

Introdução à Holografia

Paulo Tribolet de Abreu

Maio de 1994

Conteúdo

Introdução	3
1 A Teoria	5
1.1 Um Pouco de História	6
1.2 Ondas de Luz	7
1.2.1 Período e Frequência	9
1.2.2 Comprimento de Onda	12
1.2.3 Fase e Velocidade de Fase	12
1.2.4 Interferência	13
1.2.5 Coerência	16
1.2.6 Difracção	17
1.3 O Laser	19
1.3.1 Fontes de Luz	19
1.3.2 O Laser de He-Ne	20
1.4 Holografia	21
1.4.1 Hologramas de Transmissão	22
1.4.2 Hologramas de Reflexão	22
1.4.3 Hologramas de Segunda Geração	24
1.4.4 Suportes	24
2 A Prática	25
2.1 Passos Para A Construção De Um Holograma	25
2.2 O Material	26
2.2.1 A Mesa Óptica	26
2.2.2 A Câmara Escura	31
2.2.3 Os Químicos	31
2.2.4 As Películas	33
2.2.5 O Laser	33
2.2.6 Os Componentes Ópticos	34
2.3 Montagens	35
2.3.1 Transmissão	36
2.3.2 Reflexão	38

A	Segurança	41
A.1	Mesa Óptica	41
A.2	Laser	42
A.3	Componentes Ópticos	42
A.4	Químicos	43
B	Interferómetro	44
C	Bases Matemáticas	47
C.1	As Equações de Maxwell	47
C.2	Intensidade	49
C.3	Interferência	50
C.4	Difracção	51
C.5	Outras Situações	53

Introdução

*“Fotografei você na minha Rolleiflex
Revelou-se a sua imensa ingratidão”*
JOÃO GILBERTO, músico.

Não, ainda não se consegue fotografar sentimentos, mas, quem sabe, talvez lá se chegue. . .

“Olha, uma fotografia a três dimensões!” Este será provavelmente o pensamento que ocorrerá a quem vir um holograma pela primeira vez. Mas, embora haja algumas semelhanças entre os dois processos, esta afirmação encontra-se, sem dúvida, bastante longe da verdade.

A holografia também “desenha com a luz”, utilizando por isso um meio fotossensível, mas as semelhanças com a fotografia terminam aí. A maneira como a informação é registada e reproduzida são totalmente distintos, merecendo a holografia um canto à parte no mundo da imagem.

No início dos anos 60 e mesmo ainda na década de 70, a holografia era considerada como uma *ciência* cara. Um laboratório holográfico só era acessível às grandes instituições científicas, limitando-se assim o seu uso para esses fins. Mas, com a descoberta de lasers e materiais fotossensíveis melhores e mais baratos, o custo de um holograma tornou-se actualmente acessível a todos e a holografia, ao se tornar de domínio público, transformou-se também em *arte*.

Com este trabalho pretendo mostrar como um estúdio holográfico se encontra disponível a todos dando, ao mesmo tempo, uma abordagem teórica e prática da holografia.

A abordagem teórica encontra-se dividida em duas partes: a primeira, no corpo do trabalho, é a mais simples. Qualquer pessoa com a escolaridade obrigatória a poderá entender, embora nalguns pontos seja possível que não se sinta muito à vontade; a segunda abordagem teórica encontra-se no apêndice, e pretende ser um pouco mais cuidada, embora não completa. Para a entender já é necessário um conhecimento matemático de nível universitário.

Na abordagem prática, ensina-se a construção de um laboratório holográfico de baixo custo, descrevendo-se igualmente duas montagens muito simples.

O objectivo final é duplo: por um lado, divulgar a holografia o mais possível, desmistificando-a e ensinando-a sem entrar em matemáticas muito complexas; por outro, este trabalho irá servir como avaliação de uma cadeira universitária de um curso de Engenharia, o que me obrigou a um certo for-

malismo que nem sempre facilitou o primeiro objectivo. Espero que, no final, ambos tenham sido satisfatoriamente cumpridos.

Gostaria finalmente de expressar os meus agradecimentos a todos aqueles sem os quais este trabalho não teria sido possível: à professora Ana Maria Martins, pela sua compreensão e apoio e a todo o grupo de Óptica Não-Linear do IST que, durante estes dois meses, se revelou incansável em me aturar e esclarecer.

Capítulo 1

A Teoria

Holografia é um processo de registo da informação contida nas ondas de luz reflectidas por um objecto. Mas, enquanto que em fotografia se regista apenas as diferenças de intensidade, em holografia tenta-se também preservar a sua *fase*. É esta adição de informação que dá ao holograma grande parte das suas espectaculares propriedades, ao mesmo tempo que torna o processo holográfico mais preciso e menos prático e flexível que a fotografia.

Para se conseguir registar informação sobre a fase é necessário iluminar o objecto com luz coerente. A luz reflectida, ainda coerente, é feita interferir com a incidente, formando-se nessa região do espaço uma *figura de interferência*. É esse padrão que se regista numa película fotossensível. A fase fica então registada não de maneira absoluta, mas em relação à luz incidente.

A luz reflectida pelo objecto é reconstruída em fase e em amplitude se, posteriormente, se iluminar a placa holográfica com a mesma luz coerente utilizada como fonte.

Este método é aplicável não só a ondas de luz, mas a todo o tipo de ondas: ao completo espectro electromagnético, a ondas sonoras, sísmicas, etc., desde que estas sejam suficientemente coerentes para formarem um padrão de interferência.

Antes de explicarmos melhor a teoria que se encontra por trás destes termos de *ondas*, *interferência*, *fase*, *amplitude*, etc., julgamos interessante descrever o processo que originou a holografia como a conhecemos hoje, desde os primeiros passos com Gabor, nos anos 40, até às diversas aplicações científicas e artísticas dos dias de hoje.

1.1 Um Pouco de História

O primeiro holograma foi construído e idealizado por Dennis Gabor em 1948. Garbor procurava um método de amplificar a informação contida em radiações curtas (raios-X), de modo a melhorar as imagens obtidas pelo microscópio electrónico. No seu artigo “Image Formation By Reconstructed Wavefront”, desenvolveu as bases da teoria que iria originar a holografia actual.

Na altura, pouca atenção foi prestada ao artigo de Garbor. Apesar de correcta, a sua teoria parecia ser difícil de aplicar na prática. Os hologramas feitos por Garbor tinham muito pouca nitidez e não conseguiam registar informação suficiente para se reconstruir uma imagem a três dimensões.

O problema principal residia na ausência de uma fonte de luz coerente. Gabor tinha trabalhado com o melhor que tinha arranjado, mas não era suficiente.

O que faltava a Garbor foi descoberto só doze anos mais tarde, em 1960 — o laser. Em 1962, Leith e Upatnieks, nos Estados Unidos, e Denisjuk, na USSR, juntando as duas coisas (a holografia de Garbor e o laser), criaram os primeiros hologramas com imagens a três dimensões.

Finalmente, a holografia pôde desenvolver-se como merecia. Grande parte do progresso ficou a dever-se a descobertas e aperfeiçoamentos no campo dos componentes ópticos, nomeadamente nas lentes e emulsões fotossensíveis. Garbor, em 1971, recebeu o seu merecido prémio Nobel.

É em três ramos principais que a holografia se desenvolveu: científico, artístico e comercial.

O ramo científico recebeu um novo impulso com a descoberta que, se um objecto fosse sujeito a tensões entre duas exposições holográficas, quaisquer distorções criadas se manifestariam no segundo holograma (R. Powell e K. Stetson em 1965). Esta descoberta teve um valor incalculável nas áreas de estudos de esforços e de medidas, e ainda hoje se descobrem novas aplicações para esta propriedade.

