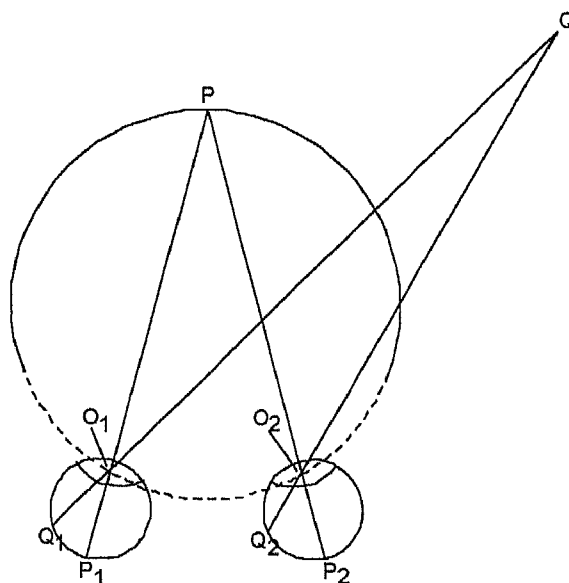


Figura 10 – Horóptero. Os pontos O1 e O2 representam os centros dos cristais, P o ponto de convergência, P1 e P2 as imagens nas retinas do ponto P, Q um ponto exterior ao horóptero e Q1 e Q2 as imagens nas retinas do ponto Q.

Para um observador saudável, a estereoscopia binocular é efectiva para distâncias compreendidas entre os 25 cm e os 500 m (Bernardo, 1995) e a mínima discrepância passível de ser interpretada como visão estereoscópica é de cerca de 30'' (**resolução angular**); o que se traduz, por exemplo, numa capacidade de discriminar diferenças mínimas de 8 centímetros a distâncias de 10 metros ou de 8 metros a 100 metros (Okoshi, 1976).

Quando a disparidade é muito grande, ao tentar fazer a fusão estereoscópica, ocorre uma alternância entre as duas imagens que parece variar com a maior concentração num ou noutro olho (Bernardo, 1995). É esta alternância que explica a cintilação das cores de um diamante (efeito de Chesire) (idem).

Uma das possíveis aplicações práticas da disparidade binocular é a sua utilização como comparador de objectos ou imagens similares. Por exemplo, uma imagem

fotográfica obtida através de um telescópio é comparada com outra tirada uns dias depois. Qualquer ponto de luz que tenha surgido ou tenha deixado de existir pode ser facilmente detectado, mesmo no meio de milhares de outros pontos luminosos desde que a cada olho corresponda uma das fotografias.

3.1.2.4. Paralaxe monocular (movimento monocular)

A **paralaxe monocular** é a percepção de profundidade que ocorre quando o observador, vendo apenas através de um olho, se desloca. Se a posição do observador for fixa, a acomodação é o único factor fisiológico que contribui para a percepção da profundidade. No entanto, se o observador (ou o objecto) estiver em movimento, principalmente quando este movimento é rápido, a sucessão de imagens que se formam na retina, durante essa deslocação, permitem uma percepção da profundidade.

3.1.3. Factores psicológicos

Para além das características físicas e fisiológicas antes mencionadas, também alguns factores psicológicos, associados à experiência e à imaginação, dão o seu contributo para a percepção da profundidade (consideramos aqui apenas os factores que de uma forma geral são comuns a todas as culturas civilizacionais), o que aliás tem vindo a ser, principalmente desde o Renascimento, usado nas artes plástica, nomeadamente na pintura (ver secção 3.2).

Os principais factores psicológicos são:

- O **tamanho da imagem na retina**;
- A **perspectiva linear**;
- A **perspectiva aérea**;
- A **oclusão**;
- A **sombra** (natural ou artificial);
- A **textura**.

3.1.3.1. Tamanho da imagem na retina

Pela experiência adquirimos um conhecimento prévio do tamanho relativo dos objectos. Assim, o **tamanho da imagem na retina**, sabendo que esta aumenta com a diminuição da distância e vice-versa, permite-nos, de certa maneira, fazer um cálculo intuitivo da distância a que o objecto se encontra. Esta particularidade é sobejamente usada no cinema, na fotografia e até no teatro como criadora de ilusões (figura 11). É de salientar que este fenómeno está, até certo ponto, intimamente ligado à perspectiva linear.

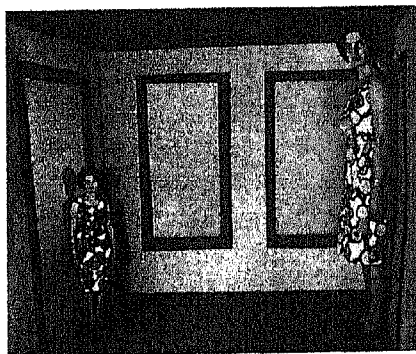


Figura 11 – Ilusão da sala deformada de Ames.

3.1.3.2. Perspectiva linear

Dos factores psicológicos o que tem maior importância para a percepção da profundidade é aquele que ocorre quando na imagem de um objecto as suas linhas estruturais aparentam convergir com a distância.

A **perspectiva linear** é na representação bidimensional a forma mais eficiente de representar o espaço. O seu poder de sugestão é tão forte que mesmo uma perspectiva linear obviamente falsa, quando bem construída, chega a dominar as outras sensações de profundidade, incluindo a sensação de profundidade binocular.

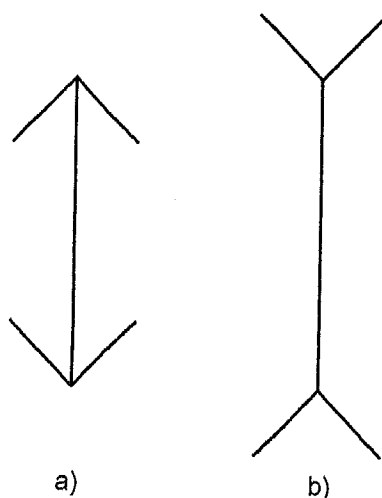


Figura 12 – Ilusão de Muller-Lyer.

À partida, a ilusão criada pela figura 12, onde a linha vertical em (a) parece ser mais comprida que em (b), poderá parecer não ter nada a ver com a perspectiva linear, mas se observarmos a figura seguinte (figura 13), compreendemos até que ponto a experiência adquirida pode contribuir para esta ilusão.

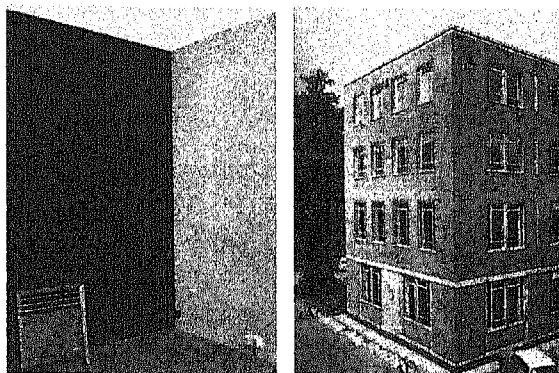


Figura 13 – Duas perspectivas lineares.

3.1.3.3. Perspectiva aérea

A **perspectiva aérea** é o esbatimento das imagens dos objectos longínquos (figura 14). Fica a dever-se ao efeito produzido pela difusão da luz nas pequenas partículas em suspensão no ar (humidade, pó, nevoeiro, fumo, poluição, etc.). Mais uma vez a experiência adquirida produz modelos de interpretação que permitem avaliar a distância a que se encontram os objectos.

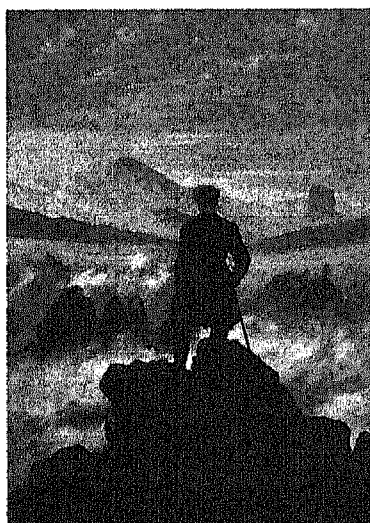


Figura 14 – Perspectiva aérea. “Voyageur au-dessus de la mer de nuages” de Caspar David Friedrich.

3.1.3.4. Oclusão

A **oclusão** é, tal como o nome sugere, a obstrução de parte ou da totalidade de um objecto (ou forma) devido à relação que se cria entre os seus contornos e os de outros objectos (ou formas). O objecto (forma) mais distante é “tapado” pelo mais próximo (figura 15).

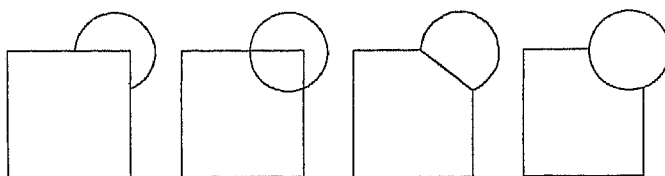


Figura 15 – Percepção da profundidade baseada na oclusão. Dos quatro grupos apresentados apenas o primeiro e o último permitem a sensação de profundidade.

3.1.3.5. Sombra

A **sombra** e o **sombreado** quando aplicada a um objecto ou às formas de um desenho ou gráfico, cria a sensação do espaço (profundidade) devido ao facto da maior parte das vezes a iluminação (natural ou artificial) vir de cima para baixo. Assim, mais uma vez, a experiência tem uma importância preponderante (figura 16).

h o l o g r a f i a

Figura 16 – Percepção da profundidade baseada na sombra. Apesar de só estarem representadas sombras, vemos os objectos que produziram tais sombras.

3.1.3.6. Textura

A **textura**, por ser mais notória ao perto, oferece também, indicativos da profundidade. Está de certo modo ligada à perspectiva linear (figura 17).

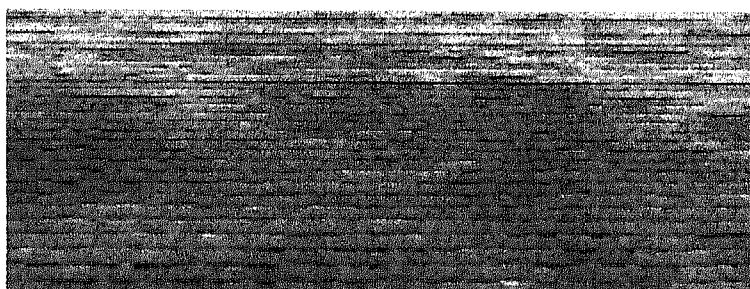


Figura 17 – Percepção da profundidade baseada na textura.

3.2. O espaço na arte

A estereografia, apesar de contar já com mais de um século, tem revelado, nos últimos anos, um novo interesse como ferramenta séria para produzir uma das formas mais revolucionárias de imagem – a imagem tridimensional – produto de um novo meio pictórico sem precedentes em toda a história de arte. Esta secção abordará a evolução da consciência, da arte e da produção de imagens, convergindo num processo que inexoravelmente conduz à imagem estereoscópica.

Muitos autores consideram que a arte de uma época reflecte a natureza da consciência dos que a produzem ou utilizam. Analisando os primeiros registos visuais, suportado pelos estudos sobre os desenhos das crianças, encontramos, na representação da

realidade, uma aceitação intuitiva de imagens com pouca precisão e pouco detalhe. Parece ser assim universal que algumas características distintivas da forma e algumas sugestões monoculares simples do espaço satisfizeram as explicações básicas da comunicação visual no amanhecer da humanidade. De facto, um exame às pinturas rupestres revela que em termos formais, a sua representação espacial se encontra muito distante das actuais formas de representação, existindo apenas, em comum, uma ligeira organização da componente espacial. Os assuntos aparecem aí confundidos e sobrepostos, sem relacionamento causal aparente entre eles. Por outro lado, nestas pinturas, não são sempre evidentes os conceitos de interior e de exterior, de cima e de baixo ou de grande e de pequeno.

Nesta continuidade, podemos aceitar que as características espaciais da arte clássica Grega e Romana são também reflexo da natureza do seu pensamento e cultura. Mueller refere-se a uma “abstraction barrier” grega (Mueller, 1967), derivada do nível linear e táctil das suas representações artísticas e visuais; limites que, segundo o mesmo autor, também são notórios na sua música monofónica e na sua matemática. Por certo, muitos artistas gregos e romanos tiveram preocupações comparáveis às dos artistas do Renascimento, mas parece ter-lhes faltado o conhecimento, a técnica, ou o desejo para compor uma estrutura espacial nas suas obras.

Freidenwald comenta que a arte chinesa também não organiza os objectos espacialmente numa única composição e a forma utilizada pelos artistas para superar esta dificuldade é o “invite the viewer to wander in a space of almost endless mists” (Freidenwald, 1955).

De acordo com Panofsky, a maneira de retratar o espaço pictórico, dos Gregos ao Renascimento, revelou uma mudança no conceito ocidental de infinidade (Panofsky,

1940). Se – continua Panofsky – examinarmos pinturas de 500 a.C. a 1400 d.C. em sequência directa, podemos ver o espaço a avançar gradualmente de inexistente a sujeito principal da obra. White considera esta evolução como uma libertação gradual do espaço pictórico relativamente ao assunto ou tema (White, 1957).

Finalmente, o processo estava completo e, com a descoberta das leis da perspectiva, o próprio espaço passou a ser sempre composto para o infinito, num ou vários pontos de fuga situados sobre a linha do horizonte, seguido pela limitação rigorosa dos objectos nesse mesmo espaço.

Desde o século XII que abundam os precursores das leis da perspectiva, mas certamente o maior contributo neste domínio, como uma nova consciência visual, foi o trabalho do arquitecto florentino Filippo Brunelleschi entre 1417 e 1420, publicado pelo seu conterrâneo, o arquitecto Leon Battista Alberti em 1435. Os primeiros pintores a utilizarem as regras de perspectiva como ilusão da realidade foram Masaccio (1421-1428) e Paolo Ucello (1396-1475) - exemplos mais paradigmáticos.

As principais determinantes de uma perspectiva são o ponto de vista do observador, a posição do plano de imagem (plano da superfície de registo) e a distância entre o observador e o objecto. Esta distância, a que vulgarmente se chama **distância principal**, afecta apenas a escala da perspectiva e não as suas proporções geométricas.

O grande poder de ilusão da perspectiva, como substituto racional para a compreensão intuitiva do espaço, reside na sua obediência às leis da óptica geométrica. Como White refere, a perspectiva permite ao artista recriar a realidade de tal modo que convence o olhar assim como a mente (White, 1957).

Mas as leis da perspectiva são finalmente quebradas pelos artistas, ironicamente devido à fotografia, porque esta obedece de uma forma cega, automática e com perfeição a essas mesmas leis. Assim, muitos artistas começaram a explorar o espaço com outras leis de organização espacial. Na segunda metade do século XIX e nas primeiras décadas do século XX presenciou-se uma ruptura com os modos tradicionais de representar a realidade, um “retrocesso”, a que Ivins chamou “the rationalization of sight” (Ivins, 1938). Uma nova consciência parecia estar a despontar.

Poderemos considerar os impressionistas entre os primeiros grupos de artistas a quebrar com as leis da perspectiva e, ao mesmo tempo, com a função imitativa da arte. Ao reconhecerem que o espaço da tela é ilusório, substituem a representação da realidade exterior por uma expressão do seu próprio interior. Este descontentamento com a tela como uma “janela” e a consciência do fosso entre realidade e ilusão é bem visível sobretudo em Cézanne e mais tarde nos cubistas.

Richardson escreverá que “the achievements of Cézanne and the non-Euclidean geometers are similar. Both showed that alternative articulations of space are as satisfying structurally as the old a priori articulations” (Richardson, 1971).

Posteriormente os cubistas na tentativa de transcender, também, os limites espaço-temporais da pintura, incluem, nas composições das suas obras, sucessivas sobreposições de pontos de vista; o mesmo é dizer, que os cubistas introduziram uma *quarta dimensão* na pintura – o tempo. Mas na “evolução” ou “retrocesso” do cubismo é atraída a atenção do artista, separando-a dos fins em direcção aos meios, quer pela abstracção e pela colagem, quer pelo relevo da superfície. É interessante notar que no cubismo tardio, visível em Picasso e noutros, as colagens tornaram-se menos abstractas e

portanto com um assunto mais evidente. Gris comentou que começava com uma abstracção como ideia e posteriormente a trabalhava no sentido de ver alguma coisa através dessa abstracção.

Depois do cubismo, a trajectória afastar-se-à definitivamente da simples representação espacial de um assunto. Podemos assim ler em Piet Mondrian: “Reality is form and space. Nature reveals forms in space” e “The expression of pure reality can only be established through pure plastics” (Mondrian, 1945). A recomendação ficou ainda pela ideia de que as formas naturais fossem reduzidas a formas elementares e as cores naturais a cores primárias.

Mas o que é a forma? Qual é a relação entre a forma e o conteúdo? Estas questões, continuam o centro das preocupações actuais.

Pinchbeck reconhece que o desarranjo da forma no expressionismo abstracto reflecte um efectivo colapso dos valores sociais. Pode ainda ler-se: “The continuation of painting and sculpture conceived as separate mediums is obsolete and that the need is for a total form in three dimensional space” (Pinchbeck, 1972).

Assistimos assim, na última década deste século, ao que muitos críticos de arte referem acerca da arte abstracta: que tendo nos seus inícios libertado o artista da imitação do espaço tridimensional numa superfície bidimensional acabou degenerando numa variedade obtusa de obras académicas. Situação de que o neo-realismo parece brotar como legítima reacção a este *estado das coisas*.

Mas o que parece ter sido ignorado, excepto por uns tantos artistas, foi a existência de uma tecnologia que permite a construção ou reprodução de espaços tridimensionais; espaços sem as limitações de uma superfície plana, nem as limitações matéricas como as da escultura.

Assim, a holografia emerge para as artes plásticas e para a expressão criativa, pela primeira vez, desde as manifestações nas paredes das cavernas, manifestações desde aí sujeitas aos processos estritamente bidimensionais ou limitado pela plasticidade matéria, como possibilidade otimizada na completa liberdade do uso não apenas na exploração das dimensões espaciais como também das dimensões temporais.

3.2.1. A estereografia criativa

Na estereografia são possíveis três categorias de manipulação: a **inversão espacial**, o **escalamento espacial** e a **síntese espacial**.

3.2.1.1. Inversão espacial

A inversão espacial (**pseudoscopia**) é o virar do avesso ou, de outro modo, a criação do espaço “invertido”. Com a inversão, os objectos alteram as suas relações no espaço. Os objectos côncavos surgem convexos e os convexos côncavos e aqueles que normalmente são vistos longe surgem em primeiro plano e vice-versa.

3.2.1.2. Escalamento espacial

Como a distância inter-pupilar é fixa, sendo em média de 60 a 70 mm, o volume dos objectos familiares e as suas relações espaciais são fixas. A variação da distância

interaxial das tomadas de vistas permite controlar este importante parâmetro. Aumentando a distância interaxial entre as tomadas de vistas (**hiperestereoscopia**) mudamos a aparência do objecto, reduzindo-o. Reduzindo a distância interaxial entre as tomadas de vistas (**hipoestereoscopia**), de uma maneira semelhante mas inversa, aumentamos a aparente dimensão do objecto. Assim, o escalamento espacial é o processo de expandir ou contrair o volume aparente do espaço.

3.2.1.3. Síntese espacial

Incluem-se, nesta categoria, todos os processos em que dois ou mais assuntos são combinados numa única imagem estereoscópica, através da técnica da divisão de imagens ou, mais frequentemente, pela sobreposição completa. De facto a síntese espacial é para o estereograma o que a montagem é para o cinema. A montagem cinematográfica permite que tomadas de vistas individuais interajam e produzam novas ideias impossíveis de produzir individualmente. O todo é maior que as partes. De uma maneira semelhante, a sobreposição de espaços estereoscópicos, que podem ser invertidos ou com escalas diferentes, cria um novo espaço com um assunto composto bastante diferente das cenas originais.

4. A holografia

É costume pensar-se que um holograma é um tipo especial de fotografia, tridimensional, o que não é de modo algum verdade, pois enquanto numa fotografia apenas é registada a intensidade da luz difundida pelos objectos que compõe a cena, num holograma é registada a amplitude e a fase dessa mesma luz.

Na fotografia a informação é registada em termos de quantidade de luz difundida pelos objectos que compõe a cena. Esse registo, em material fotossensível, manifesta-se por diferenças de densidade óptica sem quaisquer informações da fase ou da amplitude. Mesmo a fotografia a cores é um registo de intensidade, com a particularidade de ser armazenado em várias camadas. Com efeito, na fotografia a cores, as diferentes camadas de registo funcionam como várias fotografias monocromáticas, sobrepostas, onde em cada uma delas apenas é registada a intensidade da luz duma dada cor.

Num holograma, o registo, também em material fotossensível, contém a informação da amplitude e fase da luz difundida pela cena ou seja, um holograma regista um fenómeno característico das ondas conhecido por interferência.

Existe uma outra diferença, não menos importante, entre a fotografia e a holografia. Esta reside no facto de que na fotografia é sempre necessária a utilização de lentes ou outro sistema óptico, por exemplo um pequeno orifício (*pinhole*) que permita formar uma imagem no plano de registo (filme ou chapa fotográfica), enquanto que, na holografia, o plano de registo é perfeitamente arbitrário, não sendo necessário ser o plano de imagem. Em contrapartida, na holografia é sempre necessário, para além da onda vinda do objecto, uma outra onda de referência que com ela interfere no plano ou volume onde se encontra o meio de registo. Essa onda de referência, por ser conhecida, permite que a figura de interferência registada seja uma codificação da onda objecto. (Bernardo, 1995).

Muito sucintamente e em forma de introdução, diremos que um holograma é o registo, num material fotossensível, da interferência da luz difundida por um objecto ou transparência (onda objecto) e um feixe de luz de referência (onda de referência) mutuamente coerentes, isto é, com o mesmo comprimento de onda e proveniente da mesma fonte pontual (ou equivalente). Esse registo da figura de interferência, isto é o holograma, origina por difracção, quando é iluminado com um feixe de luz idêntico ao feixe de referência, várias ondas uma das quais é semelhante à onda objecto.

É precisamente essa semelhança (que apresentará aberrações se o feixe de leitura não tiver a mesma geometria e cor do feixe de referência) com a onda objecto existente na altura do registo que permite, quando captada pelos olhos do observador, criar a sensação da existência de um objecto que emite a luz difractada pelo holograma.

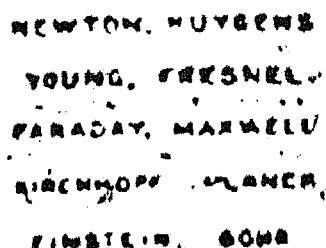
Assim a única semelhança, poder-se-ia dizer, fica-se pelo facto de ambas as técnicas usarem materiais fotossensíveis.

4.1. História da holografia

Em 1947-48 o físico húngaro Denis Gabor, fruto da sua investigação para melhorar o poder de resolução do microscópio electrónico, inventa a holografia; Gabor, propunha uma técnica que registava e reconstruía a fase da luz incidente (Gabor, 1948; Gabor, 1949). Neste processo estava presente a utilização de um feixe de luz de referência ou de fundo, transmitido através do objecto e que iria interferir com a luz refractada pelo objecto, transformando a informação da fase em variações de intensidade que poderiam, assim, ser registadas num suporte fotossensível.

Este método que ficou conhecido pelo nome de *Wavefront Reconstruction Technique* ou **Holografia** do grego *holos* que significa todo e *grafia* que significa escrita veio mais tarde a ser reconhecido e em 1971 Gabor recebe o Prémio Nobel da Física.

Todavia os hologramas assim produzidos, ainda que legíveis, apresentavam-se com uma quantidade de defeitos assinalável, consequência da pouca coerência do tipo de luz disponível na época (luz de um arco de mercúrio filtrado com um comprimento de coerência de apenas alguns milímetros) (figura 18). Foi, precisamente, essa coerência limitada que restringiu Gabor a utilizar, nos seus hologramas, objectos bidimensionais (transparências) pouco maiores que uma moeda.



NEWTON, HUYGENS
YOUNG, FRESNEL
PARADAY, MAXWELL
RICHMOND, PLANCK
EINSTEIN, BOHR

Figura 18 – Reprodução da imagem reconstruída de um dos primeiros hologramas de Gabor (retirado de Saxby, Practical Holography, 1994).

Com a invenção do **laser** (*light amplification by stimulated emission of radiation*) em 1960, por Theodore Maiman, a holografia conheceu um renovado interesse devido ao elevado grau de coerência da sua luz; tornou-se possível fazer hologramas de objectos tridimensionais. Podemos assim dizer que o aparecimento do laser deu à holografia a ferramenta que lhe faltava.

Dois anos após a invenção do laser, em 1962, o trabalho de Leith e Upatnieks (E. N. Leith, 1963; E. N. Leith, 1964) na Universidade do Michigan, apresenta uma variação da técnica de Gabor, conhecida por holografia *off-axis* (secção 4.5.2), dando início ao que se pode considerar como uma revolução na holografia.

Na ex-União Soviética, Yuri Denisyuk (Denisyuk, 1962) desenvolveu, paralelamente, uma configuração óptica radicalmente diferente da de Gabor combinada com o trabalho sobre fotografia a cor natural de Gabriel Lippmann (laureado com o Nobel da Física de 1908).

Nesta técnica, faz-se incidir os dois feixes (referência e objecto) no meio de registo fotossensível de lados opostos. Tal foi possibilitado pela colocação do meio de registo entre a fonte de luz e o objecto a registar, de tal forma que uma parte do feixe referência, não absorvido pelo material fotossensível (emulsão de halogenetos de prata), o atravessasse e seja reflectido pelo objecto, dando origem ao feixe objecto. Denisyuk conseguiu assim, em 1962, produzir hologramas que podem ser reconstituídos com luz branca.

Tratou-se com efeito de um avanço considerável, se tivermos em atenção outras configurações que requerem uma fonte de luz coerente na reconstrução.

Eliminando o paralaxe vertical, Stephen Benton produziu em 1968 (Benton, 1969) o primeiro holograma de arco-íris, um holograma de transmissão que é reconstituído com luz branca.

Em 1974, Michael Foster introduziu uma nova técnica que permite duplicar hologramas mecanicamente (Foster, 1974), tornando-se assim possível produzir em série hologramas a baixo custo. Estes hologramas cunhados (embossed), baseados na reflexão de uma fina camada de alumínio, podem ser colados sobre vários suportes, como por exemplo livros pedagógicos, publicações de arte, meios exteriores de publicidade, e até em cartões de crédito como dispositivo de segurança. Podemos assim dizer que é nos anos setenta que a holografia alcança os mercados e deste modo aufere de alguma divulgação pública.

Com efeito, o interesse pela holografia, nos últimos anos, tem ganho novas dimensões que vêm, por um lado, directamente das contribuições que esta lança no desenvolvimento, quer de novas tecnologias em óptica, quer na emergência de novos suportes fotossensíveis e processamentos químicos e, por outro, da sua utilização em novas áreas que o desenvolvimento científico, artístico e tecnológico criou.

Hoje em dia a holografia é utilizada num variado campo de aplicações que vai desde os testes não destrutivos à publicidade, passando pelas imagens aplicadas à medicina, pelas imagens de objectos museológicos, pelo registo de dados, pela criação artística e mais recentemente pelos *displays* 3D.

4.2. Características dos hologramas

Atente-se agora nas características únicas e exclusivas dos hologramas relativamente a outras formas de registo de imagens:

- A imagem ideal reconstruída por um holograma é constituída por luz rigorosamente igual àquela que emanaria do objecto usado no registo sob as mesmas condições, tem uma profundidade, uma paralaxe e uma perspectiva rigorosamente iguais ao objecto que a originou;
- A imagem holográfica, para alguns tipos de hologramas (de Fresnel), pode ser reconstituída mesmo através de uma pequena porção do holograma, tal como o vidro de uma janela que, se for quebrado, continua a deixar passar a imagem do exterior apenas reduzindo a possibilidade de pontos de vista (perspectiva);
- Um holograma não tem negativo e positivo como na fotografia;
- É possível reconstruir, a partir de certos tipos de hologramas, duas imagens, uma real e outra virtual;
- Um holograma com a forma de uma superfície de revolução fechada (cilindro ou cone) permite que o observador, ao deslocar-se à sua volta, tenha uma imagem de 360° do objecto;
- É possível, num mesmo holograma, registar mais do que uma cena, sem que estas se sobreponham na sua reconstituição.

Um holograma diz-se de Fresnel quando no registo do holograma o meio de registo (placa holográfica) se encontra próximo do objecto. Num holograma deste tipo a informação não se encontra localizada, antes pelo contrário, encontra-se distribuída por

todo o meio de registo (distribuição de Fresnel) (Bernardo, 1995). Razão pela qual se um holograma deste tipo for quebrado, a imagem do objecto pode continuar a ser reconstruída por qualquer um dos fragmentos.

4.3. Imagem real e imagem virtual

Quando um holograma de Fresnel é reconstituído surgem duas imagens, uma é a imagem virtual, a outra a imagem real. Denomina-se imagem real aquela cujos pontos são definidos pela intersecção de raios luminosos (Bernardo, 1995). A **imagem virtual** surge na posição do objecto real tendo a mesma profundidade e paralaxe, sendo portanto isenta de distorção espacial, ou seja, é **ortoscópica**. Esta imagem surge como se o observador visse o objecto por uma janela definida pelo holograma.

A **imagem real** também surge à mesma distância do holograma, mas numa posição simétrica à imagem virtual. Como todos os pontos das duas imagens estão à mesma distância do holograma, a imagem real tem uma profundidade invertida, isto é, a imagem real de um objecto convexo é uma imagem côncava, dizendo-se então **pseudoscópica**.

4.4. Aplicações da holografia

A holografia, para além de representar um dos exemplos mais fascinantes do registo de imagens, é também um meio técnico cada vez mais usado como ferramenta em

várias áreas que vão desde a ciência à publicidade. De todos os modos, a sua vulgarização está ainda longe de um verdadeiro consumo de massas, de outro modo talvez os nossos ecrãs televisivos já nos proporcionassem imagens holográficas.

Mas a holografia, apesar de só muito recentemente ter saído dos laboratórios de pesquisa, ganhou já novas áreas de aplicação, assinalando-se, por exemplo, a aplicação em sistemas de comunicação, em armazenamento de dados e em experiências estéticas ou plásticas. O uso de pequenos hologramas para prevenir falsificações em cartões de crédito, em bilhetes de ingresso em espectáculos, em embalagens de *software* de computador, etc., está a tornar os hologramas um conceito relativamente conhecido do quotidiano.

Exemplo de uma importante área de aplicação da holografia é a interferometria. Esta técnica permite que sejam feitos testes a diferentes materiais sem lhes provocar nenhum tipo de destruição. A interferometria baseia-se na particularidade da holografia permitir que, ao sobrepor-se uma imagem holográfica ao objecto que a produziu (ou a outra imagem holográfica do mesmo objecto), sejam criadas franjas de interferência que permitem, pela sua ordem de grandeza, observar e quantificar as mínimas alterações feitas no objecto após o registo (ou entre as duas imagens holográficas).

Um outro exemplo de aplicação pode ser encontrado nos sistemas de varrimento laser, existentes por exemplo em alguns leitores de código de barras que todos conhecemos das lojas comerciais. O seu princípio baseia-se num disco, chamado *hologons*, constituído por vários hologramas distribuídos ao longo da sua periferia. Estes hologramas têm como função obrigar o feixe do laser a descrever, durante a rotação do disco, um padrão de linhas previamente estabelecido; fazendo com que o feixe laser percorra a etiqueta segundo várias direcções, resultando numa leitura completa do seu conteúdo. A luz do laser reflectida pela etiqueta é encaminhada para um fotodetector que diferencia os

diferentes tipos de barras que posteriormente são decodificados por um sistema electrónico. Por último, um computador central analisa essa informação decodificando-a para o preço ou outros dados relevantes, como por exemplo aqueles necessários à manutenção dos *stocks* (Bernardo, 1995).

A holografia também é usada para fazer elementos ópticos holográficos (HOE - *holographic optical elements*). Os HOE podem funcionar como lentes, espelhos, redes de difracção, prismas e divisores de feixe (espelhos semi-transparentes), permitindo, por exemplo, montagens ópticas em espaços de tal maneira reduzidos que seriam impraticáveis para a óptica tradicional.

Embora os HOE operem por difracção, podem substituir os elementos ópticos convencionais, com uma particularidade – a sua eficiência manifesta-se apenas para uma estreita faixa de comprimentos de onda – o que pode ser uma vantagem como veremos a seguir.

Desde há uns anos a esta parte, que se utiliza uma técnica conhecida por *head-up displays* ou HUD. Um HUD é composto por um sistema que projecta uma imagem, sobre um HOE que por sua vez reflecte a imagem para o observador. A principal vantagem de um HUD é permitir que a informação projectada seja efectiva enquanto se olha para além dela. Um exemplo de como isto pode ser útil é a sua aplicação nas aeronaves, onde o piloto pode ver o espaço exterior e os instrumentos simultaneamente pois esse HUD é colocado próximo do pára-brisas. Uma outra vantagem é a imagem poder estar construída de tal maneira que a sua distância focal evite a necessidade constante de acomodação dos olhos do observador entre instrumentos e o exterior.

Uma outra área de aplicação dos HUD, ainda que a dar os primeiros passos, é na indústria automóvel, onde o condutor, à imagem do piloto de aviões, tem informações relevantes num HOE colocado junto ao pára-brisas. Estes sistemas, ou outros muito semelhantes, também podem vir a ser usados como dispositivos visuais que permitem à realidade fundir-se com a “realidade virtual”; isto permite, por exemplo, a um operário especializado, afinar, montar ou construir um aparelho sem necessidade de se afastar do mesmo para consultar as instruções ou planos.

4.5. Classificação dos hologramas

Os hologramas podem ser classificados de várias maneiras. Geralmente utiliza-se uma classificação de acordo com a geometria do registo, mas outras existem baseadas no processo de reconstrução ou na espessura do material.

4.5.1. Hologramas *in-axis*

Quando Denis Gabor fez o seu primeiro holograma utilizou objectos bidimensionais constituídos por letras opacas sobre uma transparência. A luz difractada pelas letras formava a onda objecto e a que passava sem desvios pela parte transparente a onda referência. Este tipo de hologramas, cuja geometria obriga a uma sobreposição de ambos os feixes, como se pode ver na figura 19, chamam-se hologramas *in-axis* ou em linha.

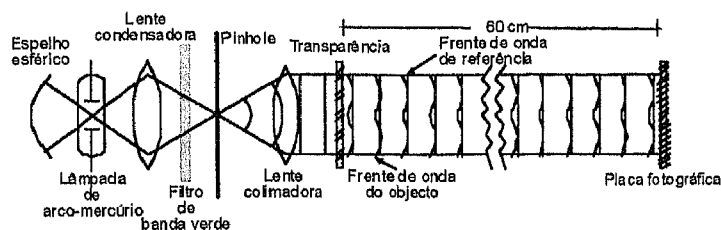


Figura 19 – Geometria em linha utilizada por Gabor.

Quando o holograma era iluminado com a fonte de luz original, surgia na posição do objecto uma imagem virtual, mas infelizmente surgia também uma outra imagem real do outro lado do holograma, perfeitamente alinhada com a imagem virtual, dificultando ainda mais a visão, já difícil devido ao encandeamento provocado pelo feixe transmitido directamente.

Actualmente, este tipo de geometria, caracterizada pela sobreposição dos eixos da onda objecto e da onda referência, ainda encontra aplicação em determinadas áreas de investigação, como por exemplo, na contagem de partículas, onde as dificuldades encontradas por Gabor, causadas pela imagem real, não se manifestam devido à sua pequena dimensão relativamente aos largos padrões de difracção. Uma outra área, não menos importante, na aplicação da holografia *in-axis* é no estudo de sistemas de combustão e aerossóis (Saxby, 1994).

4.5.2. Hologramas *off-axis*

Com a intenção de obter uma visão da imagem virtual sem o inconveniente de ser mascarada pela imagem real e pelo feixe directamente transmitido, Leith e Upatnieks (E. N. Leith, 1963; E. N. Leith, 1964) pura e simplesmente deslocaram a imagem real da sua

posição, gravando o primeiro holograma *off-axis*. A figura 20 exemplifica o princípio geométrico *off-axis*.

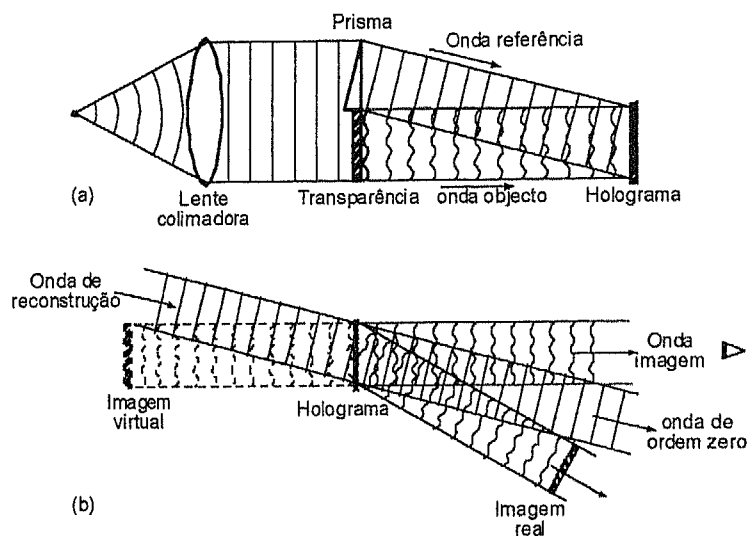


Figura 20 – Princípio *off-axis*: (a) no registo e (b) na reconstrução.

4.5.3. Holograma de transmissão de Fresnel

Na figura 21 está representado um esquema da geometria para o registo de hologramas de transmissão de Fresnel. Para fazer um holograma precisamos de dois feixes de luz coerente. Assim, o feixe emitido pelo laser é dividido em dois com a ajuda de um divisor de feixe (espelho semi-transparente). Um dos feixes é reflectido pelo objecto, transportando a informação desse objecto. A este é chamado onda objecto, ou mais simplesmente OO. O outro é um feixe formado por uma onda plana, sem a interferência de qualquer objecto e é chamado onda de referência ou OR. A onda objecto e a onda referência, quando se voltam a encontrar, geram um padrão de interferência que é registado num suporte fotossensível (placa ou filme holográfico, normalmente de halogenetos de prata). Dependendo do ângulo formado por estas duas ondas (OO e OR) e

da espessura da emulsão, os hologramas de transmissão podem ser registados como hologramas planos ou de volume (secção 4.5.8).

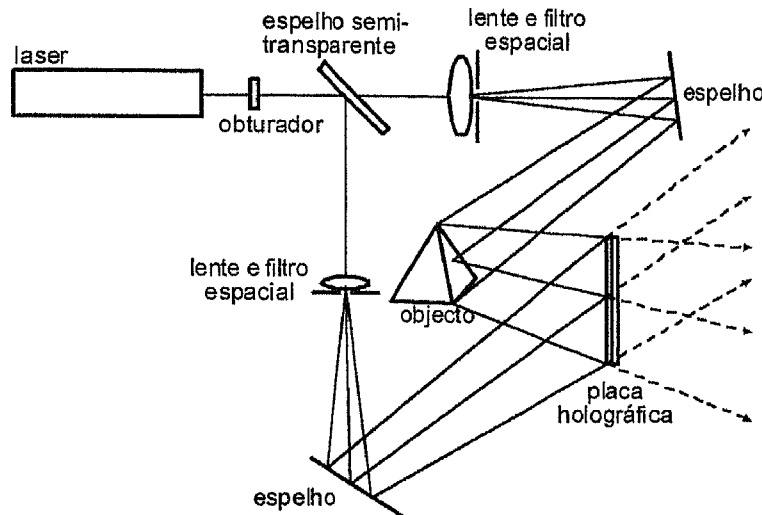


Figura 21 – Geometria para o registo de um holograma de transmissão de Fresnel.

Este tipo de holograma é chamado holograma de transmissão porque para ser reconstruído o feixe de leitura atravessa a placa holográfica. Uma das características dos hologramas de transmissão é, durante a exposição, tanto o feixe objecto como o feixe de referência atingirem a placa holográfica do mesmo lado.

Quando o holograma é iluminado por um feixe de leitura, idêntico ao feixe de referência, uma das ondas produzidas pela difracção é semelhante à onda objecto que existiu durante o registo (figura 22); razão pela qual um observador tem a sensação da existência de um objecto que emite a luz difractada pelo holograma. Esta imagem holográfica, imagem virtual, apenas surge sem aberrações quando o feixe de leitura está com a mesma geometria e cor do feixe de referência. Se o feixe de leitura for uma onda complexa conjugada do feixe de referência a imagem reconstruída será uma imagem real.

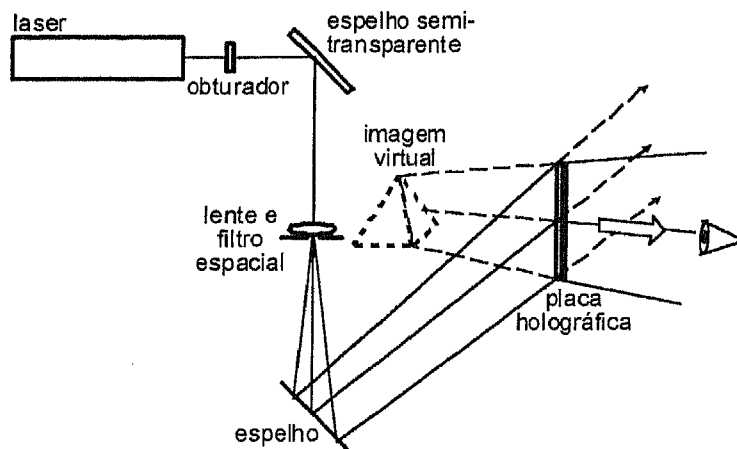


Figura 22 – Geometria de reconstrução de holograma de transmissão de Fresnel.

Assim, a principal desvantagem deste tipo de hologramas é necessitarem, para a reconstrução da imagem, de um feixe de leitura coerente com a mesma geometria do feixe referência. Se este tipo de holograma, for iluminado com um feixe de leitura policromático, a imagem reconstruída será a sobreposição, com translações, das várias imagens originadas pelos vários comprimentos de onda da luz usada (Bernardo, 1995).

Há contudo outros tipo de hologramas, como veremos a seguir, que podem reconstruir uma imagem holográfica, com a utilização de luz policromática e incoerente; são os chamados hologramas de luz branca.

4.5.4. Holograma de arco-íris

Os hologramas de arco-íris foram propostos pela primeira vez por Stephen Benton (Benton, 1969) e são, talvez, o tipo de hologramas mais comuns, devido ao elevado brilho das suas imagens.

No seu trabalho, Benton propõe uma modificação na técnica dos hologramas de transmissão, modificação essa que permite reconstituir o holograma com a luz branca de uma normal lâmpada de incandescência. Isto é conseguido eliminando a paralaxe vertical no holograma. A investigação inicial de Benton tinha por objectivo, reduzir a quantidade de informação contida num holograma, que pode atingir 10^5 - 10^6 bits/mm³, de forma a permitir uma transmissão televisiva. A introdução de uma fenda vertical elimina a paralaxe vertical e consequentemente reduz a informação contida no holograma.

O processo básico para obter um holograma de arco-íris, consiste em introduzir (ou sintetizar), na geometria de registo, uma fenda pela qual irá passar a onda objecto, de tal modo que seja reconstituída como imagem real, numa posição entre o holograma e o observador. Assim quando iluminado por uma fonte de luz branca, a imagem holográfica do objecto será vista através da imagem real da fenda. A fenda, normalmente com 2 mm, é introduzida na posição horizontal, para que ao limitar o ângulo de visão da imagem holográfica na direcção vertical permita o efeito de paralaxe binocular. A razão do nome, hologramas de arco-íris, fica a dever-se ao aparecimento de uma imagem reconstruída em diferentes posições verticais cada uma com uma cor, quando se utiliza luz branca na reconstrução. Isto é, os hologramas de arco-íris separam os comprimentos de onda que compõem a luz branca enviando-os em diferentes direcções, de tal forma que o espectador vê a imagem com luz de um só comprimento de onda, comprimento de onda este que é determinado pelo ponto de vista do observador. Assim, quando vemos um holograma de arco-íris e a imagem surge com uma cor amarelo esverdeado, se nos elevarmos um pouco passará para laranja ou vermelho, e se nos abaixarmos torna-se azul ou violeta (figura 23).