No ramo artístico, o avanço surgiu ao se descobrir que um holograma formava não só uma imagem virtual, mas também uma real¹. Essa imagem real pôde ser novamente holografada com intervenção do artista.

No ramo comercial, com a descoberta da duplicação mecânica de hologramas, é agora possível produzi-los massivamente a baixo custos. Tornaram-se assim comuns como selos de control, em livros de arte ou didáticos.

Nos últimos tempos a holografia não tem parado de se desenvolver. Com

¹Uma imagem *virtual* é uma imagem que não pode ser projectada, apenas visualizada. As lupas formam imagens assim. Uma imagem *real* é uma imagem que já se pode projectar. Tem uma localização espacial. As lentes de uma câmara fotográfica funcionam assim, ao projectarem o enquadramento na película fotográfica.

cada vez material de melhor qualidade e mais barato, encontra-se actualmente acessível ao amador mais interessado. É normal, quando uma nova descoberta se torna do domínio público, considerá-la “adulta” e firme para seguir por si mesma. É sem dúvida este o estado actual da holografia.

1.2 Ondas de Luz

Determinado fenómeno designa-se por *ondulatório* se se propagar no espaço e no tempo de forma *periódica*. Isto significa que

$$\begin{aligned} f(\vec{r}, t) &= f(\vec{r}, t + T) \\ f(\vec{r}, t) &= f(\vec{r} + \lambda \vec{u}, t) \end{aligned} \tag{1.1}$$

$f(\vec{r}, t)$ descrição matemática do fenómeno;
 T período;
 λ comprimento de onda;
 \vec{u} versor da direcção de propagação.

Quem primeiro demonstrou que a luz se propaga de forma ondulatória foi Thomas Young em 1802, ao observar a interferência de duas fontes de luz pontuais. O padrão de iluminação de um alvo podia ser explicado admitindo apenas que a luz tinha um comportamento ondulatório. Esta experiência será descrita mais em pormenor na secção 1.2.6.

Mais tarde, Maxwell estabeleceu toda a base teórica que rege o electromagnetismo, justificando os resultados de Young.

Embora o *campo electromagnético* se propague no espaço sob a forma de *duas* ondas independentes, uma referente ao *campo magnético* e outra ao *campo eléctrico*, a nível holográfico e fotográfico é só esta última que nos interessa, visto os efeitos magnéticos numa emulsão serem praticamente desprezáveis².

Segundo a teoria de Maxwell, o campo eléctrico de uma onda de luz pode então ser descrito como:

$$\vec{E} = E_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right] \vec{u}_x \tag{1.2}$$

E_0 amplitude;
 T período;
 λ comprimento de onda;
 \vec{u}_x direcção de propagação.

²Esta aproximação foi avançada pela primeira vez por Wiener em 1850, baseando-se no facto de a velocidade dos electrões responsáveis pelo escurecimento da emulsão ser mínima quando comparada com a velocidade de propagação das ondas magnéticas — c .

Ângulos	Número real ³ (x)	$\cos x$
0	0	1
30°	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,866\dots$
45°	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707\dots$
60°	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{1}{2} = 0,5$
90°	$\frac{\pi}{2}$	0
120°	$\frac{2\pi}{3}$	$-\frac{1}{2}$
135°	$\frac{3\pi}{4}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$
150°	$\frac{5\pi}{6}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$
180°	π	-1
210°	$\frac{7\pi}{6}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$
225°	$\frac{5\pi}{4}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$
240°	$\frac{4\pi}{3}$	$-\frac{1}{2}$
270°	$\frac{3\pi}{2}$	0
300°	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{1}{2}$
315°	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
330°	$\frac{11\pi}{6}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
360°	2π	1
\vdots	\vdots	\vdots

Tabela 1.1: Alguns valores da função $f(x) = \cos x$.

Para se tornar mais claro o significado desta fórmula e das constantes E_0 , λ , T e φ_0 , iremos descrever a função $\cos x$, que transforma números reais em números entre -1 e 1 (tabela 1.1 e figura 1.1).

A função $\cos x$ é periódica de período 2π , o que significa que

$$\begin{aligned} \cos x &= \cos(x + 2k\pi) \\ k &= \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \tag{1.3}$$

Ao somarmos uma constante φ_0 a x , estaremos a translaccionar a função ao longo do eixo dos xx de $-\varphi_0$ (fig. 1.2); ao multiplicarmos x por uma constante α , o período da função passará a ser $\frac{2\pi}{\alpha}$ (fig. 1.3). Finalmente, a função $g(x) = A_0 \cos x$ é idêntica à $f(x) = \cos x$, excepto que dá valores entre A_0 e $-A_0$ (fig. 1.4).

Poderemos agora entender melhor o significado da equação 1.2. Se nos imaginarmos numa posição fixa x_0 , “sentindo” a onda “passar” por nós, a

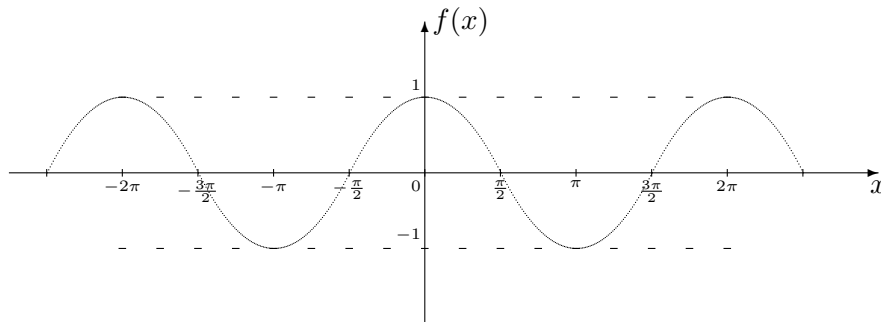


Figura 1.1: Esboço da função $f(x) = \cos x$

equação 1.2 poderá ser reescrita como

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t + \varphi_{x_0}) \quad (1.4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\varphi_{x_0} = \frac{2\pi x_0}{\lambda} + \varphi_0 \quad \text{constante}$$

Isto significa que o campo eléctrico em cada ponto vibra com amplitude E_0 e com *período* T (fig. 1.6).

Por outro lado, se “olharmos” para todo o eixo de propagação num determinado tempo t_0 fixo (será equivalente a “fotografarmos” a onda), teremos

$$E(x) = E_0 \cos(kx + \varphi_{t_0}) \quad (1.5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\varphi_{t_0} = \frac{2\pi t_0}{T} + \varphi_0 \quad \text{constante}$$

que significa que a onda se propaga no espaço com *comprimento de onda* λ — é a sua periodicidade espacial (fig. 1.5).

Interessará agora estudarmos um pouco a forma de propagação no espaço destas ondas.

1.2.1 Período e Frequência

Já nos referimos muitas vezes ao *período* de uma onda. Esta grandeza é aplicável a todos os fenómenos periódicos e define-se como *o tempo que decorre até todas as características do fenómeno se repetirem*. Designa-se normalmente pela letra **T**. Alguns exemplos:

- O período do ponteiro dos minutos de um relógio é uma hora.
- O período de rotação da Terra é de 23 horas e 56 minutos.