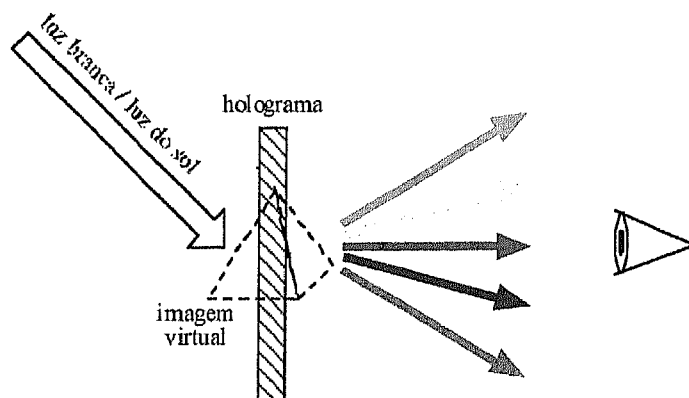


Figura 23 – Reconstrução de holograma de arco-íris.

O método original de Benton envolvia duas fases. Na primeira, é registado um holograma de transmissão de Fresnel, chamado matriz (*master*) ou H1. Depois, na segunda fase, produz-se por transferência um outro holograma, a partir da imagem real do objecto reconstruída de H1 através de uma fenda colocada entre os dois hologramas. Este segundo holograma é chamado H2.

Mais tarde, Chen e Yu (Yu, 1978) desenvolveram um novo método para produzir hologramas de arco-íris que consta apenas de uma fase. Neste método de registo, podem ser usadas duas geometrias distintas. Numa a imagem holográfica reconstruída é pseudoscópica (figura 24) e na outra é ortoscópica (figura 25). A principal diferença, na geometria de registo, reside na posição da fenda. Assim, na montagem pseudoscópica, a fenda é colocada entre uma lente e a imagem real do objecto, enquanto que na montagem ortoscópica a fenda fica situada entre a lente e o objecto. Na reconstrução da imagem holográfica forma-se uma imagem real da fenda entre o holograma e o observador, sendo através dessa fenda, tal como nos hologramas de arco-íris de Benton, que o observador irá ver a imagem holográfica do objecto. Assim, no caso da montagem pseudoscópica o feixe de leitura deve ser o complexo conjugado do feixe de referência, enquanto que na

montagem ortoscópica o feixe de leitura deve ser geometricamente idêntico ao feixe referência.

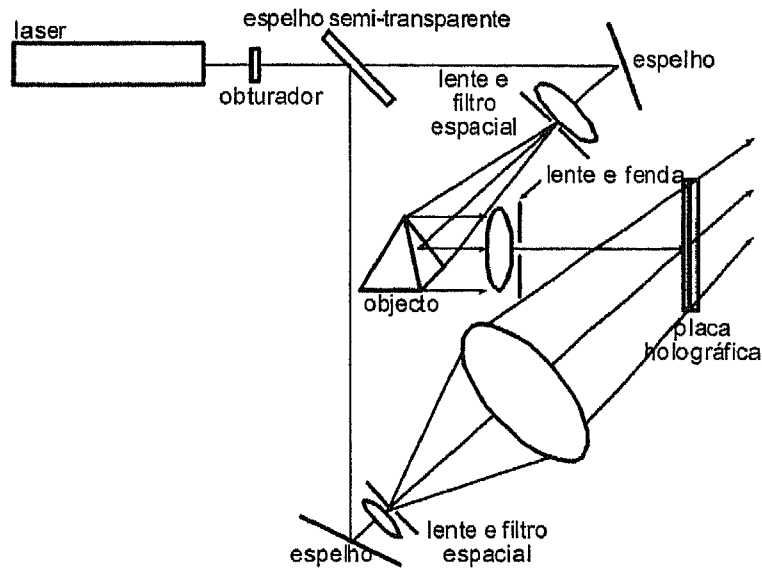


Figura 24 – Geometria de registo para holograma pseudoscópico de arco-íris de Chen e Yu.

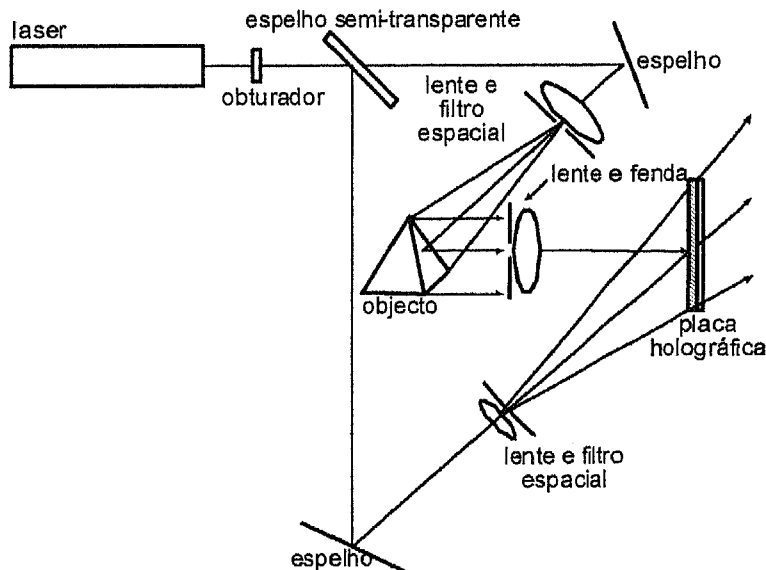


Figura 25 – Geometria de registo para holograma ortoscópico de arco-íris de Chen e Yu.

As principais vantagens dos hologramas de arco-íris (de Benton ou de Chen e Yu) são a sua reconstrução com luz branca, produzindo um efeito colorido, e o elevado brilho das suas imagens.

A principal desvantagem deste tipo de hologramas é obviamente a perda da paralaxe vertical e, por outro lado, a dimensão da fenda não só influir na focagem mas também na resolução da imagem holográfica. De facto, uma fenda mais larga melhora a definição mas aumenta a desfocagem devido aos diferentes comprimentos de onda do espectro da luz branca. Uma outra desvantagem é o requererem duas montagens diferentes, no caso dos hologramas de Benton, e as limitações inerentes ao próprio sistema óptico, no caso dos hologramas de Chen e Yu.

4.5.5. Holograma de reflexão

Nos hologramas de reflexão, produzidos pela primeira vez por Denisyuk, o feixe de referência e o feixe objecto incidem na placa holográfica de lados opostos como se pode ver na figura 26. Com esta geometria, a emulsão deve ter uma espessura e resolução suficientes para registar as finas franjas de interferência que se formam em profundidade. Formam-se assim hologramas de volume (ver secção 4.5.8).

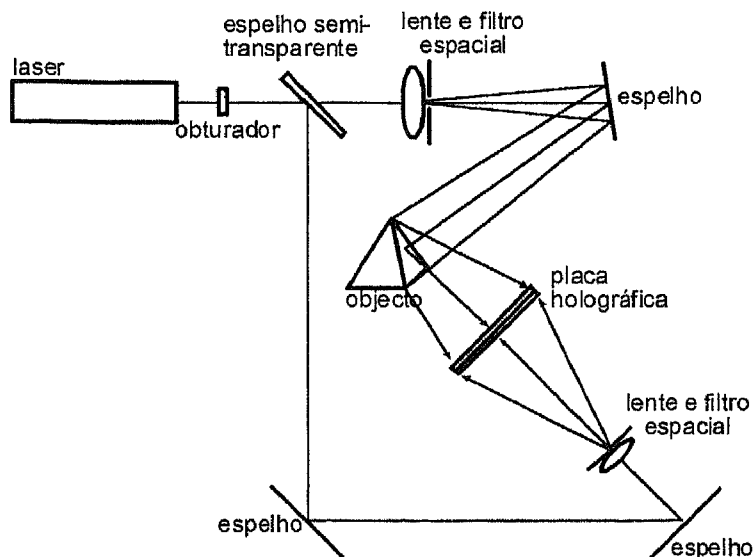


Figura 26 – Geometria para o registo de holograma de reflexão.

Os hologramas de reflexão podem ser reconstruídos com luz branca sem a necessidade de nenhum artifício (lente ou fenda) pois, quando um holograma de reflexão é registado, as franjas de interferência formam-se em camadas mais ou menos paralelas à superfície da emulsão. Como resultado apenas a luz com o comprimento de onda correcto é reflectida, funcionando o holograma como um filtro de comprimentos de onda, destruindo por interferência todos os outros (figura 27).

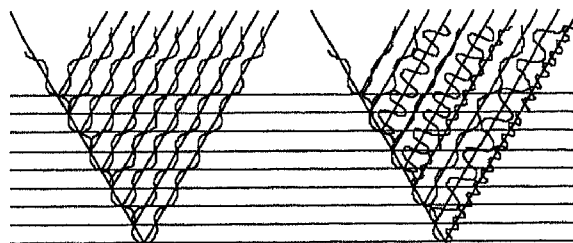


Figura 27 – Interferência construtiva e interferência destrutiva num holograma de reflexão.

As suas principais vantagens são a reconstrução com luz branca e a posição da fonte de luz de reconstrução, pois esta é frontal ao holograma (figura 28).

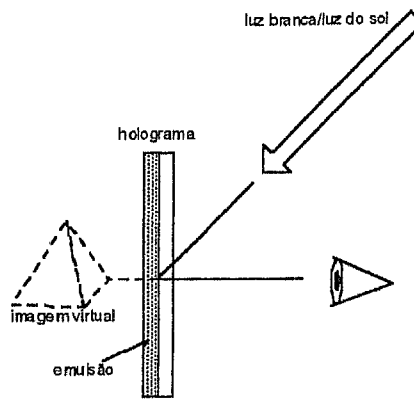


Figura 28 – Reconstrução de um holograma de reflexão.

Uma das particularidades deste tipo de hologramas é poderem reconstruir uma imagem de cor diferente do comprimento de onda da luz usada no seu registo. Isto é conseguido alterando a espessura do material de registo, antes ou depois da exposição, o que provoca uma alteração na distância entre os planos das franjas de interferência (planos de Bragg). Assim, quando o holograma é iluminado, a imagem reconstruída surge num comprimento de onda maior ou menor do que o utilizado no seu registo, consoante a distância entre os planos de Bragg foi dilatada ou contraída. Esta característica pode ser utilizada para “colorir” imagens holográficas que à partida seriam monocromáticas.

4.5.6. Hologramas de transferência

Existe uma outra maneira de produzir hologramas – é o processo conhecido por transferência. Este processo que consta de duas fases é no fundo a substituição, no registo, da imagem de um objecto real pela imagem holográfica desse mesmo objecto. Na primeira destas fases, é realizado um holograma de transmissão, H1. Depois, na segunda fase é registado um outro holograma, H2, a partir da imagem reconstruída de H1. Os hologramas assim produzidos podem ser de transmissão ou de reflexão, consoante a geometria da

montagem escolhida. Na figura 29 pode ver-se uma geometria de transferência para o registo de um holograma de reflexão, H2, a partir de um holograma de transmissão de Fresnel, H1.

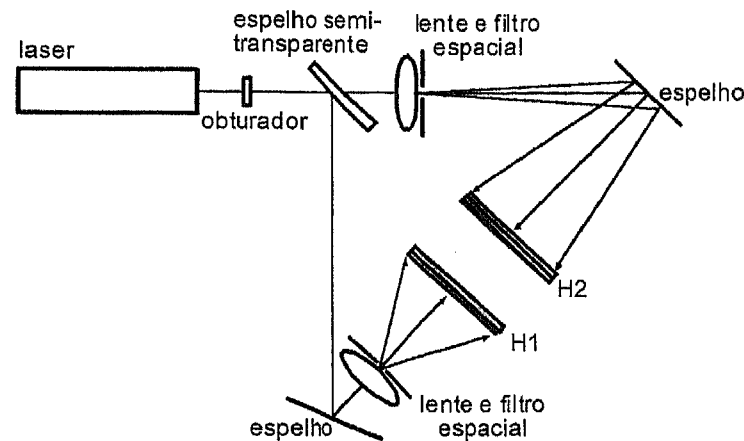


Figura 29 – Geometria de transferência para a segunda fase do registo de holograma de reflexão.

Com este método podem ser obtidos vários hologramas (múltiplos) que como é óbvio convém que sejam produzidos a partir de um *master* com a maior qualidade possível, pois existe sempre a possibilidade de uma perda de qualidade de geração para geração. Essa perda de qualidade pode ser devida a vários factores, nomeadamente: uma geometria menos perfeita, ruído introduzido pela própria natureza dos materiais de registo, vibrações na montagem, etc.

Uma outra vantagem deste método, é permitir a introdução de artefactos. Por exemplo, se se pretender que uma imagem tridimensional de um objecto surja, em relação à placa holográfica, parte à frente e parte atrás (ou totalmente atrás ou à frente) do holograma basta, fazermos primeiro, um holograma de transmissão de Fresnel (H1) e de seguida, na segunda fase, colocar a placa holográfica (H2) por forma a que ela se encontre, em relação à imagem reconstruída de H1, no plano desejado.

4.5.7. Hologramas de amplitude / fase

Conforme já antes foi mencionado, existem várias maneiras de caracterizar os hologramas. Quanto à forma como o material de registo modifica a luz incidente podem ser classificados em hologramas de amplitude e hologramas de fase.

Se no processamento químico de um holograma forem usados os métodos convencionais dos processos fotográficos, revelação seguida de fixação, os grãos de prata escurecidos por acção do revelador tornam-se opacos e por conseguinte absorvem mais ou menos luz incidente. Assim, num holograma processado desta maneira a luz utilizada na sua reconstrução é alterada na sua amplitude, devido aos diferentes graus de absorção do material. Razão pela qual estes hologramas são conhecidos por hologramas de amplitude ou de absorção. A eficiência de um holograma deste tipo é reduzida, sendo no máximo 7,2% da luz incidente (Bernardo, 1994).

Para se conseguir uma melhor eficiência que pode chegar aos 100% nos hologramas de volume (Bernardo, 1994), os hologramas são tratados num processo de re-halogenamento. Este processo, que consiste em substituir a fixação por um branqueamento dos grãos de prata expostos e revelados, transforma as camadas de prata escurecida em camadas transparentes de halogenetos de prata que, por apresentarem um índice de refacção muito superior ao da gelatina, permitem que a emulsão passe a ser constituída por duas zonas com índices de refacção (ou espessuras) diferentes (figura 30). Como estes

hologramas alteram a fase da luz utilizada na reconstrução são conhecidos por hologramas de fase.



Figura 30 – Os hologramas de fase consistem em dois grupos de planos de Bragg com índices de refração diferentes.

4.5.8. Hologramas planos e hologramas de volume

Por último, uma outra forma de classificação baseia-se na relação entre a espessura do material de registo e o espaçamento entre as franjas de interferência.

Segundo esta classificação são considerados hologramas de volume aqueles cuja espessura do material de registo é muito maior que o espaçamento entre as franjas de interferência registadas, isto é, em que $Q \gg 1$, por exemplo $Q = 10$, e hologramas planos aqueles em que essa espessura é muito menor que a distância entre as franjas de interferência registadas, $Q \ll 1$. Assim, para gravar um holograma de volume a emulsão deve ser várias vezes mais espessa que o comprimento de onda da luz usada.

A equação que permite caracterizar esta condição, conhecida por parâmetro Q , é a seguinte (Bjelkhagen, 1993):

$$Q = 2\pi\lambda \frac{d}{n\Lambda^2} \quad (4.1)$$

4.5.9. Hologramas por cunhagem (*embossed*)

Os hologramas cunhados ou estampados são hologramas de luz branca do tipo arco-íris de transmissão. São hologramas produzidos em massa através da criação de um molde ou negativo de metal, que por cunhagem imprime o holograma sobre um material plástico. Este material plástico é posteriormente recoberto com uma superfície reflectora normalmente de alumínio. Apesar de serem iluminados frontalmente estes hologramas são de facto hologramas de transmissão, pois é a imagem virtual da fonte de iluminação, reflectida pela camada metálica, que proporciona a reconstrução da imagem holográfica.

Como a espessura total num holograma deste tipo não ultrapassa os 3 μm , acima da superfície do produto onde é colocado, torna-se impossível removê-lo sem o destruir. Razão pela qual são normalmente utilizados como garante contra a contrafacção.

Têm como principais vantagens poderem ser reconstruídos com luz branca e terem um baixo custo devido à produção em massa.

As suas desvantagens são, por um lado, todas aquelas inerentes aos hologramas tipo arco-íris, nomeadamente a questão da desfocagem (devido à dispersão dos diferentes comprimentos da luz branca), o apresentarem apenas paralaxe horizontal e, por outro lado, terem como formato máximo 150 x 150 mm que é o limite da maioria do equipamento comercial para a sua produção (Saxby, 1994).

4.5.10. Hologramas de imagem

Se colocarmos um objecto plano em contacto com a emulsão holográfica, ou a sua imagem obtida por meio de lentes (figura 31), ou ainda através de um outro holograma, podemos obter um holograma que é reconstruído com luz branca, mesmo quando se trata de um holograma de transmissão.

No entanto, estes hologramas dão origem a imagens de pouca qualidade, piorando com o aumento da profundidade do objecto, devido à menor sobreposição das diferentes imagens associadas às componentes espectrais da luz branca. Por esta razão, normalmente os objectos registados são transparências bidimensionais ou com pouca profundidade.

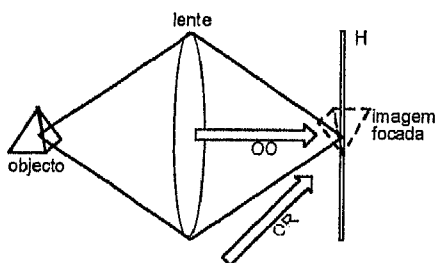


Figura 31 – Geometria de registo de um holograma de imagem.

Quando no seu registo se utilizou uma imagem tridimensional, a imagem holográfica pode surgir parte de um lado e parte do outro do plano da placa holográfica, dependendo da zona do objecto que durante o registo se encontrava focada nesse plano; no entanto, apenas a zona da imagem que está rigorosamente focada no plano da placa holográfica é reconstruída sem apresentar aberrações.

4.5.11. Hologramas estereográficos

Essencialmente, este tipo de holograma baseia-se nos mesmos princípios da fotografia estereoscópica. Têm como vantagem principal não necessitarem para a sua leitura estereoscópica de quaisquer apetrechos visuais, como por exemplo os habituais óculos coloridos ou filtros polarizadores.

A produção de hologramas estereográficos a partir de fotografias bidimensionais é uma técnica pela primeira vez descrita por DeBitetto (DeBitetto, 1969).

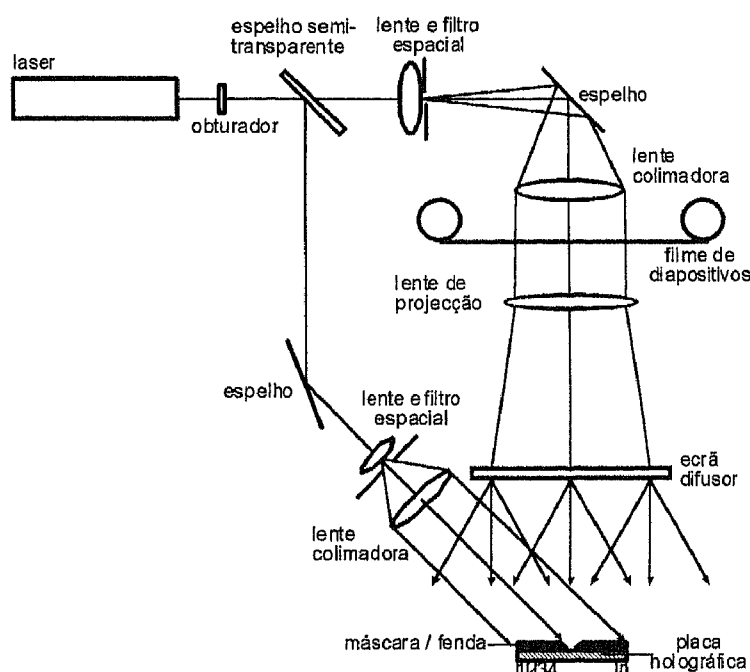


Figura 32 – Geometria de registo para hologramas estereográficos.

Neste processo, mais tarde desenvolvido por Benton (Benton, 1983), cada imagem bidimensional é projectada sobre um ecrã difusor, enquanto uma máscara móvel (fenda) é deslocada entre as exposições definindo uma tira estreita na placa holográfica (figura 32).

A fenda, normalmente com uma abertura entre 1 e 3 mm (correspondendo à dimensão das pupilas do observador) também pode, ao contrário de ser móvel, estar fixa mas, neste caso, será a placa holográfica a mover-se. Um holograma estereográfico contém, assim, uma série de pequenos hologramas, sequenciais, distribuídos espacialmente em tiras verticais paralelas que correspondem às diferentes fotografias obtidas de vários ângulos de vista do objecto (uma por cada posição da fenda).

Quando é reconstruído, o observador ao ver apenas uma imagem por cada olho, razão pela qual é importante a dimensão da fenda, obterá a ilusão da profundidade (tridimensionalidade) que será ainda mais efectiva se a dimensão do holograma for suficiente e a dimensão da fenda correctamente calculada.

Para obter hologramas estereográficos com paralaxe horizontal e vertical (estereograma bidimensional) é necessário registar $n \times n$ fotografias e $n \times n$ hologramas elementares correspondentes, obviamente um processo moroso e que exige grande rigor. Assim, e tendo em conta que a perda de paralaxe vertical não é impeditiva da sensação de profundidade por paralaxe binocular, os hologramas estereográficos normalmente são unidimensionais.

Nos hologramas estereográficos unidimensionais, o registo fotográfico feito na primeira etapa é, normalmente, obtido com uma câmara que deslocando-se sobre uma linha recta paralela ao objecto a registar mantém o eixo óptico perpendicular à direcção do movimento que descreve.

Neste tipo de hologramas é também possível, se o objecto se move (cada fotograma é um registo de um aspecto particular num momento particular), mostrar uma

aparente tridimensionalidade de uma cena móvel. Esta técnica foi inventada originalmente por L. Cross (Cross, 1977).

As imagens fotográficas podem ser substituídas por quaisquer outras transparências ou desenhos e podem mesmo, à semelhança do cinema de animação, ser substituídas por objectos que se movem ou transformam. No entanto, este tipo de abordagem ainda se encontra nos primórdios. Contudo, existem algumas experiências de cinema holográfico que devido a questões de ordem técnica e de natureza cinematográfica ainda não resolvidas, como por exemplo as que a projecção para um grupo de espectadores levanta, ainda se encontram numa forma insipiente. Nesta área de investigação, destacam-se os trabalhos realizados na Universidade de Osaka e no Media Lab Spacial Imaging Group do MIT, onde actualmente desenvolvem trabalho na área da vídeo-holografia.

Um holograma estereográfico pode ser cilíndrico ou cónico (T. Kasahara, 1971), permitindo assim uma visão de 360°. Neste caso, é conveniente que o registo fotográfico seja obtido fotografando de uma posição fixa um objecto giratório.

Existe ainda um outro tipo de holograma estereográfico conhecido por alcova (Saxby, 1994) (figura 33). Esta técnica, desenvolvida pelo grupo de Benton, consiste num estereograma de grande dimensão, sob a forma de meio cilindro côncavo, onde a imagem, gerada por computador, é registada. Esta imagem é previamente distorcida para compensar as distorções introduzidas pelo formato.

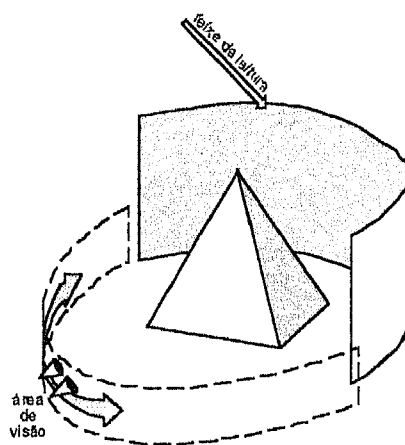


Figura 33 – Holograma de alcova de reflexão.

São duas as principais vantagens dos hologramas estereográficos. A primeira, é permitirem o registo de objectos com características tais (dimensão, movimento, etc.) que os métodos holográficos directos não permitem. A segunda, e principal vantagem do ponto de vista artístico, é permitirem um registo de objectos imaginários, virtuais e até mesmo impossíveis de existirem na realidade. Isto significa que já não é necessário fazer maquetas de um novo produto para que seja possível vê-lo em 3 dimensões, abrindo todo um novo campo de criação ao artista plástico, arquitecto ou designer.

Existem já aplicações práticas deste tipo de hologramas, por exemplo na medicina, como meios auxiliares de diagnóstico, onde os hologramas são produzidos a partir de imagens obtidas por TAC (tomografia axial computadorizada) (N. Ohyama, 1987). Outras áreas de aplicação são possíveis utilizando raios-X, por exemplo em áreas como a arqueologia ou outras onde doses maciças de raios-X não prejudicam os objectos a registar.

5. Materiais de registo

Como já vimos, para fazer um holograma é necessário que toda a luz difundida, caracterizada por valores de amplitude e de fase, seja registada. No entanto, como não existe nenhum material capaz de detectar directamente tanto a amplitude como a fase da luz, a solução encontrada passa pelo processo interferométrico introduzido por Gabor. Processo esse onde a informação da fase e amplitude é convertida em variações de intensidade passíveis de serem registadas num material fotossensível. Em termos gerais, este processo, consiste em registar num material sensível à luz os micro-padrões (franjas de interferência) criados pela interferência entre o feixe objecto e o feixe referência. Assim, um dos factores a ter em conta para fazer um holograma é as características do próprio material de registo.

Apesar de hoje em dia existirem vários materiais susceptíveis de serem utilizados no registo de hologramas (desde os halogenetos de prata à rodopsina, passando pela gelatina dicromatada, pelos fotopolímeros, pelos materiais fotorresistentes, pelos termoplásticos, pelos cristais ferroelétricos e outros), as emulsões de halogenetos de prata

continuam a ser as que com mais frequência se utilizam (Bjelkhagen, 1993). Assim, e porque foi a única com que trabalhamos, será sobre ela que nos debruçaremos com mais pormenor, apenas abordando sumariamente as características e propriedades da gelatina dicromatada e dos fotopolímeros.

5.1. Emulsão de halogenetos de prata

As emulsões de halogenetos de prata utilizadas em holografia, apesar de terem uma resolução muito maior que as utilizadas em fotografia, tem princípios básicos de registo e revelação essencialmente iguais.

As suas principais vantagens são a grande sensibilidade em comparação com os outros materiais, o poderem ser aplicadas tanto sobre vidro como sobre película, o poderem ser fabricadas em grandes formatos, o poderem ser utilizada para registar hologramas de amplitude ou de fase, o terem uma excelente duração; e, finalmente, o terem um grande poder de resolução.

Como desvantagens têm: o ser absorptiva; o seu ruído inerente e o limite na resposta linear; o sofrerem um processo irreversível; e, por último, o necessitarem de um processamento químico (Bjelkhagen, 1993).

5.1.1. Composição

A sua composição é baseada numa combinação de cristais de halogenetos de prata embebidos numa camada de gelatina, normalmente conhecida como emulsão fotográfica. Actualmente, a emulsão fotossensível não é realmente uma “emulsão” mas antes uma fina camada de microcristais de halogenetos de prata dispersos num coloide (gelatina), cuja espessura pode variar entre 5 e 20 microns para as emulsões utilizadas em holografia (Bjelkhagen, 1993).

Existem três tipos de halogenetos de prata: o cloreto de prata (Ag Cl); o brometo de prata (Ag Br); e o iodeto de prata (Ag I). O cloreto de prata é utilizado em emulsões pouco sensíveis, as emulsões de uma mistura de cloreto/brometo têm maior sensibilidade à luz, mas as emulsões que têm maior sensibilidade são as de brometo/iodeto. O iodeto de prata nunca é utilizado sozinho, sendo apenas utilizado em pequenas percentagens ($\leq 5\%$) para fazer aumentar a sensibilidade das emulsões de grão fino.

Quanto à forma, os cristais de halogenetos são cúbicos, encontrando-se em cada cristal um ião de prata (Ag^+) rodeado por seis iões de halogeneto. A média do calibre destes microcristais pode variar entre os 10 nanómetros para as emulsões holográficas e vários micrometros para as emulsões fotográficas de grande sensibilidade, como se pode ver na tabela que se segue (Bjelkhagen, 1993).

Tipo de emulsão	Calibre médio do grão (nm)
Emulsão holográfica de grão ultra-fino	8 – 30
Emulsão holográfica de grão fino	30 – 50
Emulsão holográfica rápida	50 – 100
Emulsão de Clorobrometo (papel)	200

Emulsão litográfica	200 – 350
Emulsão fotográfica de grão fino	350 – 700
Emulsão fotográfica rápida	1000 – 2000
Emulsão rápida para raios-X	2500

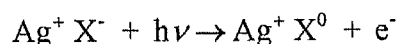
Como se sabe, a sensibilidade à luz das emulsões de halogenetos de prata aumenta com a dimensão dos grãos e, infelizmente, quanto maior for a sua dimensão menor será a resolução. Assim, uma emulsão com um grande poder de resolução, como as utilizadas em holografia têm, de uma forma geral, muito pouca sensibilidade. Esta sensibilidade dos halogenetos de prata não se manifesta de igual maneira para todos os comprimentos de onda, sendo intrinsecamente sensíveis apenas à banda dos azuis e ultravioletas. Para se superar esta característica, adicionam-se sensibilizadores especiais (*dyes*) que ao serem absorvidos pelos cristais de halogeneto permitem que estes se tornem sensíveis a outros comprimentos de onda. Por este processo, as emulsões podem ser sensibilizadas para outras cores do espectro luminoso, inclusive os infravermelhos. Uma emulsão diz-se ortocromática ou pancromática quando é, respectivamente, sensível à gama dos verdes ou a todo o espectro visível.

Como as franjas de interferência a serem registadas são da ordem da magnitude do comprimento de onda da luz, é necessário um grande poder de resolução. Por outro lado é também desejável ter uma emulsão de grande sensibilidade para reduzir o tempo de exposição. Infelizmente, como já foi mencionado, grande poder de resolução e grande sensibilidade são propriedades incompatíveis; assim para a escolha da emulsão correcta devem ser considerados entre outros, o objecto, a geometria e o tipo de holografia utilizada.

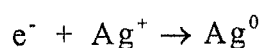
5.1.2. Formação da imagem latente

Existem várias teorias sobre a formação da imagem latente (teoria da concentração de Gurney-Mott, de Mitchell e de Tani) mas, de uma forma sucinta, a formação da imagem latente numa emulsão de halogenetos de prata pode resumir-se da seguinte maneira. Antes de serem expostos à luz os cristais de halogeneto de prata, normalmente chamados grãos, são compostos principalmente por iões de prata (Ag^+) e por iões de halogéneo (genericamente representado por X^-). Nestes cristais existem também irregularidades essenciais à formação da imagem. Estas irregularidades são compostas por fissuras, iões livres de prata (Ag^+) e impurezas.

Quando um fotão com suficiente energia é absorvido, o ião de halogéneo liberta um electrão.



O electrão libertado migra através do cristal atraído por uma das irregularidades na sua superfície e une-se a um ião livre de prata carregado positivamente, dando origem a um átomo de prata, chamado *prespeck*.



Este átomo de prata tem um curto período de vida, em média um segundo, dissociando-se de novo num ião. Contudo, se forem formados pelo menos três a quatro

átomos de prata, resultantes do processo de fotogeração, produz-se uma imagem estável e passível de ser revelada, chamada imagem latente (Bjelkhagen, 1993).

5.1.3. Processamento

Durante o processo de revelação, os grãos de halogeneto de prata expostos, com apenas alguns átomos de prata (imagem latente), são totalmente reduzidos a prata metálica. Neste processo o revelador reage no interior da gelatina com os cristais de prata, libertando mais prata que se precipita sob a forma de pequenos grãos irregulares, normalmente com um aspecto esponjoso e filamentosos. O seu tamanho e forma depende do revelador utilizado e de outras condições como a temperatura, a diluição, o tempo de revelação e a agitação.

Apesar de no início da holografia o processamento químico ser o mesmo das emulsões fotográficas, hoje em dia este processamento faz-se através de reveladores estudados especialmente para este tipo de emulsão. Assim, o revelador ideal é aquele que combina a máxima sensibilidade da emulsão com o máximo contraste nas franjas de interferência e o mínimo nevoeiro químico (*fog*) (Saxby, 1994). O nevoeiro químico é o aspecto cinzento leitoso produzido pelo revelador devido à redução química dos cristais não expostos.

Para produzir hologramas de fase (secção 4.5.7), é necessário após a revelação, um branqueamento. Este branqueamento que substitui a fixação deve ser feito com um branqueador re-halogenante para evitar qualquer remoção de prata da emulsão, o que iria

provocar alterações na reconstituição do holograma, principalmente em hologramas de reflexão devido à alteração das distâncias entre os planos de Bragg.

Entre a revelação e o branqueamento, tal como nos processos fotográficos, deve ser feita uma lavagem em água para neutralizar os resíduos do revelador e assim não contaminar o branqueador. Também do mesmo modo, após o branqueamento, deve ser feita uma lavagem de pelo menos 10 minutos, em água corrente, para assegurar uma total remoção de produtos químicos e permitir assim uma maior durabilidade do registo. Posteriormente a esta lavagem a placa ou filme deve ser mergulhada num agente humidificador (Agepon por exemplo) para evitar as manchas de calcário e permitir uma secagem uniforme. Finalmente é posto a secar numa posição vertical e num lugar livre de poeiras.

5.2. Gelatina dicromatada

Na fotografia, os coloides dicromatados tem uma longa história, tendo sido utilizados, por exemplo, nos processos conhecidos por carvão e tantos outros como o processo com tintas gordurosas (Glandard, s/d).

A propriedade da gelatina dicromatada (DCG) que permite a sua utilização como material de registo é a de se tornar insolúvel em água morna após exposição à luz.

A gelatina dicromatada é geralmente vista como o melhor material para a produção de hologramas, pois é capaz de dar origem a hologramas com uma grande eficiência de difracção e com um baixo ruído sendo, sobretudo, utilizada na produção de HOE.

Infelizmente a gelatina dicromatada tem um curto tempo de vida após ser preparada e é extremamente sensível às condições do meio ambiente.

5.3. Fotopolímeros

Os fotopolímeros são substâncias que se polimerizam quando irradiados com luz (por exemplo as colas de cianoacrilato e as colas de cura por UV). A polimerização é o processo através do qual pequenas moléculas de um composto orgânico simples (monómero) se unem formando longas cadeias.

A propriedade mais importante de um fotopolímero é a forma como altera o seu índice de refração por alterações da sua estrutura química e física.

O fotopolímero ideal deve ser transparente, flexível, sensível a todos os comprimentos de onda visível e completamente estável após processamento (Saxby, 1994).

Os fotopolímeros tem a grande vantagem de serem processados a seco e o seu processamento constar apenas, normalmente, de uma exposição aos ultra violetas, seguida de um aquecimento (cozedura) que estabiliza o material (idem).

A sensibilidade espectral dos fotopolímeros pode ir desde o azul ao vermelho, ou mesmo combinações destas permitindo hologramas pancromáticos. A sua sensibilidade à luz varia com a composição e vai desde os 5 aos 30 mJ/cm² (idem).

A grande vantagem deste material é, por um lado, o seu processamento a seco e, por outro, a durabilidade.

6. Condições de registo

Nesta secção, abordaremos de uma forma prática os factores e condições que contribuem para a qualidade de um registo holográfico.

6.1. Estabilidade

Uma das primeiras condições, talvez a mais importante, é a estabilidade da montagem, pois a mínima vibração é suficiente para prejudicar, ou mesmo destruir completamente, qualquer registo das franjas de interferência e por conseguinte qualquer reconstrução do objecto, mesmo que todos os outros requisitos tenham sido cumpridos.

6.2. Coerência

Uma outra condição imprescindível é a utilização de uma fonte de luz com propriedades especiais. A luz produzida por um laser possui estas propriedades, que como já vimos são conhecidas por coerência espacial e coerência temporal (alguns tipos de lâmpadas de gás também as possuem, mas de uma forma tão reduzida que apenas podem ser usadas para produzir hologramas de objectos planos ou para, sob determinadas circunstâncias, fazer cópias de hologramas). O comprimento de coerência ligado à coerência temporal é um parâmetro que permite avaliar a máxima profundidade de objecto registável. Obviamente o seu valor é no máximo metade do comprimento de coerência. Por outro lado, e ainda em relação com o comprimento de coerência, o contraste máximo da imagem é conseguido quando os dois feixes, objecto e referência, percorrem caminhos ópticos com o mesmo comprimento, mantendo-se por conseguinte em fase. Isto quer dizer que os comprimentos dos percursos ópticos dos feixes (a partir do espelho semi-transparente) devem ser o mais semelhante possível, de preferencia iguais; isto é, a sua diferença deve ser inferior ao comprimento de coerência.

6.3. Eficiência de difracção

Uma das preocupações em holografia, principalmente em holografia de exibição, é a eficiência de difracção. Esta, para além de outros factores, depende do material usado no registo, do tipo de holograma, dos ângulos formados entre os feixes objecto e referência e da polarização dos mesmos, da estabilidade da montagem e do contraste das franjas de interferência.

A eficiência de difracção, η , pode ser definida como a relação entre a intensidade da luz difractada, I_D , e a intensidade da luz incidente, I_I .

$$\eta = \frac{I_D}{I_I} \quad (6.1)$$

6.4. Contraste e razão entre os feixes referência e objecto

Conforme antes foi mencionado, a eficiência de difracção depende, para além de outros factores, da visibilidade das franjas de interferência, isto é, para obter um holograma com uma boa eficiência é necessário que o contraste entre as franjas de interferência seja o maior possível, isto é, se aproxime de 1.

O contraste, C , é definido pela seguinte relação de intensidades máximas e mínimas (Bernardo, 1995):

$$C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (6.2)$$

Teoricamente, o melhor contraste nas franjas de interferência ocorre quando a relação de intensidades entre os feixes referência e objecto é de 1:1, ou seja, quando as intensidades dos feixes referência e objecto são iguais. No entanto, na prática, os valores desta relação devem estar num holograma de transmissão entre 3 a 8 para 1, e 1,5 a 3 para 1 num holograma de reflexão (Saxby, 1994). A razão pela qual não deve ser utilizada uma relação de 1 para 1 deve-se a três ordens de factores. Primeiro, devido à maioria dos

objectos apresentar pouca reflectividade a estabilidade da montagem poderia não permitir exposições tão longas. Segundo, porque zonas pontuais do objecto, eventualmente com maior reflectividade, poderiam destruir o registo. Terceiro, para diminuir o ruído originado pelas interferências entre as várias ondas reflectidas pelo objecto. Como regra, nenhuma zona do objecto deve ter maior intensidade que o feixe referência.

6.5. Resolução do material de registo

Um outro factor contribuinte na qualidade final da imagem holográfica é a resolução do material de registo.

O tipo de geometria utilizada, isto é, o ângulo formado entre os feixes objecto e referência com a normal à superfície da emulsão, é um factor que para além de determinar o tipo de holograma (de transmissão ou de reflexão), determina a distância entre as franjas de interferência. Consoante esse ângulo aumenta, a distância entre as franjas de interferência reduz-se (figura 34).

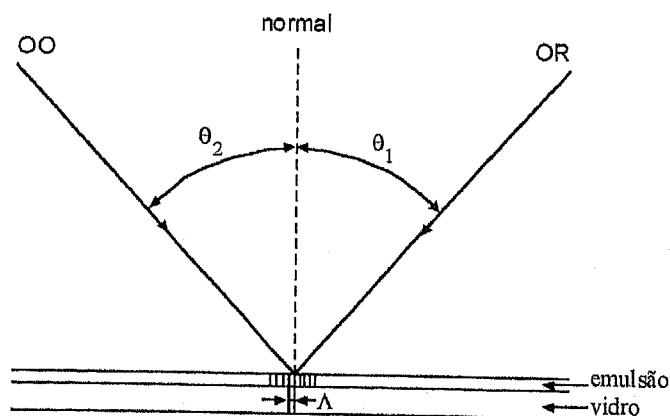


Figura 34 – Resolução do material de registo.

Como o material de registo tem uma resolução finita, esse ângulo, (θ), formado pelo feixe referência e o feixe objecto, deve ser tal que o número de franjas esteja dentro da resolução do material.

Se λ for o comprimento de onda do laser usado para o registo do holograma, então a separação (Λ) entre as franjas de interferência será (Bernardo, 1995):

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2} \quad (6.3)$$

Como a frequência espacial das franjas de interferência é dada por:

$$f = \frac{1}{\Lambda} \quad (6.4)$$

onde: Λ é a separação entre franjas de interferência.

Substituindo obtemos:

$$f = \frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}{\lambda} \quad (6.5)$$

6.6. Polarização

Dois feixes de luz interferem apenas, como já foi mencionado, quando estão correlacionados (isto é, quando são provenientes da mesma fonte de luz coerente e tem

percursos ópticos com comprimentos semelhantes). No entanto, a interferência varia também com as direcções relativas dos vectores de polarização. Assim, a interferência é máxima quando os dois feixes além de se encontrarem polarizados linearmente estão com as direcções dos vectores de polarização perpendiculares ao plano que contém os dois feixes (s-polarizados). Dois feixes polarizados na mesma direcção do seu plano comum (p-polarizados), ou polarizados formando um ângulo, apenas interferem parcialmente, na proporção do cosseno do ângulo formado pelos seus vectores de polarização. Quando os vectores de polarização são ortogonais não existe nenhum tipo de interferência (Saxby, 1994).

6.7. Filtros espaciais

Um dos elementos ópticos utilizados nas montagens para registo de hologramas são os filtros espaciais. Estes filtros destinam-se a “limpar” os feixes dos defeitos que são causados, por exemplo, por partículas de pó, reflexões múltiplas, dispersões, etc. São constituídos por uma lente de microscópio e por um pequeno orifício (*pinhole*). O seu funcionamento baseia-se na característica que um feixe com perfil gaussiano tem de, ao ser focado por uma lente, todo o ruído ficar disperso nas margens do plano focal. Isto acontece porque as frequências mais altas, as que contêm informação do ruído, focam-se mais afastadas do eixo óptico. Assim, se for colocado um *pinhole* com o diâmetro correcto, centrado no plano focal, este deixará passar a maior parte da energia do laser e bloqueará estas frequências (figura 35).

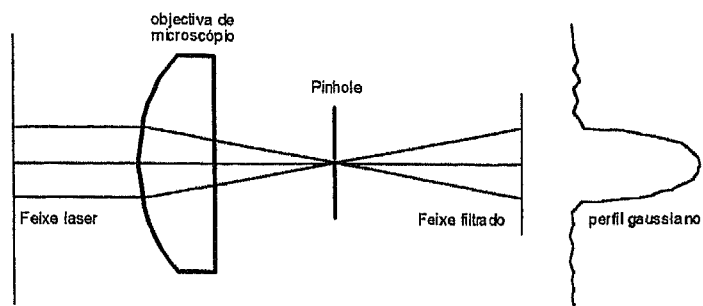
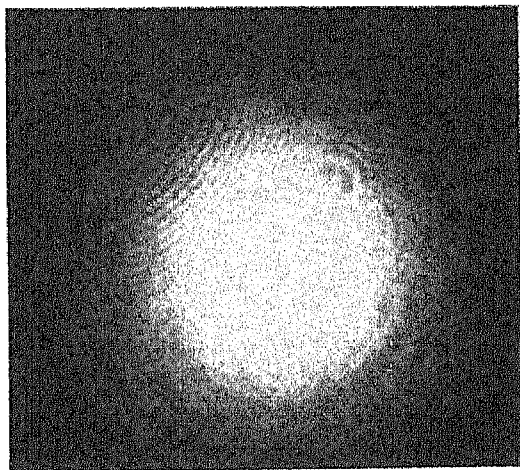
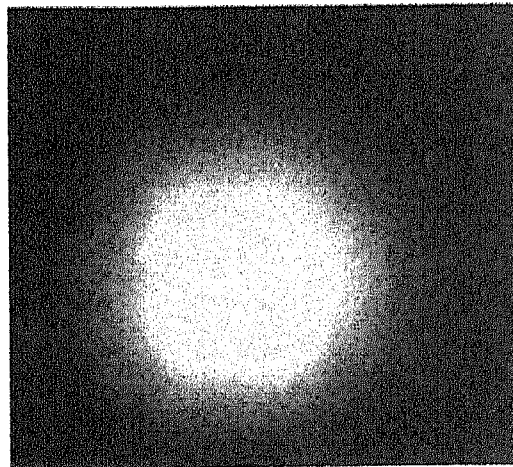


Figura 35 – Esquema de um filtro espacial.