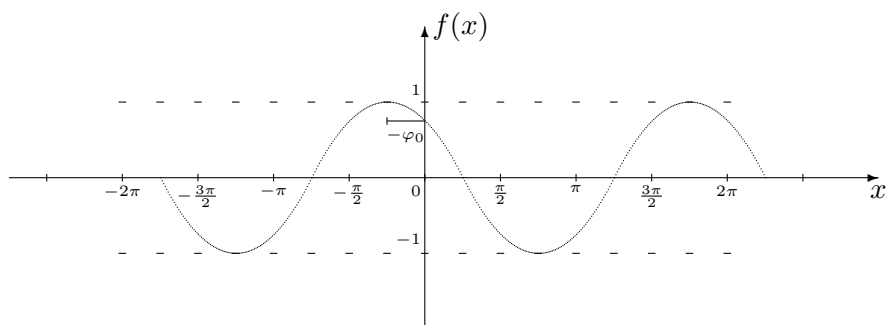


Figura 1.2: Esboço da função $f(x) = \cos(x + \varphi_0)$

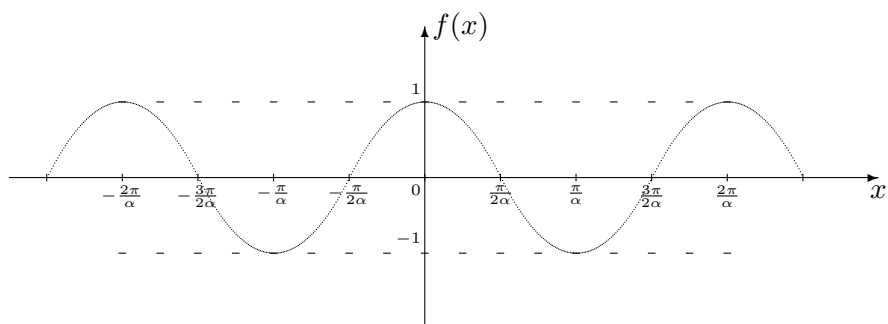


Figura 1.3: Esboço da função $f(x) = \cos(\alpha x)$

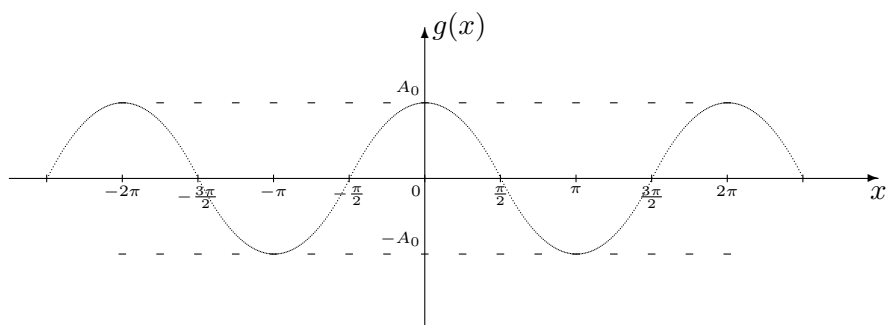


Figura 1.4: Esboço da função $g(x) = A_0 \cos x$

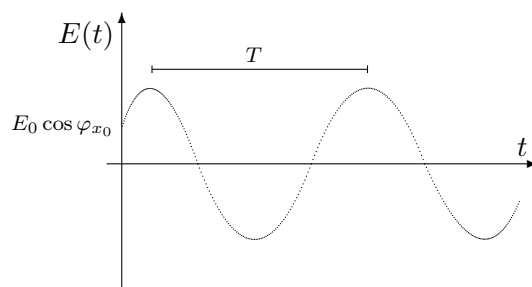


Figura 1.5: $E(t) = E_0 \cos(\omega t + \varphi_{x_0})$

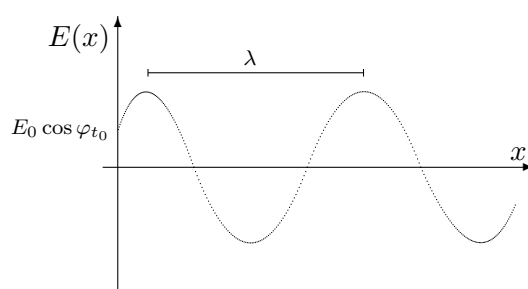


Figura 1.6: $E(t) = E_0 \cos(kx + \varphi_{t_0})$

- O período das marés é de cerca de 22 horas.

Na figura 1.5, o período encontra-se marcado e é a distância, medida no eixo dos tt , entre duas posições idênticas da curva.

A *frequência* é o contrário do período, no sentido em que é o *número de repetições por unidade de tempo*. Normalmente vem em *ciclos por segundo* (cps) ou *hertz* (Hz) e representa-se pela letra **f**. Alguns exemplos:

- Nos gira-discos, 33 rpm é a frequência de rotação: 33 rotações por minuto.
- Os números que aparecem nos mostradores dos rádios indicam a frequência em que as diversas estações estão a emitir. Como são valores muito altos, geralmente aparecem em mega-hertz (MHz) ou kilo-hertz (kHz).
- Completando os exemplos do período, a frequência das marés é de cerca de 1 ciclo cada 22 horas, e a da rotação da Terra sobre si mesma de pouco mais de 1 ciclo por dia.

A relação matemática entre o período e a frequência é muito simples:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

Existe ainda uma outra grandeza relacionada com estas duas. Designa-se por *velocidade angular* ou *frequência angular* e representa-se por ω .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

ω exprime-se em ângulos por unidade de tempo — normalmente, rads^{-1} .

1.2.2 Comprimento de Onda

A noção de período pode ser extendida para o espaço. Quando determinado fenómeno é periódico *espacialmente*, como uma onda propagando-se, designa-se por *comprimento de onda* λ a distância entre dois valores idênticos consecutivos (por exemplo, entre duas cristas de onda ou dois vales).

Na figura 1.6, λ encontra-se assinalado.

A partir de λ pode-se definir o *vector de onda*, \mathbf{k} , cujo módulo é dado por

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

1.2.3 Fase e Velocidade de Fase

De uma maneira geral, designa-se por *fase* φ ao argumento de $\cos x$, que se encontra directamente relacionado com a perturbação que o meio sente. À velocidade com que esta perturbação se propaga dá-se o nome de *velocidade de fase* v_φ ⁴.

Para qualquer onda, a velocidade de fase é dada por

$$v_\varphi = \frac{\lambda}{T}$$

e só depende do meio em que a onda se propaga. Por exemplo, se nos encontrarmos à beira de um lago, provocando ondas com a mão, estas vão-se propagar com a mesma velocidade, quer os nossos movimento sejam muito

⁴Normalmente, a velocidade de fase e a velocidade de propagação são diferentes mas, como nos referimos principalmente a ondas monocromáticas (cf. secção 1.2.4), julgamos desnecessário distingui-las.

rápidos, originando λ e T curtos, quer sejam mais lentos, originando λ e T mais longos.

Para as ondas electromagnéticas, v_φ é “enorme”. De facto, parece ser a velocidade limite de propagação de qualquer tipo de informação. Por ser muito importante em diversos ramos da Ciência, tem uma letra própria: c .

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

Raramente na Natureza as ondas electromagnéticas se propagam sózinhas. Na realidade, vivemos num mar de combinações de infinitos pares (λ, T) . Alguns percebemos como luz visível (azul, vermelho, ...) outros como calor, outros não percebemos de forma alguma, mas a nossa televisão consegue traduzir em som e imagem, ... Na figura 1.7 encontra-se um resumo dos nomes que normalmente se atribui às diferentes radiações electromagnéticas.