A figura 36 b mostra o resultado da aplicação de um filtro espacial a um feixe de laser expandido.



a)



b)

Figura 36 – Feixe de laser expandido: (a) antes de ser filtrado; (b) depois de ser filtrado.

7. Princípios e aspectos metodológicos

A estereografia holográfica é um processo onde se alia a estrutura e propriedades ópticas dos sistemas mecânicos com o potencial de armazenamento de informação e fidelidade de imagem da holografia. A quantidade de informação registada num holograma estereoscópico é reduzida comparada com aquela que é registada por um holograma normal. Um holo-estereograma apenas armazena um número finito de pontos de vista diferentes baseados na percepção humana e não na capacidade de armazenamento do meio. Como a captura das imagens é fotográfica, e portanto independente do processo de registo holográfico, permite que imagens de objectos iluminados com luz natural possam ser vistas num holograma estereográfico. Estas imagens tanto podem ser capturadas da realidade, utilizando uma câmara fotográfica normal, como sintetizadas num computador através de um normal programa gráfico.

O principal objectivo desta investigação é uma análise do funcionamento dos estereogramas no sentido de uma futura aplicação artística deste meio. Nesse sentido, analisaram-se as implicações que a estereografia coloca nas geometrias da captura

fotográfica/exposição holográfica e suas inter-relações, e, ainda, as contribuições da frequência de amostragem/dimensão da fenda na qualidade de reconstrução estereoscópica

Por razões práticas, este trabalho concentrar-se-á nos estereogramas que apresentam apenas paralaxe horizontal (HPO) e são produzidos com aberturas em forma de fenda. Apesar dos hologramas estereográficos de paralaxe total mimetizarem melhor o mundo real, os hologramas estereográficos HPO proporcionam já ao observador, com um número muito mais reduzido de perspectivas (pontos de vista), a maioria da informação tridimensional necessária para uma efectiva sensação de profundidade. No entanto, os princípios apresentados aplicam-se igualmente aos dois tipos de estereogramas.

Por razões semelhantes, serão apenas usados estereogramas de formato plano, excluindo os formatos cilíndricos ou cónicos. Também, por razões práticas, é usado um ecrã difusor em vez de lentes cilíndricas ou outros elementos ópticos mais elaborados.

Neste trabalho apenas se utilizarão imagens de objectos sintetizados em computador porque ao contrário dos objectos físicos, são facilmente manipuláveis, relativamente económicos e permitem uma liberdade de criação impensável com os objectos reais

7.1. Princípios

O holograma estereográfico é um meio de registar de uma forma discreta um fenómeno óptico contínuo. Na holografia estereoscópica de exibição, a percepção tridimensional de um objecto é obtida por um número relativamente pequeno de imagens

bidimensionais desse objecto. Apesar das imagens utilizadas neste trabalho terem sido obtidas por síntese num computador, o seu processo de captura pode ser interpretado como se de uma câmara fotográfica óptica se tratasse. As geometrias de captura fotográfica e de registo holográfico, nomeadamente as suas relações, determinam a precisão com que o holograma estereográfico se aproxima da cena real ou idealizada que se pretende reproduzir.

7.1.1. O modelo

O holograma estereográfico consiste numa placa holográfica, constituída por uma série de hologramas elementares, expostos através de uma estreita fenda vertical, em sequência, ao longo de toda a extensão horizontal da placa. Cada holograma elementar é individualmente realizado com uma imagem projectada com o auxílio de uma lente num ecrã difusor (ecrã de projecção).

Na reconstrução do holograma final, cada holograma elementar forma uma abertura através da qual um observador pode ver a imagem projectada no ecrã de projecção na altura da exposição. As imagens projectadas no ecrã são normalmente imagens de um objecto capturadas de vários pontos de vista. Assim, um observador devidamente colocado irá ver, através da abertura de dois hologramas elementares, duas imagens diferentes (uma por cada olho). O cérebro, como se sabe, interpretará a diferença entre as duas imagens como informação tridimensional.

Quando o observador se move horizontalmente, diferentes pares de imagens são apresentadas e por conseguinte, a cena muda gradualmente e com precisão de um ponto de

vista para o próximo copiando, mais ou menos fielmente, a aparência da cena tridimensional que lhe serviu de modelo.

Assumimos, propositadamente, que as aberturas da fenda são aproximadamente da dimensão da pupila do olho do observador e que quando o observador vê o holograma cada um dos seus olhos vê apenas uma só abertura. Na realidade as coisas não se passam assim; contudo, por uma questão de simplicidade, partiremos inicialmente desse pressuposto. Por outro lado, assumimos também que, durante a observação, os olhos do observador estão situados na superfície do holograma, numa posição bastante incómoda como se pode ver na figura 37. Outras maneiras menos incómodas serão abordadas mais adiante.

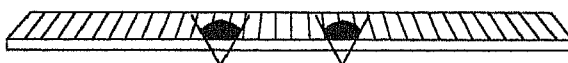


Figura 37 – Posição de um observador em relação a um holograma estereoscópico de transmissão.

A montagem para a exposição holográfica usada no registo de todos os estereogramas discutidos nesta secção apresenta sempre a mesma geometria. É uma montagem com uma geometria semelhante à utilizada na holografia *off-axis* usada para fazer hologramas de transmissão (figura 38), não sendo muito diferente da montagem para produzir hologramas estereográficos descrita por DeBitetto (DeBitetto, 1969) ou por King, Noll e Berry (M. C. King, 1970).

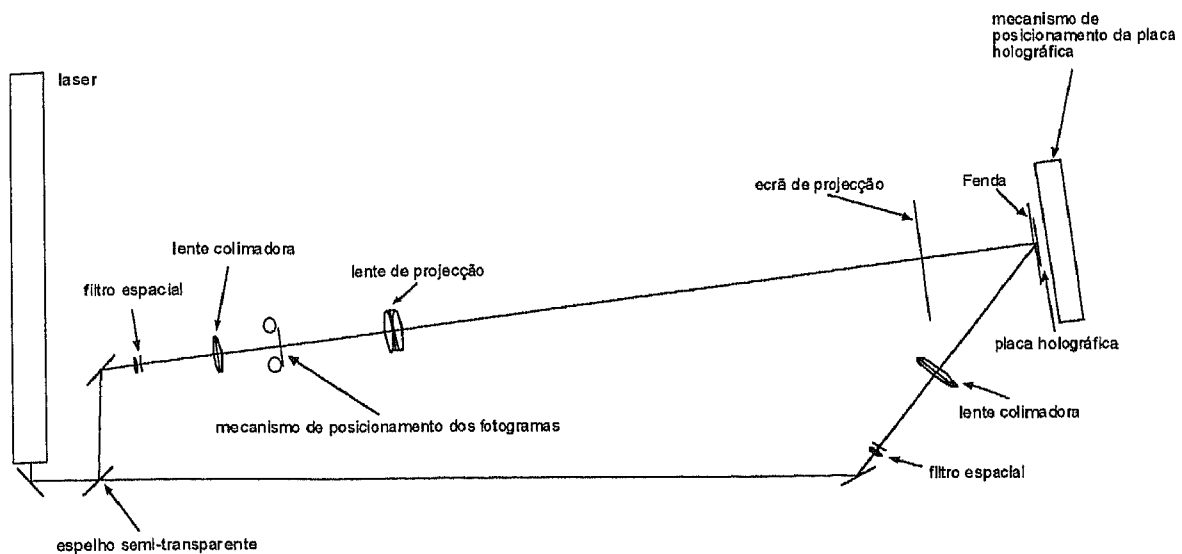


Figura 38 – Geometria da montagem utilizada para o registo dos hologramas estereoscópicos de transmissão.

Nesta geometria para obter hologramas estereográficos de transmissão, são usados dois feixes de luz mutuamente coerente para expor o material de registo holográfico. Um, o feixe referência, diverge de uma fonte luminosa com a mesma localização daquela que eventualmente será usada para iluminar o holograma na reconstrução; este feixe referência é colimado de forma a que cada fenda da placa holográfica seja iluminada com a mesma direcção, independentemente da posição lateral ocupada por cada tira na placa. O outro, o feixe objecto, é usado para projectar as imagens capturadas pela câmara fotográfica no ecrã de projecção. Este ecrã de projecção funciona como um objecto bidimensional que pode ser alterado de fenda para fenda.

Cada imagem projectada, cuja dimensão é definida pelos limites da “janela” projectada (*frame*), é uma sub-região visível do ecrã de projecção, sendo o próprio ecrã de projecção uma sub-região de um plano infinito a que chamaremos plano de projecção.

O ecrã de projecção encontra-se colocado numa posição paralela à placa holográfica e ao mecanismo da fenda. Os detalhes deste mecanismo variam conforme os diferentes tipos de estereogramas, mas em todos os casos, a placa holográfica é coberta por uma peça de material opticamente opaco, com uma abertura em forma de fenda. Este

mecanismo tapa toda a placa excepto a tira que será exposta através da fenda. Uma fotografia do mecanismo da fenda construído para este trabalho pode ser visto na figura 39.

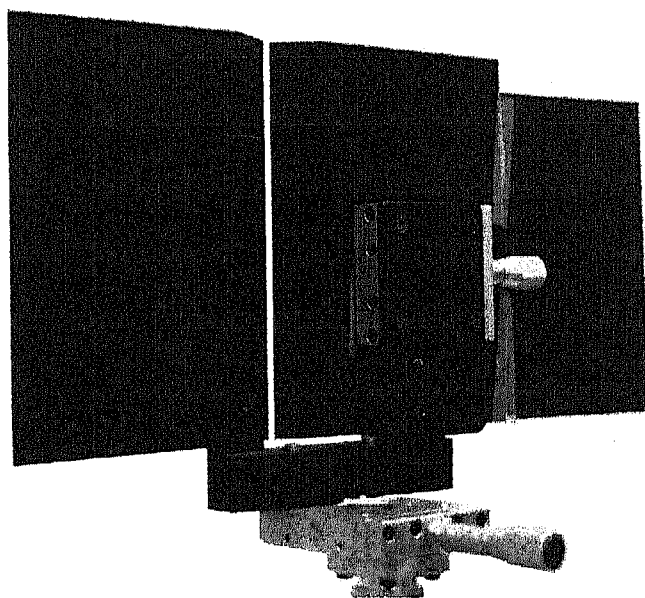


Figura 39 – Mecanismo de fenda.

Durante a exposição, uma tira de material de registo será exposta simultaneamente à luz proveniente da imagem projectada no ecrã de projecção e ao feixe referência dando assim origem a um holograma elementar. A placa ou a fenda é deslocada entre uma exposição e a seguinte de forma a que a faixa adjacente de material holográfico possa ser exposta. No presente caso optou-se por uma movimentação da placa cujas implicações serão analisadas ao longo das secções seguintes.

Na holo-estereografia de exibição, as imagens projectadas no ecrã de projecção são as várias perspectivas de um objecto capturadas de vários pontos de vista. Para que a cada posição particular do observador do estereograma corresponda um determinado ponto

de vista do objecto, a imagem dessa vista no ecrã de projecção deve ser a correspondente àquela que o observador obteria se estivesse a observar o objecto real. Por essa razão, o fotograma ao ser projectado do lado oposto do ecrã, em relação à placa halográfica, deve ser invertido de forma a que a imagem visível do lado da placa holográfica esteja correctamente orientada.

7.1.2. Registo holográfico

Nas experiências que foram realizadas a fenda encontra-se fixa e a placa move-se por forma a que cada tira da placa holográfica (holograma elementar) ao ser exposta se encontre centrada em relação à imagem projectada. Quando um estereograma produzido com esta geometria é reconstruído, cada um dos hologramas elementares dá origem, como se pode ver na figura 40, a uma imagem centrada em relação à posição de cada holograma elementar.

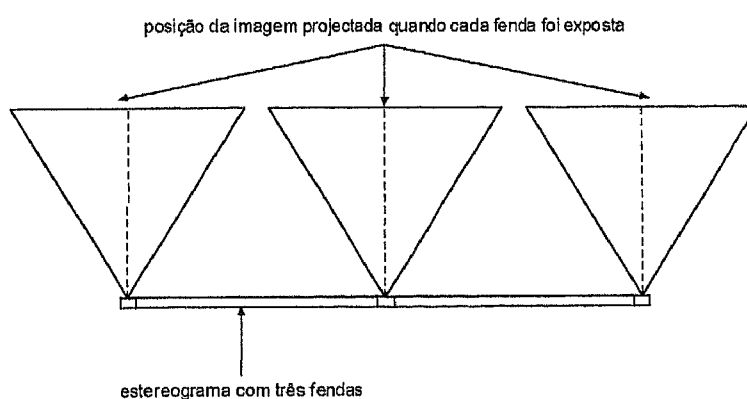


Figura 40 – Reconstrução de um ponto situado no ecrã de projecção quando se utiliza uma geometria de fenda fixa.

Este tipo de estereograma é produzido através de um processo que localiza cada tira da placa holográfica (futuro holograma elementar) em relação ao ecrã de projecção.

O seguinte mecanismo satisfaz esta geometria: a placa holográfica é colocada num suporte móvel posicionando-se atrás de uma fenda fixa. Esta fenda, com uma abertura vertical, é centrada em relação ao ecrã de projecção. A figura 41 mostra o esquema dessa montagem.

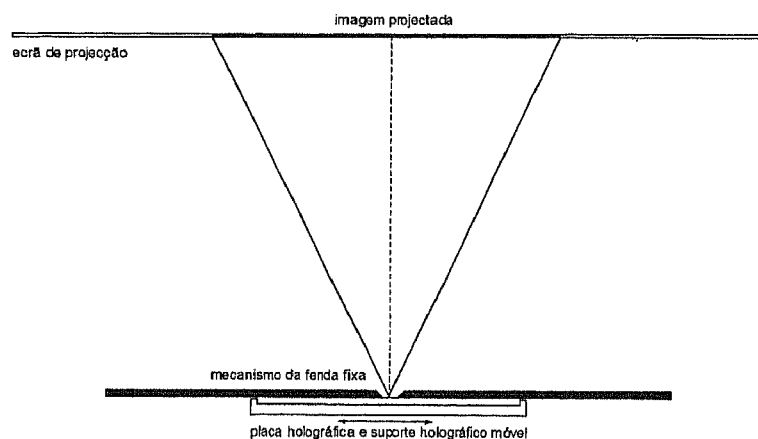


Figura 41 – Esquema da montagem para o registo holográfico de um estereograma.

O holograma estereoscópico é exposto da seguinte maneira:

- O suporte da placa holográfica é colocado na sua posição mais à direita em relação ao seu curso, de forma a que a parte da placa holográfica directamente por trás da fenda seja a zona mais à esquerda da mesma;
- A imagem projectada no ecrã será a capturada mais à esquerda no percurso da câmara e correspondente ao ponto de vista mais à esquerda do observador;
- A tira da placa holográfica imediatamente por trás da fenda é então exposta simultaneamente à imagem projectada e ao feixe de referência dando origem a um holograma elementar;

- O suporte móvel da placa é reposicionado de maneira a que uma zona adjacente da placa holográfica, ainda não exposta, seja colocada por trás da abertura da fenda, uma nova imagem é projectada.

O processo descrito continua até que toda a extensão horizontal do holograma seja exposta.

Após o processamento químico da placa holográfica, o padrão de difracção resultante produz, quando a placa é iluminada com um feixe de leitura de luz colimado, com o mesmo comprimento de onda e ângulo do feixe de referência, uma sequência de hologramas elementares, cada um reconstruindo uma das diferentes imagens projectadas no ecrã difusor.

7.1.3. A reconstrução do espaço num estereograma

Uma observação mais detalhada da exposição estereográfica acima descrita fornece-nos já preciosas indicações acerca de como a captura dos diversos pontos de vista do objecto permitem produzir uma imagem tridimensional desse mesmo objecto.

Imagine-se, por exemplo, que a imagem projectada no ecrã consiste num único ponto branco centrado sobre um fundo negro. Todas as tiras do estereograma são expostas a este padrão, ficando o ponto sempre centrado em relação a cada fenda. Quando o holograma final é reconstituído os olhos do observador ficam em correspondência com dois hologramas elementares diferentes. O ponto branco surge assim, directamente em frente a cada olho do observador que interpreta estereoscopicamente estas duas imagens,

reconstruídas dos hologramas elementares, como se de um único ponto situado no infinito se tratasse.

Na geometria do registo holográfico utilizou-se uma fenda fixa (placa holográfica móvel). Contudo, se pelo contrário for a fenda a mover-se (placa holográfica estacionária), a reconstrução do mencionado ponto não surgiria no infinito. De facto, surgiria no plano do ecrã como se pode ver esquematicamente na figura 42. Como se irá ver na secção seguinte, esta é a geometria indicada quando a captura das imagens é feita com uma câmara especial.

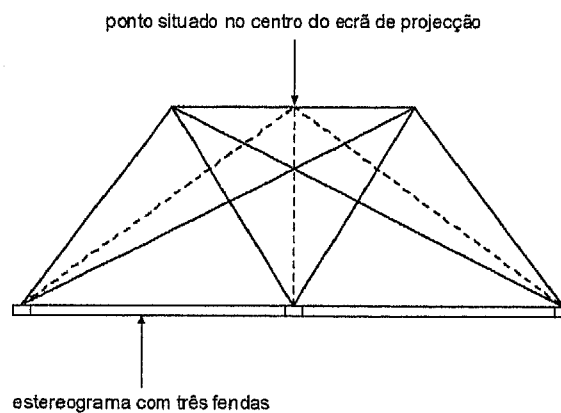


Figura 42 – Reconstrução de um ponto situado no ecrã de projecção quando se utiliza uma geometria de fenda móvel.

Como se sabe, a visão binocular é o factor que mais contribui para a sensação de profundidade que o observador experimenta. Contudo, dois outros factores provocam nos hologramas estereográficos informações de profundidade contraditórias com a paralaxe horizontal. Primeiro, os olhos do observador têm que se acomodar no plano de projecção para que o ponto surja focado; assim esta acomodação informa que o ponto se encontra sobre um plano mais próximo do que o infinito. Segundo, como os hologramas elementares foram registados segundo um movimento horizontal, o holograma final

apresenta apenas uma única perspectiva vertical, isto é, a mesma perspectiva é apresentada independentemente da posição vertical dos olhos do observador. Se o observador se move verticalmente, o ponto mover-se-á como se estivesse (e está) colocado no plano vertical de projecção.

O significado preciso da acomodação e das sugestões de paralaxe vertical nos hologramas estereográficos HPO (*horizontal parallax only*) não foi abordado neste estudo. No entanto tudo indica serem secundários comparados com a visão binocular.

7.1.4. Geometria da câmara fotográfica

Com base no que anteriormente foi analisado, torna-se fácil inferir a geometria correcta da câmara para capturar com precisão a tridimensionalidade de uma cena. Como se referiu, no caso de utilizarmos uma geometria de exposição holográfica em que a fenda se encontra fixa (placa móvel), um ponto para parecer no infinito deve surgir sempre na mesma posição do ecrã de projecção. Assim, para que esta premissa se cumpra, a câmara fotográfica, mais especificamente o seu eixo óptico, deve ser perpendicular ao movimento que a mesma descreve na captura fotográfica. Isto é, a câmara fotográfica deve mover-se ao longo de um percurso cuja posição e comprimento correspondem à localização e dimensão horizontal do holograma estereográfico, o que será dizer que a câmara captura imagens bidimensionais da cena de pontos de vista que correspondem às localizações das fendas estereográficas (hologramas elementares).

O ecrã de projecção, que se encontra paralelo à placa holográfica e portanto paralelo ao movimento descrito pela câmara fotográfica, não é mais que uma secção da pirâmide formada pelos limites da cena visível e a câmara fotográfica (figura 43). Deste modo, as imagens bidimensionais projectadas no ecrã de projecção correspondem às perspectivas que um observador obteria quando colocado nas mesmas posições da câmara.

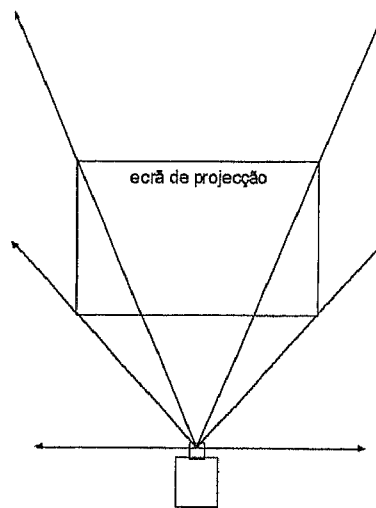


Figura 43 – O ecrã de projecção é uma secção da pirâmide formada pelos limites da cena visível e a câmara fotográfica.

Se, pelo contrário, durante a captura das imagens fotográficas (bidimensionais) a câmara rodar sobre o seu eixo vertical, no sentido de manter centrada a cena (ver secção 7.1.5), isto é, se o plano do filme fotográfico não for em todas as imagens paralelo em relação ao plano do objecto, na projecção as imagens registadas sofrerão alterações de escala, variando o seu valor entre os lados esquerdo e direito da imagem, não permitindo, portanto, uma fusão correcta das imagens adjacentes. Esta distorção, chamada *keystoning* está de uma forma esquemática representada na figura 44.

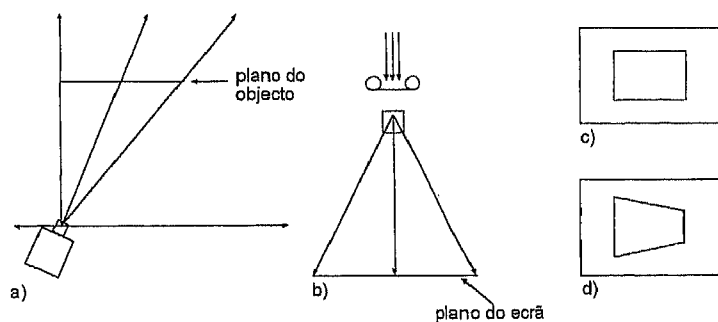


Figura 44 – Distorção de *keystoning*: (a) captura fotográfica; (b) projecção; (c) imagem sem distorção e (d) imagem com distorção.