1.2.4 Interferência

As fontes de radiação visível que temos na Natureza (ou fontes de luz) são praticamente apenas o Sol, as estrelas e o fogo. Qualquer outro tipo de iluminação vem por reflexão (a Lua) ou devido a fontes de luz artificiais construídas pelo Homem (excepção feita aos pirilampos e a alguns peixes das profundezas). Todas estas fontes de radiação, inclusivé as que emitem fora da luz visível (rádio e televisão, por exemplo) não emitem apenas uma radiação, com um λ definido, mas sim um número quase infinito de λ s que, continuamente, *interferem* uns com os outros. Para entendermos melhor no que consiste o fenómeno de *interferência*, vamos exemplificar para duas ondas *monocromáticas* (i. é, cada uma com um valor de λ bem definido) com o mesmo comprimento de onda (figuras 1.8 e 1.9).

Suponhamos então que um ponto \vec{r}_0 do espaço se encontra sujeito a duas ondas diferentes, ambas geridas pela equação 1.2, que reescrevemos na equação 1.6 por clareza. Para simplificar, admitimos que ambas as ondas se propagam segundo o eixo dos xx .

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= E_{1_0} \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T_1} + \frac{x_0}{\lambda_1} \right) + \varphi_{1_0} \right] \vec{u}_x \\ \vec{E}_2 &= E_{2_0} \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T_2} + \frac{x_0}{\lambda_2} \right) + \varphi_{2_0} \right] \vec{u}_x\end{aligned}\tag{1.6}$$

O valor resultante de $\vec{E}(x_0, t)$ será dado pela *soma vectorial* dos dois campos, representados pelas duas ondas. Nesse caso, este passará a variar, em módulo, entre $-(E_{1_0} + E_{2_0})$ e $(E_{1_0} + E_{2_0})$.

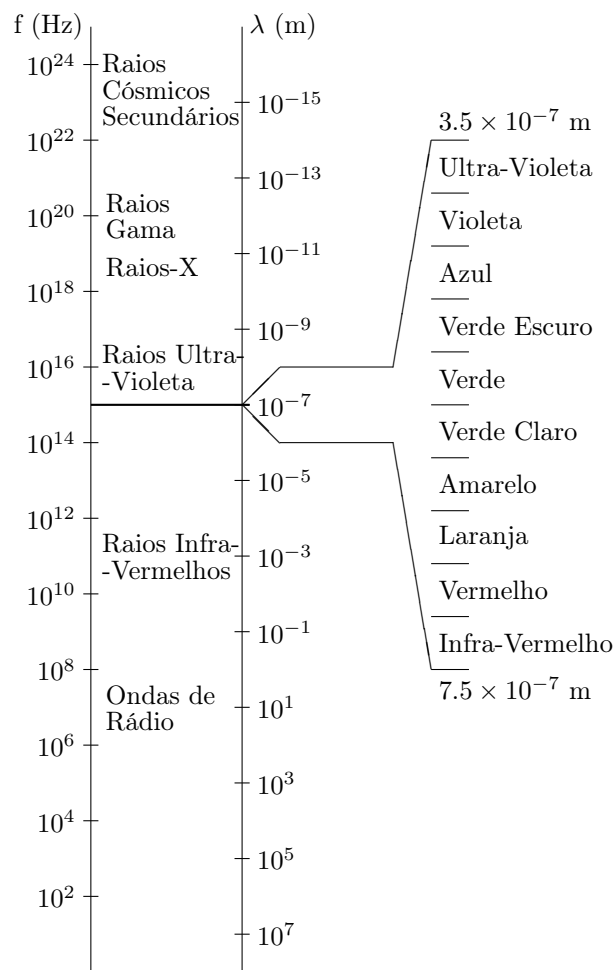


Figura 1.7: O espectro electromagn3tico.

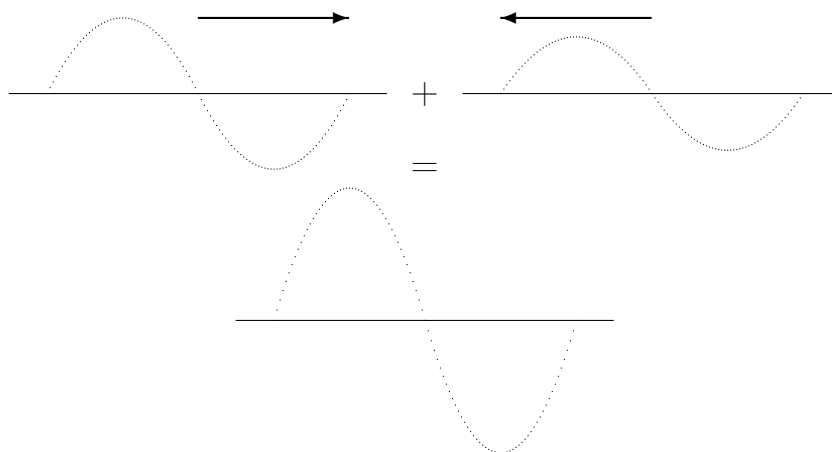


Figura 1.8: Interferência construtiva.

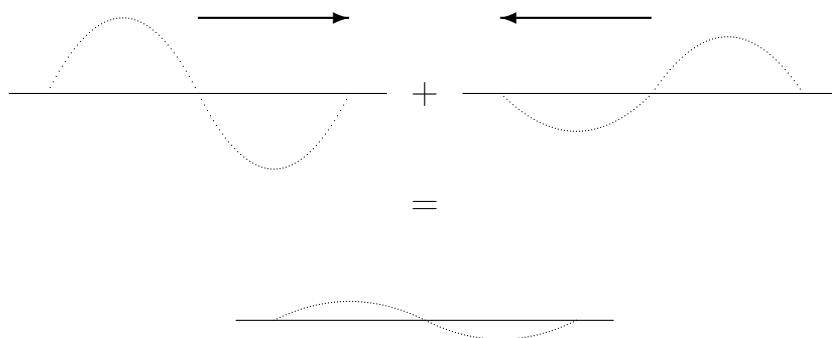


Figura 1.9: Interferência destrutiva.

Quando o módulo de \vec{E} é superior ao de \vec{E}_1 ou de \vec{E}_2 , a interferência designa-se por *construtiva*; quando é inferior, por *destrutiva*. As figuras 1.8 e 1.9 representam um exemplo de cada caso.

1.2.5 Coerência

Muito importante para o estudo do fenómeno da interferência é a noção de coerência. Esta pode manifestar-se de duas formas: espacial e/ou temporalmente.

- Uma onda diz-se *coerente espacialmente* se mantém o seu comprimento de onda constante. À distância durante a qual tal sucede dá-se o nome de *comprimento de coerência*.
- Uma onda diz-se *coerente temporalmente* quando mantém o seu período constante.
- Duas ondas dizem-se *coerentes* se têm o mesmo comprimento de onda e/ou o mesmo período. É o que sucede no exemplo das figuras 1.8 e 1.9.

Quando duas ondas coerentes interferem, formam no espaço um padrão de interferência *constante*, também chamado *figura de interferência*.

Na figura 1.10 encontra-se um exemplo de uma figura de interferência formada por duas ondas planas. As ondas vibram num plano perpendicular ao papel e avançam fazendo um pequeno ângulo, uma em relação à outra. Cada traço a cheio representa uma crista. São fáceis de notar as zonas de interferência construtiva (áreas horizontais mais escuras) e destrutiva (mais claras). Essas zonas mantêm-se numa posição fixa enquanto as ondas “passam” por lá.

Os padrões de interferência dependem do tipo de ondas que interferem. Duas ondas planas dão padrões do tipo apresentado na figura 1.10. Duas ondas esféricas já darão um padrão diferente. As superfícies de interferência construtiva irão originar hipérbolos quando intersectadas por planos paralelos à direcção de propagação.

Apenas com radiação coerente é possível a formação de figuras de interferência estáveis. No dia-a-dia, todo o espaço se encontra cheio de ondas electromagnéticas que interferem umas com as outras, mas sem coerência entre si.