Quando a correspondência entre a geometria de captura fotográfica e a geometria de exposição holográfica é mantida, as imagens de todos os pontos dos objectos que compõem a cena serão localizados de tal forma no ecrã de projecção que reconstituem a mesma profundidade da cena original. No entanto, é possível reproduzir um objecto numa escala diferente, sem distorções, se a geometria da exposição holográfica for um modelo à escala da geometria da captura fotográfica.

Para que a reprodução ocorra sem distorções esse escalamento entre as duas geometrias deve obedecer aos seguintes critérios: os ângulos representados na figura 45 por A e A' devem ser iguais, assim como os ângulos B e B'. Se este critério for violado, uma ou mais dimensões do objecto sofrerão distorções; por exemplo, a profundidade a que o objecto é reconstruído estereoscopicamente pode ser alterada (secção 3.2.1.2).

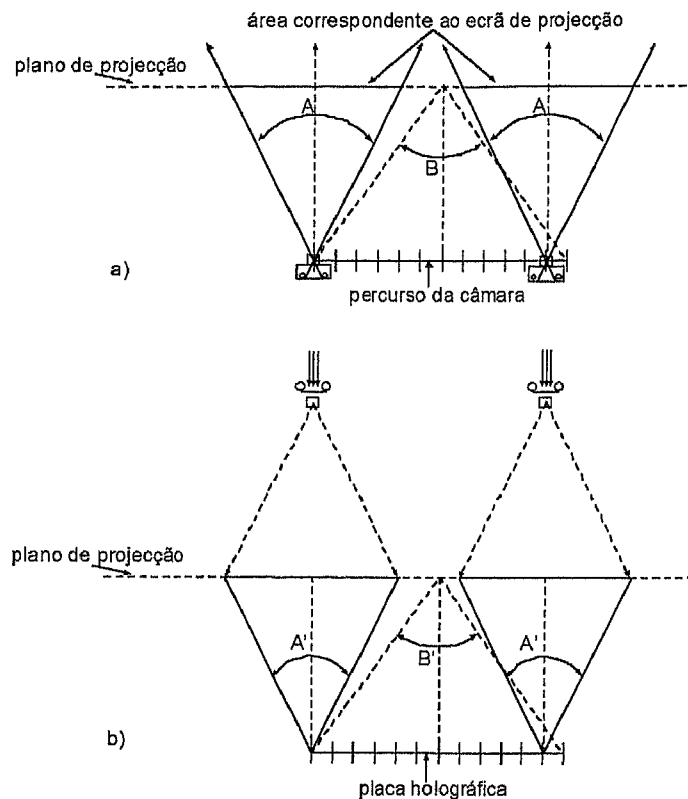


Figura 45 – Relação de correspondência entre as geometrias de captura e de exposição holográfica com uma câmara normal: (a) captura fotográfica; (b) exposição holográfica.

Esta geometria de captura fotográfica não apresenta o inconveniente de “cortar” (*vignetted*) os objectos distantes da câmara fotográfica, pois a posição relativa de um objecto na imagem capturada altera-se pouco de fotograma para fotograma, mantendo-se sempre no campo de visão da câmara e por conseguinte ficando sempre visível para o observador do estereograma. No entanto, os objectos distantes raramente são o centro de interesse nas imagens estereográficas devido à pequena disparidade que as perspectivas das diferentes imagens apresentam.

Objectos mais próximos da câmara, em posições de maior interesse, movem-se relativamente mais de imagem para imagem, sendo por isso facilmente “cortados” pelo campo de visão da câmara (*vignetted*), principalmente nas imagens capturadas próximo dos extremos do seu percurso. Uma das soluções para este problema, a mais simples e económica, é uma escolha criteriosa da distância focal da objectiva, fazendo deste modo

variar o ângulo de abertura horizontal da mesma (ângulo A na figura 42). Outras soluções mais versáteis existem, infelizmente bastante mais dispendiosas; estas soluções são baseadas em objectivas especiais ou em câmaras de estúdio. As primeiras permitem uma recentragem através da utilização de objectivas cujo eixo óptico é descentrável, as segundas através das características que algumas câmaras fotográficas de estúdio têm de o seu corpo basculante permitir uma recentragem do plano do filme.

Tanto a objectiva com recentragem como a câmara com recentragem permitem que um ponto do objecto surja sempre centrado em todas os fotogramas, mantendo-se assim estacionário de ponto de vista para ponto de vista. Na realidade, pontos do objecto situados antes ou depois do plano estacionário movem-se horizontalmente mas, a uma velocidade menor do que quando capturados com uma câmara normal. Obviamente, a geometria de captura e a geometria de exposição holográfica a utilizar com estes dispositivos, devem também manter a correspondência.

A figura 46 mostra a relação de correspondência entre as geometrias de captura e de exposição para uma câmara com recentragem. Tal como na caso da câmara fotográfica normal, os ângulos A - A' e B - B' devem ser mantidos iguais.



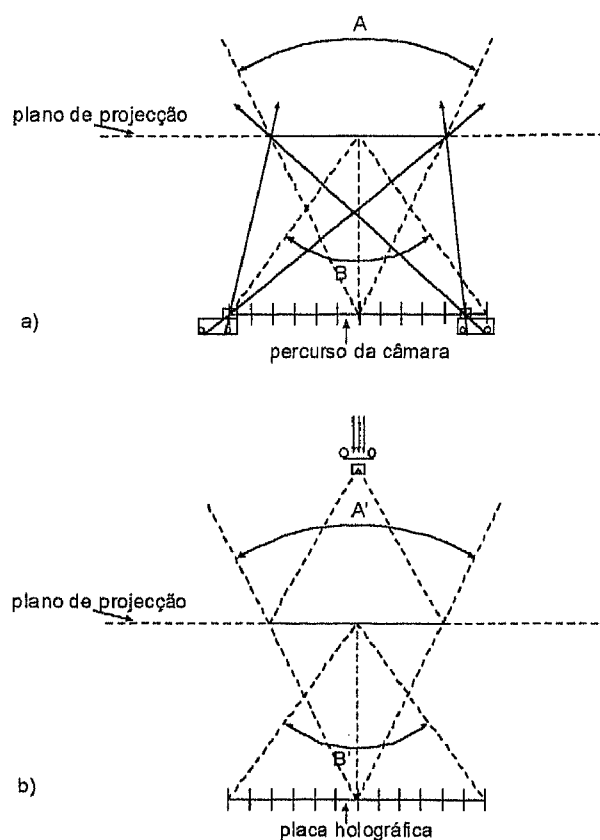


Figura 46 – Relação de correspondência entre as geometrias de captura e de exposição holográfica com uma câmara com recentragem: (a) captura fotográfica; (b) exposição holográfica.

A utilização de objectivas especiais ou de câmaras com recentragem, acima mencionados, implica a utilização de uma geometria de registo holográfico com uma fenda móvel e um suporte de placa holográfica fixo. De facto, como um ponto central do objecto surge centrado em todos os fotogramas capturados, se fosse utilizada uma geometria com a fenda fixa, cada holograma elementar reconstruiria, inevitavelmente, esse ponto na sua perpendicular, originando assim, como se viu na secção 7.1.3, uma imagem estereoscópica desse ponto no infinito.

No presente estudo, utilizou-se para a captura das imagens bidimensionais uma câmara fotográfica sintetizada pelo *software* do 3d-Studio; trata-se de uma câmara com as características de uma câmara fotográfica normal.

7.1.5. Formas de recentragem com uma câmara fotográfica normal

Quando se utiliza uma câmara fotográfica normal existem dois processos simples para recentrar um objecto ao longo das várias imagens capturadas. Contudo, qualquer um dos processos, exemplificados na figura 47, introduz distorções significativas na imagem estereoscópica final.

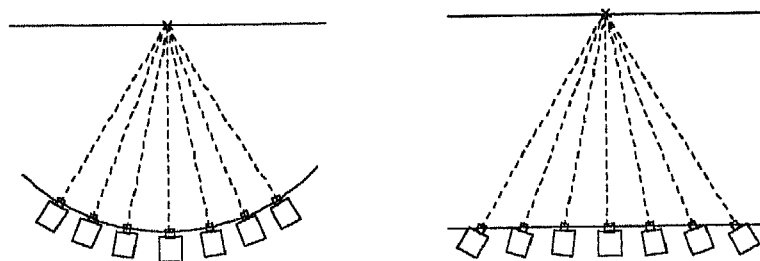


Figura 47 – Dois processos de recentrar um objecto com uma câmara normal.

O primeiro processo, consiste em mover a câmara sempre virada para o objecto ao longo de um caminho circular cujo centro é esse mesmo objecto. Este processo é equivalente a um outro em que a câmara encontrando-se numa posição fixa captura imagens de um objecto que se encontra em rotação sobre si próprio. Obviamente, a correspondência necessária entre a posição da câmara e a posição do observador só se mantém se o holograma for curvo. Como a placa holográfica usada é plana, a câmara ao mover-se segundo um percurso curvo introduz distorções que serão mais notórias quanto mais afastadas estiverem as imagens projectadas do centro da placa holográfica.

O segundo processo consiste em mover a câmara ao longo de um caminho em linha recta e antes de cada captura fotográfica alinhar a câmara de modo a que a mesma se

encontre sempre direccionada para o objecto. Este método provoca o tipo de distorção, já antes mencionada na secção 7.1.4, conhecida por *keystoning*. Esta distorção é provocada porque o plano do filme deixa de estar paralelo ao plano do objecto durante a captura enquanto que na exposição holográfica se encontra paralelo ao plano do ecrã. No entanto, comparando os dois processos, o último apresenta menores distorções, pois a câmara ocupa uma posição correspondente àquela que o observador irá ocupar quando da reconstrução do holograma estereográfico.

7.1.6. Transferência

Para manter a correspondência entre a captura fotográfica, exposição holográfica e reconstrução, os olhos do observador devem, como antes se disse, estar localizados sobre o plano do holograma. Esta é uma posição incómoda. Para a evitar, produz-se uma transferência holográfica de modo a que seja projectada no espaço uma imagem real de cada fenda. Assim, na reconstrução do holograma de transferência o observador irá estar colocado na posição da imagem real de cada fenda (figura 48).

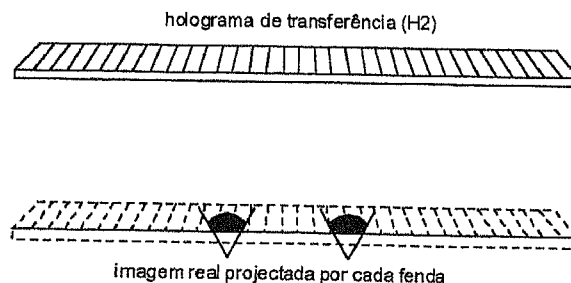


Figura 48 – Reconstrução no espaço das imagens reais de cada fenda num holograma estereoscópico de transferência.

Uma outra razão, de não menor importância, para a utilização da transferência holográfica, é o facto de por este processo ser possível criar um holograma de reflexão que viabiliza a reconstrução da imagem holográfica com luz branca (secção 4.5.5).

O processo de transferência de um holo-estereograma de transmissão é semelhante ao da transferência de um normal holograma de transmissão. A transferência do holograma estereográfico inicial, H1 ou *master*, é produzida iluminando todas as fendas com um feixe de luz igual ao feixe referência mas numa direcção oposta, isto é, iluminando o holograma H1 com um feixe conjugado com o feixe de referência. Cada holograma elementar projectará assim uma imagem real do ecrã de projecção a uma distância igual à que o separava do ecrã de projecção na altura do registo.

A área de transferência, como se pode ver na figura 49, é superior à área do holograma *master*. Por essa razão, a placa holográfica usada para registar a transferência (H2) deve ser maior que a placa H1. Caso contrário, as imagens produzidas pelas fendas correm o risco de não serem registadas na totalidade.

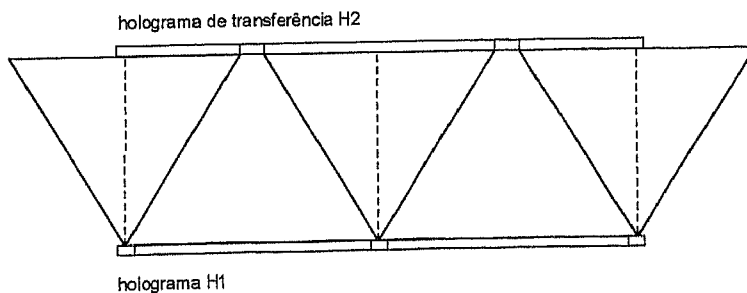


Figura 49 – A área de transferência é superior à área do holograma estereográfico H1.

7.1.7. Dimensão da fenda

Temos vindo a considerar que a dimensão da fenda é igual ao diâmetro da pupila do olho do observador mas, na realidade, a escolha da dimensão ideal da fenda é um compromisso prático. Isto é, quando a fenda é mais larga que a pupila do olho do observador, a perspectiva do objecto salta significativamente de uma imagem para a seguinte conforme o observador se movimenta horizontalmente. Quando, pelo contrário, a fenda tem uma dimensão inferior à da pupila do olho do observador, este vê ao mesmo tempo várias imagens.

Uma fenda de dimensão inferior ao diâmetro da pupila do observador é, apesar de tudo, a que permite uma reconstrução do objecto mais correcta. A razão deste facto deve-se, segundo Halle, à circunstância de que um ponto do objecto ao surgir numa posição ligeiramente diferente em cada imagem projectada permite que as frentes de onda emitidas pela imagem desse ponto sejam, em cada holograma elementar, uma aproximação da frente de onda que esse ponto emitiria na realidade (Halle, 1991) (figura 50). Assim, quanto maior for a frequência de amostragem (equivalente ao número de fendas), menor será a diferença entre as frentes de onda produzidas pelo objecto e aquelas produzidas pelas imagens desse objecto no plano do ecrã.

Os principais obstáculos à escolha de fendas com uma dimensão muito inferior à da pupila humana são, por um lado, o poder ocorrer uma perda de definição da imagem do objecto devido à difracção e ao aumento do *speckle* e, por outro, as implicações que um aumento da amostragem acarreta, desde o rigor geométrico na captura fotográfica e na exposição holográfica ao aumento do tempo necessário para a exposição holográfica de todas as fendas.

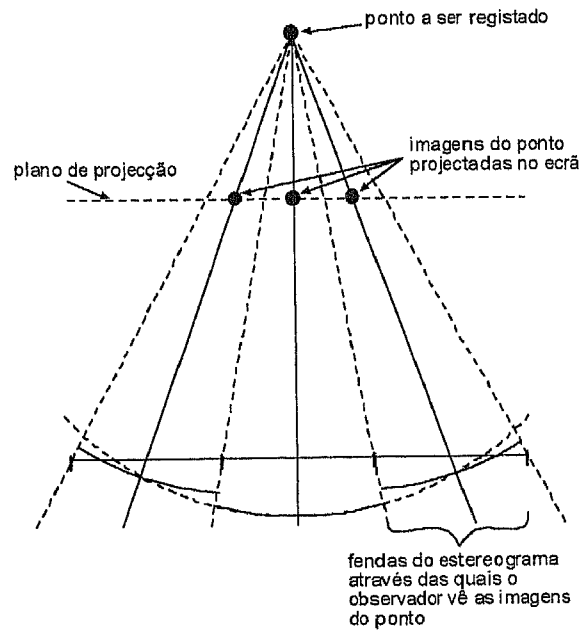


Figura 50 – Frentes de onda produzidas por um ponto e pelas várias imagens projectadas desse ponto.

Uma fórmula proposta por King, Noll e Berry (M. C. King, 1970) para o cálculo da dimensão ideal da fenda é a apresentada na equação seguinte:

$$\Delta_{fenda} < \frac{pD}{D+d} \quad (7.1)$$

onde: p é o diâmetro da pupila;

D é a distância do holograma ao plano do ecrã; e

d é a distância do plano do holograma ao observador.

7.1.8. Ângulo da paralaxe estereoscópica

A sensação de profundidade espacial binocular é, como se viu, resultante dos olhos do observador verem a cena de diferentes pontos de vista, isto é, cada olho do observador capta uma imagem bidimensional com uma perspectiva ligeiramente diferente

da captada pelo outro olho. No entanto, quando essa diferença de perspectiva é demasiado grande, o cérebro deixa de ter capacidade para fundir as duas imagens bidimensionais impossibilitando assim a sensação de profundidade (secção 3.1.2.3). Desta forma, a diferença entre as duas imagens percebidas pelo observador deve obedecer a um critério há muito estudado na fotografia estereoscópica.

Com efeito, existe um conceito utilizado em fotografia estereoscópica que é o conceito de **base**. A base é a relação entre a distância da câmara fotográfica (ou observador) ao objecto, denominada distância principal, e a distância entre pontos de vista (ou distância inter-pupilar). A expressão para o seu cálculo é a seguinte:

$$Base = \frac{D}{d} \quad (7.2)$$

onde: D é a distância principal; e

d é a distância inter-pupilar.

O valor da base, segundo Ferwerda, deve-se situar entre 30 e 1000 para um bom efeito estereoscópico. A estes valores corresponde um ângulo da paralaxe entre 0,95 e 0,0028° (Ferwerda, 1990). Deve-se no entanto salientar que obtivemos bons resultados estereoscópicos com ângulos da paralaxe de 2,4° e uma base de 23,85.

É interessante notar que o ângulo da paralaxe utilizado por Muybridge nos seus trabalhos sobre o movimento do ser humano foi de 0,57°, o que corresponde exactamente a uma base de 100 (Pizzanelli, 1995).

8. Resultados experimentais

Nesta secção iremos descrever alguns dos resultados obtidos nos testes realizados no âmbito desta investigação.

Foram realizados dois grupos de testes, o grupo A e o grupo B. O grupo A teve por finalidade estudar até que ponto a dimensão da fenda interfere na qualidade da reconstrução estereoscópica. O grupo B foi a aplicação da técnica desenvolvida no sentido de obter um holograma com maior interesse estético. Ainda no grupo B pretendeu-se, também, introduzir movimento em alguns objectos, nomeadamente no globo terrestre e no fumo sob o mesmo.

8.1. Características do material de captura fotográfica

O material de captura fotográfica utilizado em todas as experiências foi a película de diapositivos a cores Agfa RSX (100 ASA). As razões que levaram à opção por uma película de diapositivos a cores, em lugar de uma película a preto e branco (positivo ou

negativo), prendem-se com o facto de, por um lado, ser difícil encontrar películas de diapositivos a preto e branco e, por outro lado, porque o suporte das películas de negativo a preto e branco (que eventualmente poderia ser passado a positivo por processos químicos) é opticamente activo para o laser, podendo por essa mesma razão alterar a polarização do laser (Saxby, 1994).

8.2. Características do material de registo holográfico

O material de registo holográfico utilizado foi a emulsão de halogenetos de prata PFG-01 produzida pela SLAVICH em suporte de vidro com as dimensões de 127x102x3mm.

Todos os dados que se seguem nesta secção foram extraídos do catálogo fornecido pelo fabricante.

A curva, que mostra a sensibilidade espectral versus comprimento de onda é apresentada na figura 51.

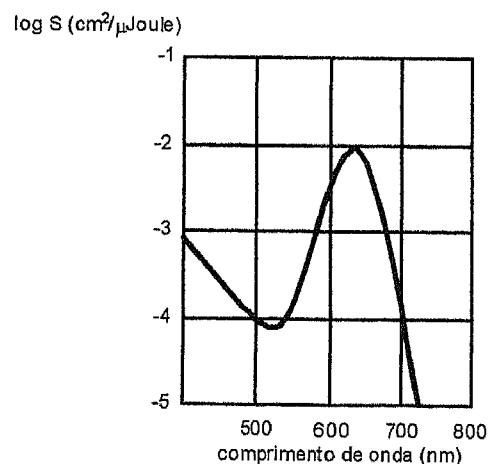


Figura 51 – Curva de sensibilidade espectral (extraído de dados técnicos fornecidos pelo fabricante).

A figura 52 mostra a curva da densidade óptica da emulsão versus energia depois de uma exposição a uma radiação contínua e revelação.

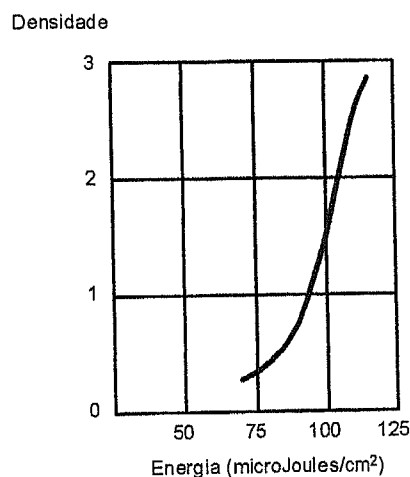


Figura 52 – Curva de densidade óptica versus energia (extraído de dados técnicos fornecidos pelo fabricante).

Apesar da curva relevante para a holografia ser a curva de transmitância de amplitude esta não consta nos dados técnicos fornecidos pelo fabricante, no entanto existe uma relação entre as duas curvas (curva de transmitância de amplitude e curva de densidade).

As características do tamanho do grão da emulsão são apresentadas na figura 53 e a eficiência de difracção versus exposição para hologramas de reflexão (usando um laser contínuo) na figura 54.

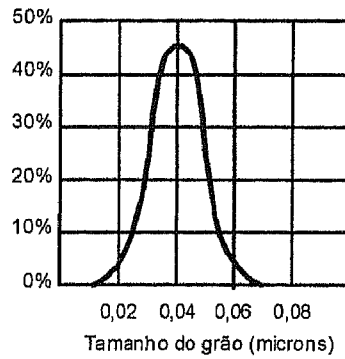


Figura 53 – Características do tamanho do grão (extraído de dados técnicos fornecidos pelo fabricante).