Actualmente, a fonte de ondas coerentes mais acessível é o *laser*, que iremos estudar nas secções 1.3. Este aparelho consegue formar ondas *monocromáticas* que, por divisão, originam diversas ondas coerentes.

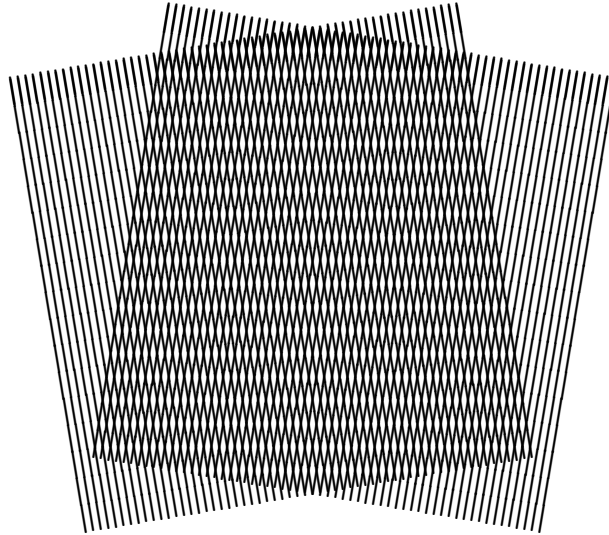


Figura 1.10: Figura de interferência formada por duas ondas planas e coerentes.

1.2.6 Difracção

Os princípios teóricos atrás explicados não ficam completos se não nos referirmos a outra propriedade das ondas, designada por *difracção*. Enquanto que a interferência é utilizada para a formação de um holograma, a difracção utiliza-se para o visualizar.

Suponhamos que uma onda de frente plana, como as da figura 1.10, ao se propagar num meio, encontra um obstáculo que só a deixa passar por um pequeno orifício. A onda, ao passar por aí, vai perder a sua frente plana, pois vai-se *curvar* na direcção dos bordos do orifício. Ao sair do obstáculo, transformou-se numa onda não-plana (figuras 1.11 e 1.12). É a este fenómeno de “curvatura” em relação às arestas de um obstáculo que se dá o nome de *difracção*.

Se, em vez de um orifício, tivermos dois ou mais, as ondas assim originadas iram interferir umas com as outras de uma maneira coerente. Foi esta a experiência realizada por Young referida em 1.2, e que se encontra representada na figura 1.13.

A difracção é o fenómeno utilizado para se visualizar um holograma.

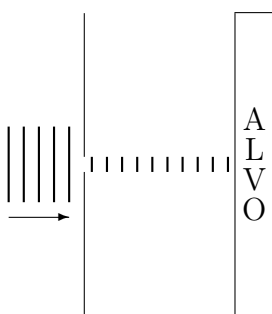


Figura 1.11: Luz propagando-se sem difracção.

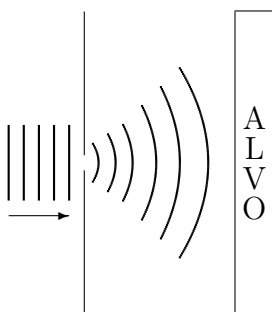


Figura 1.12: Luz propagando-se com difracção.

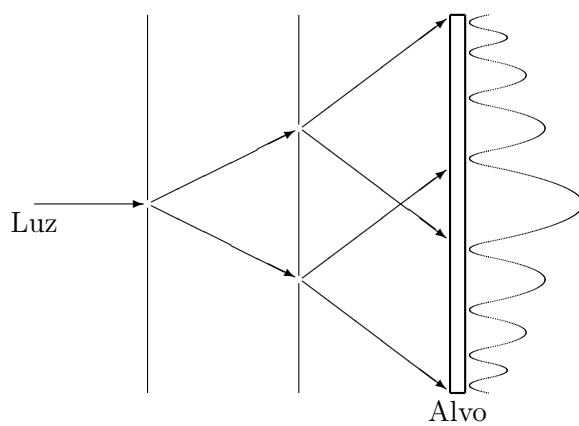


Figura 1.13: Experiência de Young: a luz propaga-se com difracção, originando o fenómeno de interferência.

1.3 O Laser

A holografia, quando foi exposta por Gabor, nos anos 40, não foi acolhida com muito entusiasmo pela comunidade científica. Implicava a existência de uma fonte de ondas coerente, que estava longe de ser descoberta na altura. Só depois da descoberta do *laser*, em 1960, é que a holografia se conseguiu desenvolver e despertar a atenção de um número maior de cientistas e do público em geral. Tentaremos nesta secção mostrar o que torna um laser tão diferente de uma fonte de luz normal, descrevendo o princípio que o rege.

1.3.1 Fontes de Luz

A radiação electromagnética é normalmente criada por emissão de energia por electrões.

Num átomo, os electrões giram à volta do núcleo em órbitas bem definidas. Quanto mais afastada do núcleo for essa órbita, mais energia terá o electrão. Normalmente, os electrões distribuem-se pelas órbitas disponíveis de modo a minimizar a soma total de energias. Quando se fornece energia extra a um átomo, aquecendo-o ou fornecendo-lhe “corrente” eléctrica, esta será absorvida pelos seus electrões, que aproveitarão a oportunidade para saltarem para órbitas mais energéticas. O átomo diz-se então num *estado excitado*. Como este estado não é estável, mais tarde ou mais cedo os electrões irão voltar ao seu estado fundamental, libertando a energia que absorveram sob a forma de *radiação electromagnética*. O comprimento de onda desta radiação depende *de que nível* e *para que nível* os electrões passam.

A maior parte das fontes de luz criam ondas não-coerentes porque os electrões estão constantemente passando de um nível para outro qualquer, a qualquer altura. Geram-se assim simultaneamente diferentes comprimentos de onda que irão interferir entre si, destruindo a coerência espacial. Como nunca se sabe quando é que um electrão voltará a gerar determinado comprimento de onda, a coerência temporal também nunca existe. O que os nossos olhos percebem no dia-a-dia é apenas uma *média de intensidades* e de comprimentos de onda, que é também o que se regista normalmente numa película fotográfica. Se se conseguisse criar uma fonte de luz onde os electrões só fossem excitados para níveis de energia bem definidos e só de lá saíssem em alturas bem determinadas, teríamos uma fonte de luz coerente. É isto que um laser faz.

1.3.2 O Laser de He-Ne

Como o laser de He-Ne é o mais popular actualmente, é o que iremos utilizar como exemplo de funcionamento.

Um laser deste tipo é constituído por um tubo cheio de uma mistura de Hélio e Néon com concentrações e pressão muito controladas. O tubo é selado e opaco, excepto nas suas extremidades, onde um espelho é colocado. Numa, o espelho reflecte 100%, enquanto que na outra, um pouco menos (por volta de 98%). Os espelhos têm que estar perfeitamente paralelos e a distância entre si tem que ser um múltiplo exacto do comprimento de onda da radiação que se pretende produzir — 6328 \AA ou $0,0000006328 \text{ mm}$.

Para excitar os electrões nos átomos dos gases, ligar o tubo à tomada de parede não serviria. É necessário uma fonte de alimentação própria, que garante uma excitação só dos átomos de Hélio. Estes, ao colidirem com os de Néon, irão excitá-los por sua vez, mas apenas para níveis que garantem um só tipo de radiação, um só comprimento de onda.

Os átomos de Néon, ao voltarem para o seu estado fundamental, irão libertar a energia acumulada sob a forma de radiação electromagnética de comprimento de onda bem definido. Esta energia terá o seguinte duplo efeito:

- excitar novos átomos de Néon;
- amplificar-se a si mesma, ao circular entre os dois espelhos (devido ao seu exacto posicionamento, os espelhos só amplificam a radiação emitida dentro dos 6328 \AA).