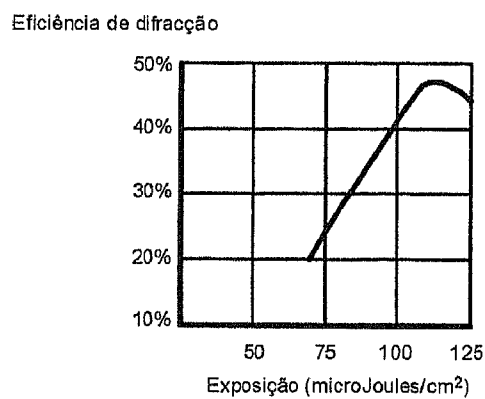


Figura 54 – Eficiência de difração versus exposição para hologramas de reflexão (extraído de dados técnicos fornecidos pelo fabricante).

O poder de resolução desta emulsão é de 3000 linhas/mm.

8.3. Características do laser

O laser que se utilizou em todas as experiências foi um laser de He-Ne, com o comprimento de onda de 632,8 nm, a potência de 30 mW, uma polarização de 1000:1 e apresentando um diâmetro de feixe ($1/e^2$) de 1,25 mm.

8.4. Processamento químico

Todo o processamento químico foi feito de acordo com as indicações dadas pelo fabricante das placas holográficas e pode ser consultado nas tabelas seguintes:

Processamento químico	
Fases	Tempos a 20 ° C
revelação (SM-6)	2,5 minutos
banho de paragem (água)	3 minutos
branqueamento (PBU-Amidol)	± 2 minutos (até a placa ficar transparente)
lavagem (água corrente)	10 minutos
lavagem final (Agepon diluído)	1 minuto

Revelador SM-6	
Reagente	Quantidade
Ácido ascórbico	18,0 g
Hidróxido de sódio	12,0 g
Fenidona	6,0 g
Fosfato de sódio (dibásico)	28,4 g
Água q.b.p.	1,0 litro

Branqueador PBU-Amidol	
Reagente	Quantidade
Persulfato de potássio	10,0 g
Ácido cítrico	50,0 g
Brometo de cobre	1,0 g
Brometo de potássio	20,0 g
Amidol	1,0 g
Água p.b.p.	1,0 litro

Foram feitos vários testes no sentido de encontrar a melhor relação energia / eficiência de refração. Nestes testes, verificou-se que a melhor eficiência se produzia quando eram aplicados 100 microJoules/cm², aliás dentro dos valores indicados pelo fabricante.

8.5. Grupo A

8.5.1. Registo fotográfico

As imagens para estes testes foram produzidas em computador por um programa de modelação de objectos (3D-Studio). Estas imagens, em formato *bitmap* com 800x600 *pixels* numa escala de 255 cinzentos (8 *bits*), foram posteriormente fotografadas num ecrã de 17 polegadas com uma câmara equipada com uma objectiva de 65 mm, uma exposição de 1/5 segundo e um diafragma de *f*/#5,6.

A imagem foi propositadamente construída com um fundo de elementos lineares, formando quadrados, para mais facilmente se detectarem quaisquer deformações na imagem holográfica final.

A figura 55 a) e b) apresenta, respectivamente, a imagem capturada no início do percurso da câmara (imagem mais à esquerda) e a imagem recolhida no final desse percurso (imagem mais à direita).

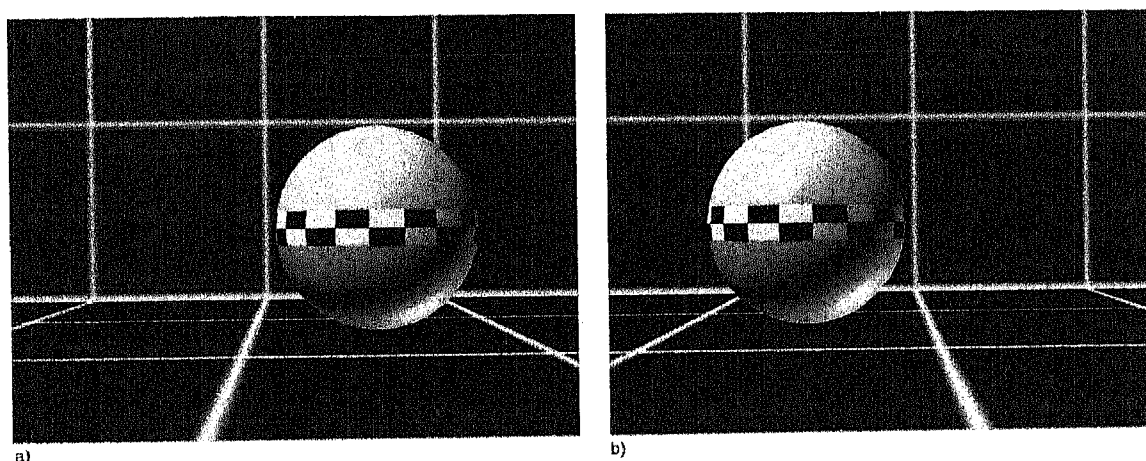


Figura 55 – Imagem usada nas experiências do grupo A: (a) capturada da posição mais à esquerda da câmara; (b) capturada da posição mais à direita da câmara.

O objecto, uma esfera com um raio de 200 mm, estava posicionado a 1550 mm da câmara fotográfica sintética e a 689 mm do fundo. A distância focal da objectiva da câmara sintética escolhida foi de 50 mm, permitindo assim um ângulo de abertura horizontal de $39,598^\circ$ de modo a evitar o “corte” (*vignetted*) do objectos nos fotogramas capturados nos extremos do percurso da câmara. A câmara fotográfica sintética moveu-se ao longo de um percurso em linha recta, paralelo ao plano do objecto, com 312 mm. A distância entre as posição adjacentes da câmara foi de 3 mm, originando 105 imagens, com uma diferença angular (aproximada) de $0,10^\circ$. A geometria usada na captura fotográfica foi a que está representada na figura 56.

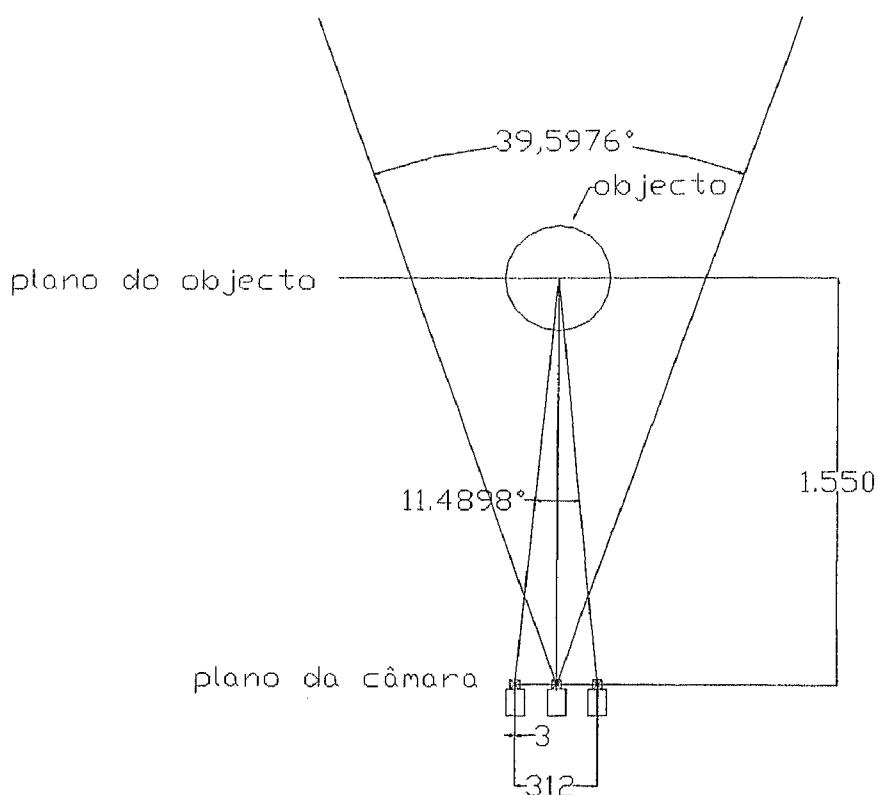
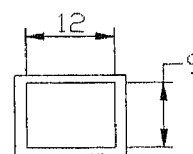


Figura 56 – Vista de topo da geometria de captura do grupo A.

8.5.2. Registo holográfico

Foram realizados vários testes variando tanto a dimensão da fenda como o ângulo entre as imagens adjacentes. Assim, foram produzidos hologramas estereográficos de transmissão com fendas de 1 mm, de 2 mm e de 3 mm, correspondendo respectivamente ângulos entre imagens adjacentes de 0,1°, 0,2° e 0,3°. Estes hologramas numerados de id#49, id#50 e id#51 foram posteriormente transferidos para hologramas de reflexão.

A geometria do registo holográfico de transmissão está representada na figura 57.



OO – 271,35 cm
OR – 271,4 cm
L1 – Lente com d.f. de 27,0 cm
L2 – Lente com d.f. de 27,0 cm
Fe1 – Objectiva de microscópio 30X; pinhole de 10 microns
Fe2 – Objectiva de microscópio 60X; pinhole desconhecido
OP – Objectiva de projecção com d.f. de 240 mm; $f/\#$ 5,7
EP – Ecrã de projecção
PP – Porta películas (diapositivos)
BS – Espelho semi-transparente
E – Espelho
H1 – Placa holográfica

117

No feixe referência da geometria de transferência (figuras 58 e 59), foi necessário introduzir uma lâmina de $\lambda/2$ para que a polarização de ambos os feixes ficasse perpendicular ao plano formado pelos mesmos feixes. A razão desta necessidade prende-se com o facto, como se viu na secção 6.6, da interferência máxima ser obtida apenas quando os dois feixes se encontram s-polarizados.

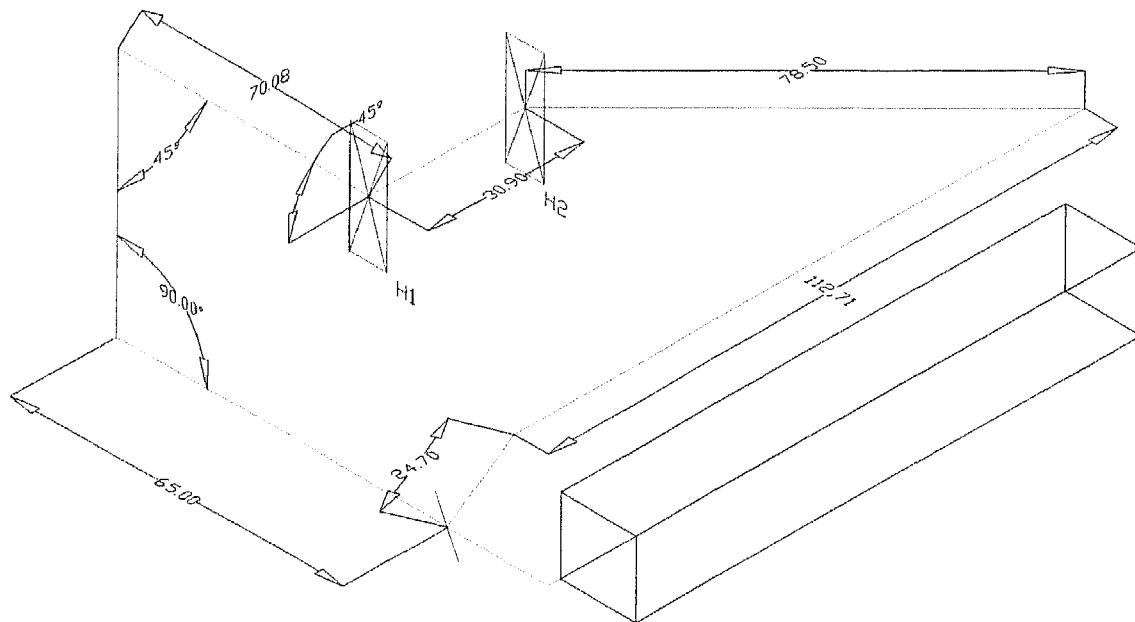
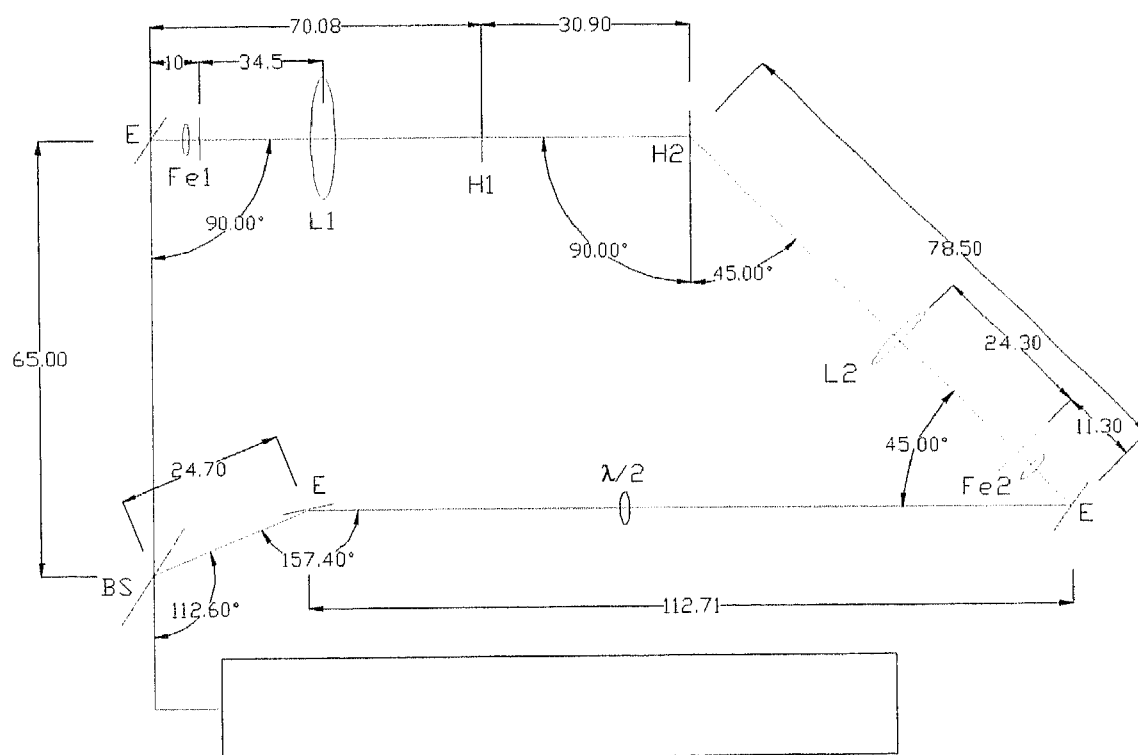


Figura 58 – Vista em perspectiva da geometria de transferência para obter hologramas estereográficos de reflexão (valores expressos em centímetros e graus).



OO – 215,9 cm
 OR – 215,9 cm
 L1 – Lente com d.f. de 30,0 cm
 L2 – Lente com d.f. de 30,0 cm
 Fe1 – Objectiva de microscópio 63X; pinhole desconhecido
 Fe2 – Objectiva de microscópio 45X; pinhole desconhecido
 BS – Espelho semi-transparente
 E – Espelho
 H1 – Placa holográfica master
 H2 – Placa holográfica de transferência

Figura 59 – Vista de topo da geometria de transferência para obter hologramas estereográficos de reflexão
 (valores expressos em centímetros e graus).

Nas tabelas que se seguem pode ser consultados os valores presentes em cada um
 dos testes do grupo A.

Dados dos testes A

Id#49

registo fotográfico

D. focal da objectiva (d.f.)	50	mm
Distância principal (D)	1550	mm
Total de fotogramas (amostragem)	105	
Percurso total da câmara (d)	312	mm
Ângulo de abertura horizontal (A)	39,59775271	°
Dimen. Horiz. da cena capturada no plano do objecto	1116	mm
Distância entre posições da câmara	3	mm
Ângulo do percurso da câmara (B)	11,49437965	°
Ângulo da paralaxe interpupilar (65mm)	2,402374214	°
Base	23,85	
Ângulo médio utilizado entre câmaras	0,110522881	°

registo holográfico - transmissão

Dimensão da imagem projectada	120	mm
Distância écran de projecção/holograma	300	mm
Dimensão da fenda	1	mm
Intervalo entre fotogramas	1	
Ângulo médio entre imagens projectadas	0,110522881	°
Nº total de fendas	105	
Intensidade de OR	5	microW/cm2
Intensidade de OO	1	microW/cm2
Intensidade total	6	microW/cm2
Ratio entre OR e OO	5,00	
Exposição	17	segundos
Energia por área	102	microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma master (H1)	105	mm

registo holográfico - reflexão (transferência)

Distância H1-H2	309	mm
Intensidade de OR	2,54	microW/cm2
Intensidade de OO	1,26	microW/cm2
Intensidade total	3,8	microW/cm2
Ratio entre OR e OO	2,02	
Exposição	25	segundos
Energia por área	95	microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma transferência (H2)	120	mm

Id#50

registo fotográfico

D. focal da objectiva (d.f.)	50	mm
Distância principal (D)	1550	mm
Total de fotogramas (amostragem)	105	
Percurso total da câmara (d)	312	mm
Ângulo de abertura horizontal (A)	39,59775271	°
Dimen. Horiz. da cena capturada no plano do objecto	1116	mm
Distância entre posições da câmara	3	mm
Ângulo do percurso da câmara (B)	11,49437965	°
Ângulo da paralaxe interpupilar (65mm)	2,402374214	°
Base	23,85	
Ângulo médio utilizado entre câmaras	0,110522881	°

registo holográfico - transmissão

Dimensão da imagem projectada	120	mm
Distância écran de projecção/holograma	300	mm
Dimensão da fenda	2	mm
Intervalo entre fotogramas	2	
Ângulo médio entre imagens projectadas	0,221045762	°
Nº total de fendas	53	
Intensidade de OR	5	microW/cm2
Intensidade de OO	1	microW/cm2
Intensidade total	6	microW/cm2
Ratio entre OR e OO	5,00	
Exposição	17	segundos
Energia por área	102	microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma master (H1)	108	mm

registo holográfico - reflexão (transferência)

Distância H1-H2	309	mm
Intensidade de OR	3,15	microW/cm2
Intensidade de OO	1,36	microW/cm2
Intensidade total	4,51	microW/cm2
Ratio entre OR e OO	2,32	
Exposição	23	segundos
Energia por área	103,73	microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma transferência (H2)	120	mm

id#51	
registo fotográfico	
D. focal da objectiva (d.f.)	50 mm
Distância principal (D)	1550 mm
Total de fotogramas (amostragem)	105
Percurso total da câmara (d)	312 mm
Ângulo de abertura horizontal (A)	39,59775271 °
Dimen. Horiz. da cena capturada no plano do objecto	1116 mm
Distância entre posições da câmara	3 mm
Ângulo do percurso da câmara (B)	11,49437985 °
Ângulo da paralaxe interpupilar (65mm)	2,402374214 °
Base	23,85
Ângulo médio utilizado entre câmaras	0,110522881 °
registo holográfico - transmissão	
Dimensão da imagem projectada	120 mm
Distância écran de projecção/holograma	300 mm
Dimensão da fenda	3 mm
Intervalo entre fotogramas	3
Ângulo médio entre imagens projectadas	0,331568644 °
Nº total de fendas	35
Intensidade de OR	5 microW/cm2
Intensidade de OO	1 microW/cm2
Intensidade total	6 microW/cm2
Ratio entre OR e OO	5,00
Exposição	17 segundos
Energia por área	102 microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma master (H1)	105 mm
registo holográfico - reflexão (transferência)	
Distância H1-H2	309 mm
Intensidade de OR	3,55 microW/cm2
Intensidade de OO	3,4 microW/cm2
Intensidade total	6,95 microW/cm2
Ratio entre OR e OO	1,04
Exposição	23 segundos
Energia por área	159,85 microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma transferência (H2)	120 mm

As figuras 60, 61 e 62 mostram, respectivamente, uma fotografia de cada um dos hologramas finais (reflexão).

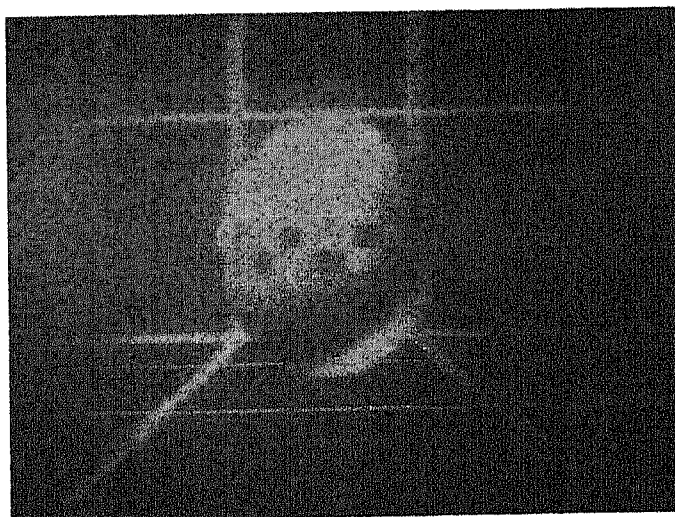


Figura 60 – Fotografia do holograma id#49. Fenda com 1 mm e ângulo entre imagens adjacentes de aproximadamente 0,1°.

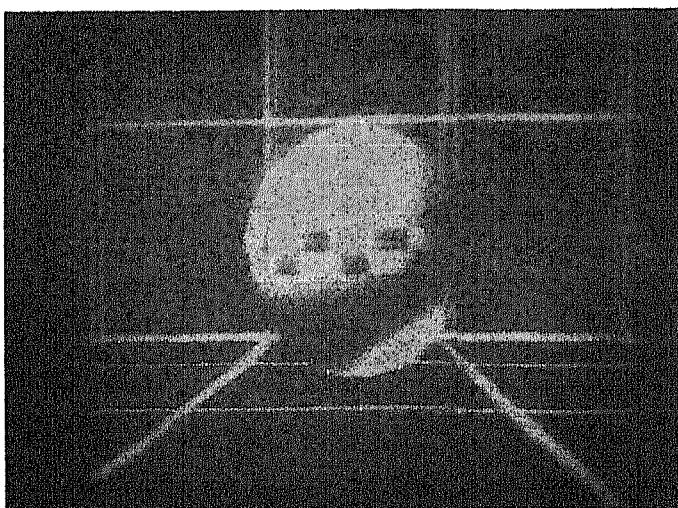


Figura 61 – Fotografia do holograma id#50. Fenda com 2 mm e ângulo entre imagens adjacentes de aproximadamente $0,2^\circ$.