Quando, finalmente, alguma radiação se escapa pelo lado do espelho semi-reflector, é coerente, de uma só frequência e muito pouco divergente (propriedade pouco interessante para holografia).

Uma lâmpada fluorescente normal funciona de um modo muito parecido. Tem uma fonte de alimentação própria que estimula o gás com que está cheia. O que lhe falta para ser um laser é a amplificação de uma radiação própria que os dois espelhos dão. E é daí que se tirou o nome de *Laser* — Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation⁵.

Existem outros tipos de lasers. Uns emitem com outros comprimentos de onda, outros não de uma forma contínua mas sim num “disparo” muito rápido; uns feitos com outros gases, outros com sólidos cristalinos. . . Mas em todos o princípio é o mesmo: gera-se radiação coerente provocando a emissão de um único comprimento de onda obedecendo a um estímulo simultâneo.

⁵Amplificação de Luz por Emissão de Radiação Estimulada — em português não parece tão interessante, pois não?

1.4 Holografia

Poderemos agora descrever as etapas de construção e de visualização de um holograma, visto os seus princípios teóricos já estarem esclarecidos. Para a formação de um holograma, as etapas são:

- Um feixe de radiação coerente é dividido em dois.
- Um dos feixes, tornado disperso espacialmente, incide num meio fotosensível — é o feixe *de referência*.
- O outro feixe, também disperso, incide no objecto a holografar — é o feixe *do objecto*.
- A radiação reflectida pelo objecto deverá interferir com a de referência no plano da película fotossensível. Um holograma é assim formado.
- Todo o ambiente deverá estar perfeitamente isolado de vibrações.
- A película é processada.

O resultado final das etapas anteriores é uma película com as microscópicas figuras de interferência nela registadas sob a forma de linhas de claro e escuro. O aspecto geral é de um tom acinzentado, sem muito interesse.

Para se conseguir ver a imagem holografada teremos que reproduzir a montagem que levou à formação do holograma, mas sem o objecto e sem o feixe proveniente deste⁶. Ao se iluminar a película com o feixe de referência, as riscas nela registadas irão alternadamente bloqueá-lo ou deixá-lo passar, de uma maneira muito semelhante à experiência de Young (fig. 1.13). O feixe, ao emergir do outro lado da película, difractado pela enorme quantidade de riscas, irá originar uma não menor quantidade de ondas. Estas, ao interferirem entre si, *reproduzem exactamente a radiação proveniente do objecto* incidente na emulsão na altura da formação do holograma. Isto significa que se este conjunto de ondas atingir os nossos olhos, tudo se passará como se estivéssemos a olhar para o objecto na altura de o holografar. A perspectiva, o relevo, as manchas de claro/escuro, a paralaxe, *tudo* é perfeitamente reproduzido.

Temos o nosso HOLOGRAMA⁷.

Actualmente, existem diversos métodos para a formação de um holograma, que originam diversos tipos destes.

⁶Mais tarde veremos que a exacta reprodução da montagem não é essencial.

⁷Do Grego, imagem completa.

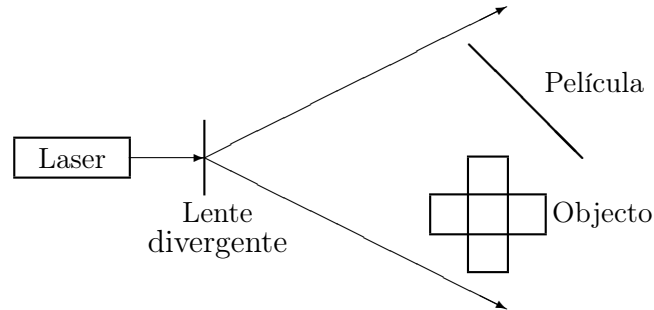


Figura 1.14: Uma montagem simples para a construção de um holograma de transmissão.

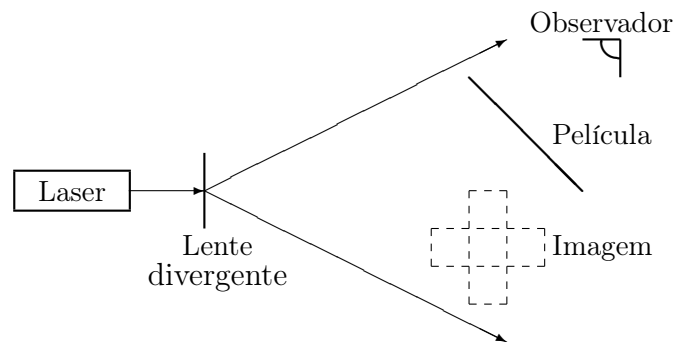


Figura 1.15: Visualização do holograma da montagem anterior.

1.4.1 Hologramas de Transmissão

Um holograma designa-se por *de transmissão* quando o feixe de referência e o do objecto interferem do mesmo lado da emulsão (figura 1.14). Este tipo de hologramas tem que ser visualizado com a mesma fonte de luz usada para o formar e o observador terá de estar colocado de modo que a luz o atinja depois de ter atravessado a película (figura 1.15).

1.4.2 Hologramas de Reflexão

Um holograma designa-se por *de reflexão* quando o feixe de referência e o do objecto interferem na emulsão provenientes de lados opostos a esta (figura 1.16). O observador tem que se encontrar do mesmo lado da fonte de luz para o poder visualizar (figura 1.17).

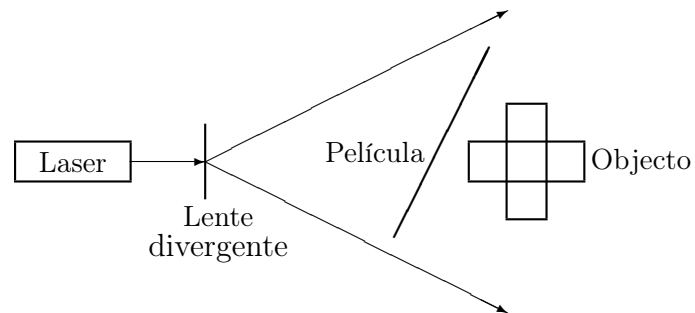


Figura 1.16: Uma montagem simples (de *Denisjuk*) para a construção de um holograma de reflexão.

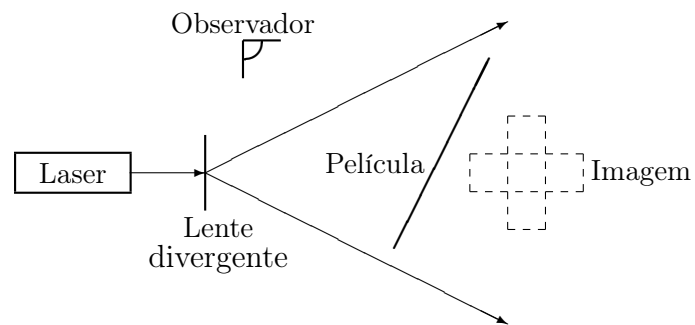


Figura 1.17: Visualização do holograma da montagem anterior.

Também se costumam designar por *hologramas de volume*, visto as figuras de interferência ficarem registadas não apenas como linhas, mas como *superfícies*. Esta característica permite a sua visualização com luz “normal”, embora possa perder alguma qualidade.

1.4.3 Hologramas de Segunda Geração

Visto um holograma reproduzir completamente a onda de luz reflectida por um objecto, não há nenhuma razão que nos impeça de utilizar a imagem real de um holograma para produzir outro. Este designa-se por *de segunda geração*.

Não iremos descrever este processo em pormenor, visto este trabalho pretender dar apenas uma introdução ao assunto. Referiremos apenas que existem muitas vantagens neste processo, desde pura intervenção artística ao facto de se poderem visualizar com qualquer luz sem a perda de qualidade dos hologramas de reflexão.

1.4.4 Suportes

Não é obrigatório registar a imagem holográfica numa película fotográfica. Qualquer material sensível à luz e com a definição necessária pode ser utilizado.

Uma alternativa poderá ser a gelatina, cujas moléculas modificam o seu índice de refração quando atingidas por certos tipos de radiação. Hologramas neste meio teriam uma definição praticamente infinita, visto serem da ordem do diâmetro das moléculas. A dificuldade principal reside em controlar todo o processo de forma segura, visto a reacção da gelatina à radiação depender de muitos factores de uma maneira muito sensível: humidade, temperatura, concentração, etc. A Ilford já produziu uma película baseada neste princípio com uma definição de cerca de 10000 linhas/mm, mas parece que já o retirou do mercado.

Capítulo 2

A Prática

Depois de expostas as bases teóricas que tornam a holografia possível e que a desmistificam, iremos agora pô-las em prática. Algumas montagens simples serão descritas, englobando hologramas de transmissão e de reflexão. Mas, antes de entrarmos na descrição das diversas montagens, iremos primeiro resumir os passos gerais que a formação de um holograma envolve e o material mínimo necessário para os conseguir realizar com sucesso. No fundo, iremos referir as etapas necessárias para a construção de um laboratório de holografia óptica, modesto, é certo, mas suficientemente flexível para permitir a realização das montagens mais comuns, mesmo que não sejam as mais simples.

2.1 Passos Para A Construção De Um Holograma

As etapas que nos permitem construir um holograma são as seguintes:

1. Expôr uma emulsão fotossensível num ambiente iluminado com luz coerente (laser). Isto significa que o local da montagem deverá ser isolado de qualquer outra fonte de luz, pelo menos durante a exposição da película.
2. Processar a emulsão. Parte desta etapa terá que ser feita ainda num ambiente sem luz exterior.
3. Ver o holograma. Esta etapa poderá ou não incluir iluminá-lo com laser.

2.2 O Material

Actualmente ainda não se consegue fazer hologramas fora do laboratório. Ainda não se conseguiu construir uma “câmara holográfica” portátil. Assim, não necessitamos de comprar nenhuma câmara fotográfica. Em compensação, temos que comprar a nossa fonte de luz própria — o laser — e estamos um pouco limitados quanto aos assuntos que podemos holografar.

Todo o processo holográfico se baseia no registo das figuras de interferência que duas fontes de luz coerentes criam. Teremos assim que garantir a perfeita estabilidade de cada montagem. Consegue-se isso construindo (ou comprando) uma mesa especialmente concebida para o efeito, chamada *mesa óptica*. Esta tem que ter as seguintes características gerais:

- grande estabilidade;
- capacidade de amortecer as mais subtis vibrações;
- possibilidade de nela se fixar firmemente, mas com flexibilidade, os diversos componentes ópticos;
- dimensões suficientes para permitir as montagens pretendidas.

Existem no mercado mesas ópticas, mas todas a preços proibitivos (desde algumas centenas a alguns milhares de contos). Em [HH] encontra-se descrito em pormenor um processo caseiro de construção de diversas mesas ópticas perfeitamente fiáveis. Aqui limitar-nos-emos a fornecer resumidamente as etapas de construção da *mesa óptica de tensão areia/madeira*.

Para além do laser e da mesa óptica, precisaremos ainda de película fotosensível de alta definição, própria para holografia, de um laboratório fotográfico onde a processar e de diversos componentes ópticos, cujas características irão depender da montagem em questão.

2.2.1 A Mesa Óptica

Como nunca é demais salientar, os hologramas têm de ser criados num ambiente totalmente ausente de vibrações. Sons pesados e de baixa frequência, como trânsito passando na vizinhança ou alguém correndo numa sala ao lado, são suficientes para arruinar um holograma.

O problema é resolvido construindo uma mesa especialmente pesada, à base de areia, e suportando-a no ar, onde as vibrações se transmitem com mais dificuldade. Para isso utilizamos uma estrutura de madeira convenientemente reforçada, cheia de areia, assente em câmaras de ar e em velhas

alcatifas. A sua construção não é especialmente difícil. Iremos aqui apenas resumir as suas etapas, pois a ideia não é nossa. Encontra-se descrita em [HH, pp. 23–49], juntamente com instruções de construção de outros tipos de mesas ópticas, para onde remetemos o leitor mais interessado.

Antes de começar a descrição das etapas de construção da mesa, convém fazer alguns reparos importantes:

- A mesa deverá ser construída num local o mais possível ausente de vibrações. Para saber se o local que tem em mente serve, no apêndice B encontra-se descrita uma experiência simples que permite descobri-lo. Aconselhamos vivamente que a efectue, para não vir a ter surpresas desagradáveis.
- O local de construção da mesa deverá poder tornar-se facilmente estanque à luz.
- A mesa é construída sobrepondo diversas camadas de diversos materiais (primeiro os tijolos, depois uma placa de madeira, depois as câmaras de ar, ...). Cada camada deverá estar separada da seguinte por alcatifa (ou outro material semelhante) para garantir um assentamento uniforme e um atenuamento na transmissão de vibrações de camada para camada.

Eis então as etapas para a construção da mesa óptica:

1. Disponha dez tijolos verticalmente e unidos dois a dois, de modo que quatro pares suportem os futuros cantos da mesa e o quinto o centro desta. Entre cada par de tijolos e o chão coloque um pedaço de alcatifa usada, mas de modo que saia uma pequena margem à volta de cada um.
2. Em cima de cada par de tijolos coloque outro pedaço de alcatifa semelhante ao que colocou em baixo, e por cima uma prancha de madeira com as dimensões da mesa que pretende construir. Recomendamos madeira de pinho com $1,2 \times 1,2$ metros (ou, se se sente um pouco mais audacioso, com $1,2 \times 2,4$ metros) e 2,5 centímetros de espessura (fig. 2.1).
3. Cubra a prancha com outra camada de alcatifa.
4. Em cima coloque quatro câmaras de ar pequenas de carro (tipo Morris Mini ou Fiat Panda...) ou de mota parcialmente cheias. A pressão do ar deverá ser suficiente para as começar a fazer inchar, mas não mais do que isso.

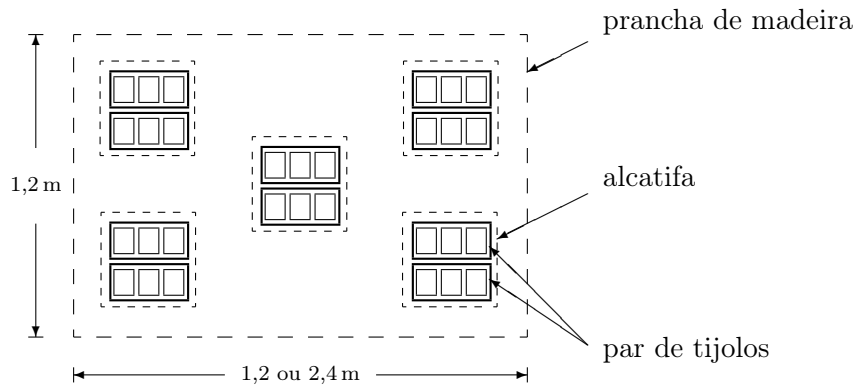


Figura 2.1: Planta da base da mesa.