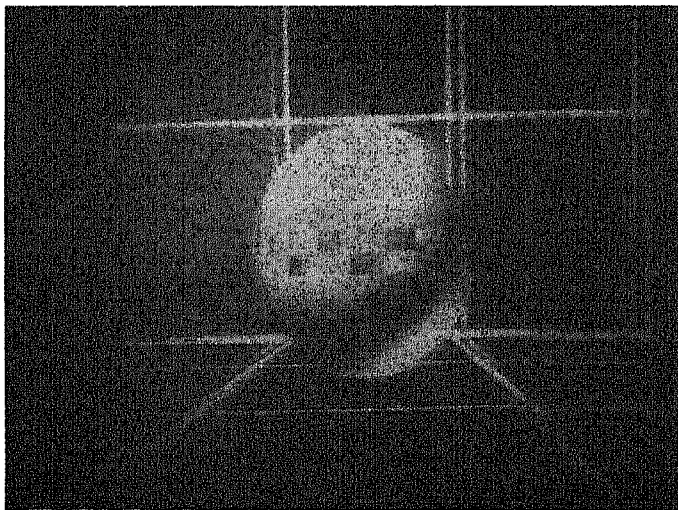


Figura 62 – Fotografia do holograma id#51. Fenda com 3 mm e ângulo entre imagens adjacentes de aproximadamente $0,3^\circ$.

8.6. Grupo B

8.6.1. Registo fotográfico

O objectivo deste teste foi, como se disse, produzir um holograma com maior interesse plástico e eventualmente algum movimento. Assim, as imagens criadas em computador (3D Studio) são uma pequena animação, existindo movimento apenas no globo terrestre e no fumo existente sob o mesmo. O movimento do globo terrestre entre o início e o final da animação (105 imagens) é cerca de 180° . A figura 63 apresenta a imagem mais à esquerda, (a), e a mais à direita, (b), do percurso da câmara fotográfica.

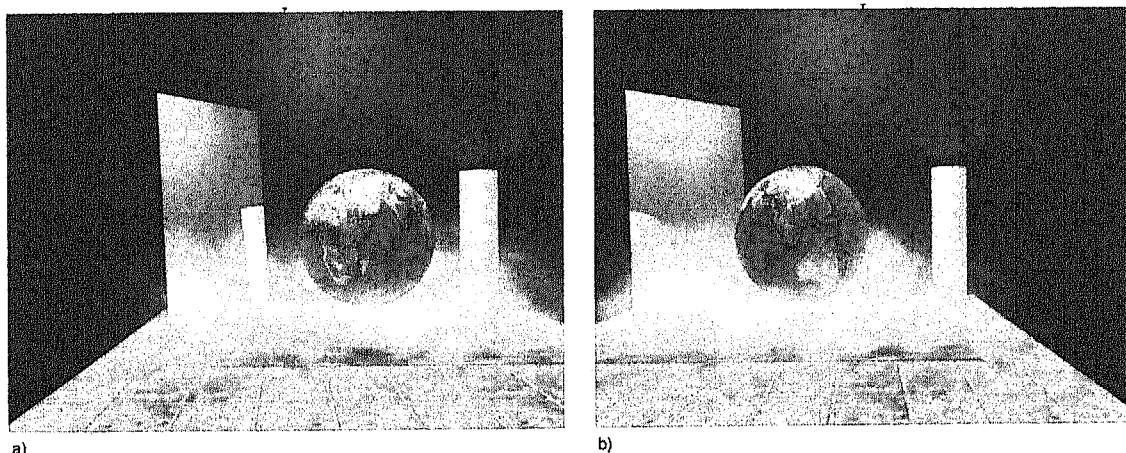


Figura 63 – Imagem usada nas experiências do grupo B: (a) capturada da posição mais à esquerda da câmara; (b) capturada da posição mais à direita da câmara.

O objecto com um diâmetro de 56,64 mm distava 218,9 mm da câmara fotográfica sintética. A câmara fotográfica sintética moveu-se ao longo de um percurso em linha recta com 60 mm e paralelo ao plano do objecto. No seu movimento foi capturada uma imagem de 0,57 em 0,57 mm. Assim, durante o percurso da câmara, foram capturados 105 fotogramas, obtendo-se um ângulo aproximado de $0,15^\circ$ entre imagens adjacentes.

Para que os objectos não fossem “cortados” (*vignetted*) pelo ângulo de abertura horizontal da câmara usou-se uma objectiva com uma distância focal de 33,756 mm (ângulo de abertura horizontal de 56,133°).

As imagens com 800x600 *pixels* a 255 cores foram materializadas num ecrã de 17 polegadas e, tal como nos testes anteriores, fotografadas com uma câmara equipada com uma objectiva de 65 mm de distância focal, uma exposição de 1/5 segundo e uma abertura de f/#5,6.

Na figura 64 esta representada a geometria da captura fotográfica.

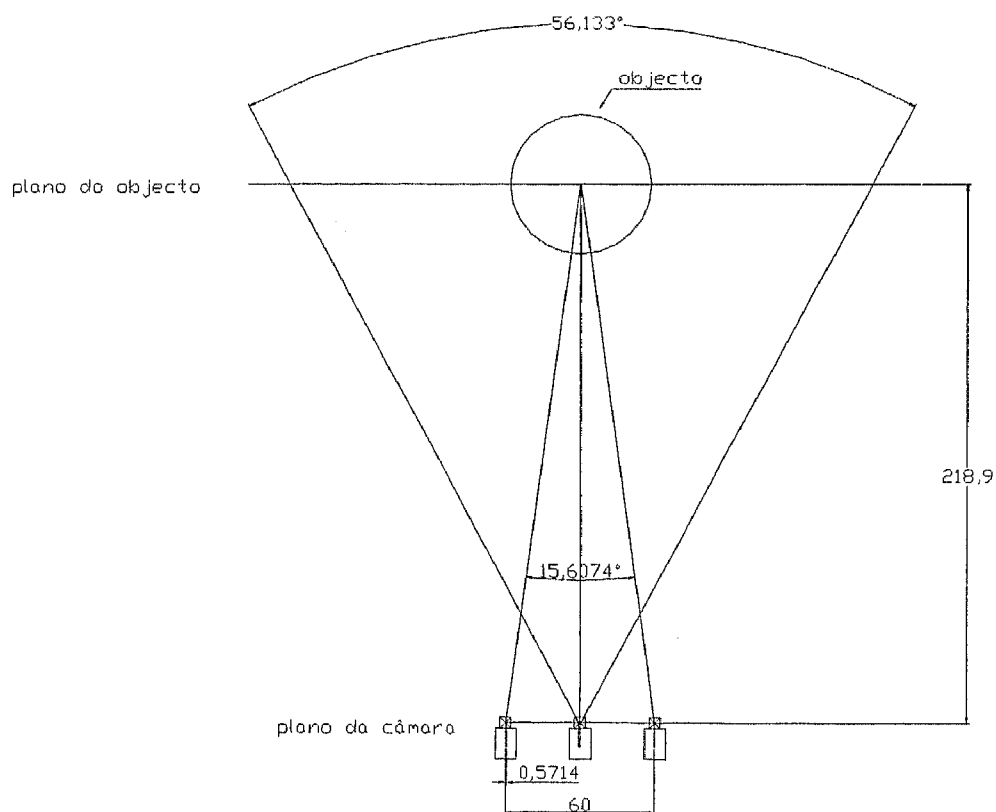


Figura 64 – Geometria de captura do grupo B.

8.6.2. Registo holográfico

As geometrias das montagens para o registo holográfico (transmissão e transferência) foram as mesmas que se usaram nos testes do grupo A.

Na tabela que se segue podem ser consultados os valores presentes no teste do grupo B.

Dados do teste B

id#79		
registo fotográfico		
D. focal da objectiva (d.f.)	33,758495	mm
Distância principal (D)	218,9	mm
Total de fotogramas (amostragem)	105	
Percurso total da câmara (d)	60	mm
Ângulo de abertura horizontal (A)	56,13299984	°
Dimen. Horiz. da cena capturada no plano do objecto	233,434577	mm
Distância entre posições da câmara	0,576923077	mm
Ângulo do percurso da câmara (B)	15,60741469	°
Ângulo da paralaxe interpupilar (65mm)	16,88998327	°
Base	3,37	
Ângulo médio utilizado entre câmaras	0,150071295	°
registo holográfico - transmissão		
Dimensão da imagem projectada	120	mm
Distância écran de projecção/holograma	300	mm
Dimensão da fenda	2	mm
Intervalo entre fotogramas	1	
Ângulo médio entre imagens projectadas	0,150071295	°
Nº total de fendas	62	
Intensidade de OR	1,866	microW/cm2
Intensidade de OO	0,392	microW/cm2
Intensidade total	2,258	microW/cm2
Ratio entre OR e OO	4,76	
Exposição	45	segundos
Energia por área	101,81	microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma master (H1)	124	mm
registo holográfico - reflexão (transferência)		
Distância H1-H2	309	mm
Intensidade de OR	4,17	microW/cm2
Intensidade de OO	0,6	microW/cm2
Intensidade total	4,77	microW/cm2
Ratio entre OR e OO	6,95	
Exposição	21	segundos
Energia por área	100,17	microJ/cm2
Dimensão horizontal do holograma transferência (H2)	120	mm

A figura 65 mostra uma fotografia do holograma final (reflexão) do teste B.



Figura 65 – Fotografia do holograma id#79. Fenda de 2 mm e ângulo entre imagens adjacentes de aproximadamente $0,15^\circ$.

8.7. Sobre os resultados experimentais

Numa análise dos resultados experimentais, poderemos referir que em relação aos testes obtidos no grupo A, qualquer um dos hologramas apresenta um bom resultado estereoscópico, sendo de salientar o que foi produzido com uma fenda de 2 mm e um ângulo médio de captura entre câmaras de $0,2^\circ$ (holograma id#50 – figura 61). Teoricamente deveria ter sido obtido o melhor efeito estereoscópico com a fenda de menores dimensões, neste caso com 1 mm. A razão para o facto de assim não ser poder ficar a dever-se, em nosso entender, a vários factores, nomeadamente, à difracção e a reflexões parasitas entre as margens da fenda.

No que diz respeito ao teste do grupo B, obtiveram-se resultados inferiores em termos da sua qualidade holográfica. Este facto ficou a dever-se às imagens utilizadas serem em grande parte coloridas de azul, que como se sabe é uma cor opaca para o laser

utilizado. Assim, o tempo de exposição holográfica para cada holograma elementar teve que ser substancialmente aumentado, motivando pior qualidade final do holograma estereográfico total pois, mesmo com uma montagem relativamente estável, ao fim de algumas exposições holográficas, é natural que um ou outro holograma elementar tenha pior qualidade. Esta diminuição da qualidade é cumulativa no holograma final.

É ainda de salientar que nos testes aqui apresentados, devido ao facto de não ter sido mantida com rigor a correspondência entre a geometria de captura fotográfica e a geometria de exposição holográfica (referida na secção 7.1.4), a reconstrução estereoscópica surge a uma distância diferente daquela existente entre o objecto e a câmara no momento da captura fotográfica. Deste modo se se pretende uma reconstrução espacial rigorosa este factor é da maior importância.

Em relação ao movimento introduzido nos objectos, constatou-se que este deve ser, entre imagens adjacentes, mais subtil que o introduzido nestes testes. De facto, a fusão estereoscópica é dificultada devido à disparidade existente entre imagens. Por outro lado, esta disparidade, que resulta também da existência de uma diferença temporal entre as duas imagens captadas pelos olhos do observador, implica que a própria sequência no movimento fique menos contínua, resultando assim em “saltos” para um observador que se movimenta. Este aumento da disparidade, sendo em tudo equivalente a um aumento do ângulo de amostragem, pode ser restringida através de um aumento na frequência de amostragem.

Uma das dificuldades sentidas ao longo do trabalho experimental foi o alinhamento dos fotogramas (imagens 2-D) de modo a que ficassem sempre centrados no ecrã de projecção. Depois de vários melhoramentos optamos por um método que se

revelou bastante eficiente. Consta em introduzir, através de um programa gráfico, uma marca (uma pequena linha vertical), no centro da margem superior (ou inferior) de cada imagem. Marca essa que ao ser fotografada se repetirá em todos os fotogramas na mesma posição. Assim quando o fotograma é projectado basta alinhar essa marca, também ela projectada, com uma outra que previamente colocamos no ecrã de projecção. Essa marca para que seja mais visível na obscuridade do laboratório deve ser uma linha branca sobre um fundo negro. Deve-se ainda referir que o mínimo desalinhamento resulta numa pior, ou mesmo impossível, reconstrução estereoscópica.

Para além da questão do alinhamento dos fotogramas, também a construção da fenda levantou alguns problemas. No início, devido ao perfil das margens da fenda (figura 66 a) surgia uma zona sem imagem entre cada holograma elementar. Essa zona sem informação, provocada pela sombra projectada, apesar de ter uma dimensão reduzida interferia com a qualidade final do holograma. Assim, a fenda deve apresentar um perfil que não obstrua nenhuma zona do futuro holograma elementar, tendo em atenção o ângulo de incidência tanto do feixe referência como do feixe objecto (figura 66 b).

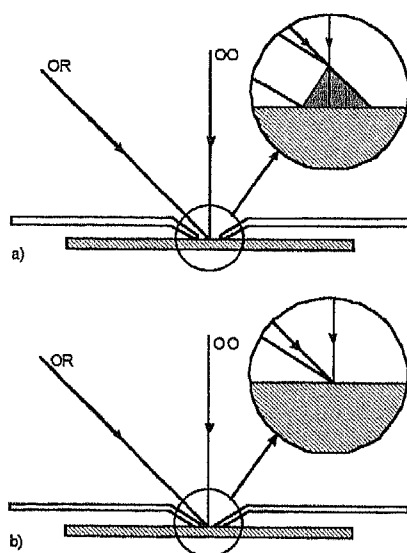


Figura 66 – Perfil da fenda: a) inicial; b) final

Em termos estéticos, tornou-se, contudo, evidente que devido ao “pequeno formato” das placas holográficas utilizadas, o efeito final não tem o impacto que seria possível obter com suportes de maiores dimensões.

9. Conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro

A holografia estereográfica, com o que pela captura das imagens fotográfica arrasta, permite a liberdade de ultrapassar as barreiras da matéria.

É a libertação do bidimensional, que desde o renascimento se buscou. Esta técnica, não só abre novas perspectivas à criação artística como também a áreas do conhecimento onde a representação espacial é essencial.

De um modo geral, foram reconhecidas, na experimentação, as implicações da correspondência entre as geometrias de captura fotográfica e de exposição holográfica, como determinantes na qualidade de reconstrução do espaço estereoscópico. A fidelidade estereoscópica poderia, assim, ver-se implicada nestas relações geométricas, sendo que o espaço estereoscópico é directamente proporcional às escalas relacionais entre as referidas geometrias. Mas, também, a frequência de amostragem/dimensão da fenda é constitutiva dessa qualidade espacio-temporal, assistindo-se, tal como em outras áreas da representação imagética (referimo-nos a áreas como o cinema, por exemplo), a uma reconstituição discreta de fenómenos contínuos no tempo e no espaço.

Como constatação principal fica a noção de que o processo exposto ao longo desta investigação é exequível, apesar da necessidade de um grande dispêndio de tempo para produzir um pequeno holograma estereográfico. Assim, um sistema automatizado de avanço da placa holográfica e exposição holográfica, com um ecrã de cristais líquidos (LCD) onde as imagens se formam directamente sem a necessidade do uso de películas fotográficas, é imprescindível para qualquer tentativa de produção de hologramas com maiores dimensões.

Ficarão, assim, algumas hipóteses que se abrem perante perspectivas futuras de investigação.

A primeira tendente a um estudo mais aprofundado das questões relativas ao movimento possível em hologramas estereográficos, nomeadamente aquele que resulta da movimentação de objectos tridimensionais em lugar da projecção de imagens bidimensionais (à semelhança do que se faz em alguns filmes de animação).

A segunda sobre o estudo das implicações que uma fenda com um perfil não rectangular pode levantar, nomeadamente as de uma fenda com um perfil de tipo graduado em intensidade.

A terceira e última sobre o estudo dos processos para a automatização da produção de hologramas estereográficos.

Em jeito de conclusão, poderíamos agora sintetizar que a *holografia estereográfica como meio de expressão artística* é, como o título diz, uma espécie precisa de união entre ciência e arte. Esta união que utilizou em primeira mão a precisão e o rigor da linguagem científica, lógica e matemática, e as suas imensas potencialidades, não olvidou, contudo, o carácter estético, nem deixou de utilizar a sua linguagem subjectiva.

Fez-nos isto compreender como se interpenetram universos que tradicionalmente se pensam opostos.

Como artista plástico, cuja prática se deslocou assim da subjectividade e gestualidade expressiva para a objectividade rigorosa e experimental, uma certeza, nesse desafio, foi adquirida: a de que, afinal, todas as linguagem têm validade quando se propõem à busca do conhecimento entendido como aproximação à verdade. Por esta razão, se o labor científico foi necessário para uma intenção estética, a intenção estética, por sua vez, pôde ver-se diluída no labor científico de que se dá mostras nesta pequena contribuição.

Deste percurso híbrido (entre arte e ciência, onde esta última predominou), não poderíamos deixar de fazer notar uma constatação curiosa daí decorrente, a da existência de uma espécie precisa de aliança, por vezes secreta, por vezes evidente, não tácita mas natural, flutuante, nos domínios tanto da arte como nos da ciência; referimo-nos, naturalmente à *imaginação* como um anel de ligação.

Imaginação, criadora, que de todos os modos se espera implicada, ainda, a uma continuidade dos processos aqui apresentados...

10. Referências

- Benton, S. A.** (1969). A Method of Reducing the Information Content of Holograms. *Journal of the Optical Society of America*. 59: 1545-6.
- Benton, S. A.** (1983). Photographic Holograph. *Proceedings of SPIE*. 391: 2 - 9.
- Bernardo, L. M.** (1994). Fundamentos de Processamento Óptico. Departamento de Física da Faculdade de Ciências. Porto, Universidade do Porto.
- Bernardo, L. M.** (1995). Introdução à Óptica Moderna. Departamento de Física - Faculdade de Ciências. Porto, Universidade do Porto.
- Bernardo, L. M.** (1995). Um Olhar sobre a Luz. Departamento de Física - Faculdade de Ciências. Porto, Universidade do Porto.
- Bjelkhagen, H. I.** (1993). Silver Halide Recording Materials for Holography and Their Processing. New York, Springer-Verlag.
- Cross, L.** (1977). Multiplex Holography. *SPIE*.
- DeBitetto, D. J.** (1969). Holographic Panoramic Stereograms Synthesized from White Light Recordings. *Applied Optics*. 8: 1740 - 1741.

- Denisyuk** (1962). Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field. *Journal of the Optical Society of America*. 53: 1377-81.
- E. N. Leith, J. U.** (1963). Wave front reconstruction with continuous-tone objects. *Journal of the Optical Society of America*. 53: 1377-81.
- E. N. Leith, J. U.** (1964). Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects. *Journal of the Optical Society of America*. 54: 1295-301.
- Ferwerda, J. G.** (1990). *The World of 3-D*. Borger - Netherlands, 3-D Book Productions.
- Foster, M.** (1974). Quoted in private communication with Benton S. A. (Feb 1976). *Proceedings of SPIE*.
- Freidenwald, J. S.** (1955). Knowledge of Space Perception and the Portrayal of Depth in Painting. *College Art Journal*. 15 (2): 96-112.
- Gabor, D.** (1948). A new microscopic principle. *Nature*. 161: 777-8.
- Gabor, D.** (1949). Microscopy by reconstructed wavefronts. *Proceedings of the Physical Society of America*.
- Glandard, J.** (s/d). *Manual do Fotógrafo e Cineasta Amador*. Lisboa, Livraria Bertrand.
- Halle, M. W.** (1991). *The Generalized Holographic Stereogram*. Media Arts and Sciences Section. Massachusetts, MIT: 124.
- Ivins, W.** (1938). *On the Rationalization of Sight*. New York, Metropolitan Museum.
- Lochak, J. A. e. S. e. G.** (1969). *Quanta Grãos e Campos*, Instituto de Novas Profissões.
- M. C. King, A. M. N. e. D. H. B.** (1970). A new approach to computer-generated holography. *Applied Optics*. 9.
- Mondrian, P.** (1945). *Plastic Art and the Pure Plastic Art*. New York, Wittenborn.
- Mueller, R. E.** (1967). *The Science of Art*. New York, John Day Co.

- N. Ohyama, Y. M., A. Watanabe, J. Tsujiuchi e T. Honda** (1987). Multiplex Holograms of a Skull made of CT Images. Optics Communications. 61: 96-99.
- Okoshi, T.** (1976). Tree-Dimensional Imaging Techniques. New York, Academic Press.
- Panofsky, E.** (1940). The Coder Huygens and Leonardo da Vinci's Art Theory. London, Warburg Institut.
- Pinchbeck, P.** (1972). Structure of Reality in image and Word. Arts Magazine.
- Pizzanelli, D.** (1995). Multiplex holograms from Eadweard Muybridge's studies of the human figure in motion. SPIE. 2333: 156-165.
- Rampal, P. C. M. a. V. V.** (1993). Lasers and Holography. Singapore, World Scientific Publishing Co.
- Richardson, J. A.** (1971). Modern Art and Scientific Thought. Chicago, University of Chicago Press.
- Saxby, G.** (1994). Practical Holography. Hertfordshire, Prentice Hall.
- T. Kasahara, Y. K., M Kawai** (1971). 3-D Construction of Imaginary Objects by the Method of Holographic Stereogram. Applications of Holography. P. Press. New York, E. S. Barrekette, et al: 19 - 34.
- Thompson, R. F.** (1985). The Brain. New York, W. H. Freeman & C.
- White, J.** (1957). The Birth and Rebirth of Pictorial Space. London, Faber & Faber.
- Yu, H. C. e. F. T. S.** (1978). One-step rainbow hologram. Optics Letters. 2: 1479-80.