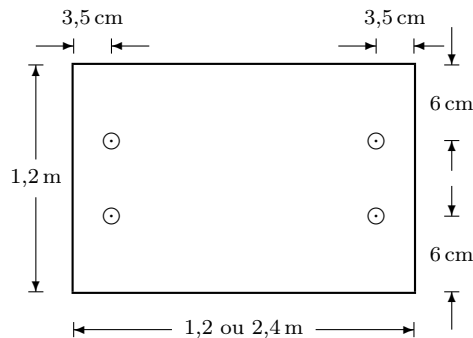


Figura 2.2: O fundo da caixa

5. Teremos agora que colocar em cima de tudo isto a “caixa” de madeira que irá receber a areia.
 - (a) Numa prancha de madeira com as mesmas dimensões da referida em 2) faça quatro furos um pouco mais largos que o sem-fim referido em 5d) afastados 3,5 cm da aresta mais curta e 6¹ cm da mais comprida (fig. 2.2).
 - (b) Coloque a prancha em cima dos pneus. Lembre-se de colocar pedaços de alcatifa entre estas duas camadas!
 - (c) À parte, prepare as paredes da caixa, que deverão ter cerca de 30 cm de altura. As paredes ao longo do comprimento devem ter o tamanho do comprimento, mas as paredes colocadas à largura deverão ser menores que a largura de 2), devido à espessura da

¹Esta medida deverá ser igual ou maior que a espessura da madeira utilizada para as paredes laterais mais o dobro do diâmetro dos sem-fins mais os 3 cm referidos em 5c).

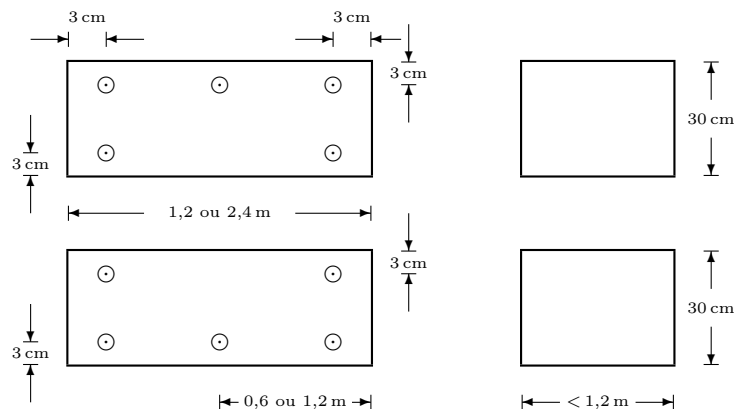


Figura 2.3: As paredes laterais.

madeira. Nas paredes mais compridas, faça quatro furos um pouco mais largos que o sem-fim referido em 5d), a cerca de 3 cm de cada aresta, e outro a meio do comprimento, a cerca de 3 cm da aresta. No total, serão dez furos: quatro para cada canto e um a meio, para cada parede comprida (fig. 2.3).

- (d) Coloque as paredes mais compridas em cima da prancha de madeira e una-as com cinco sem-fins passando pelos dez furos feitos em 5c). Um sem-fim é uma haste de metal com uma rosca a longo de todo o comprimento. São eles que dão a tensão necessária à mesa para suportar o peso de areia de lá iremos colocar.

Nove sem-fins são necessários para a construção da mesa. Os cinco referidos em cima deverão ter como comprimento um pouco mais que a largura da mesa. Os quatro restantes deverão ser um pouco mais compridos que a altura das paredes mais duas vezes a espessura da madeira com que estamos a trabalhar (já iremos ver porquê). O diâmetro deverá andar à volta de 1 cm, e o passo da rosca não é importante. Lembre-se só de comprar anilhas e porcas correspondentes!

- (e) Coloque as paredes da largura encaixadas entre as outras, presas devido à tensão dos sem-fim e no lado de dentro destes (fig. 2.4). Não aperte demasiado. Ainda não chegou o momento do “enros-canço final”!
- (f) Coloque duas tábuas de madeira deitadas em cima da estrutura já construída, no sentido da largura. Estas tábuas deverão ter cerca de 20 cm de largura e um comprimento um pouco maior que a

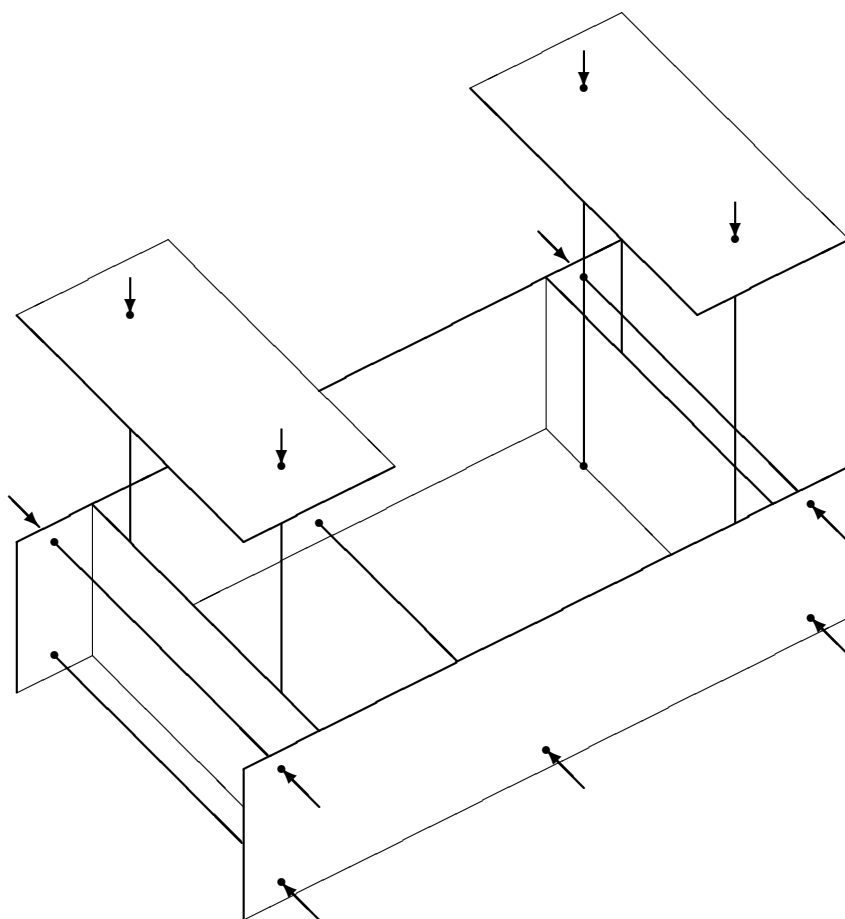


Figura 2.4: Caixa com os sem-fins já montados, recebendo as tampas.

largura da caixa e ter um furo em cada extremidade que encaixe com os feitos em 5a).

- (g) Passe os quatro sem-fins que faltam pelos furos, unindo assim as tábuas de cima à prancha que serve de base (fig. 2.4).
- (h) Finalmente, aperte bem todas as porcas dos sem-fins. Lembre-se de deixar o menos possível os sem-fins a sair da parte de baixo, para evitar contactos fortuitos com as câmaras de ar.
- (i) A “caixa” está completa. Se não a construiu em cima do suporte de tijolo e câmara de ar, agora é a altura de a colocar lá, ajustando o que ainda não foi ajustado.

6. A etapa final é encher a mesa de areia. Deveremos escolher uma areia média (tipo # 2). Será necessário cerca de um metro cúbico de areia. Cada saco deve ser posto suavemente na mesa, aberto e o seu conteúdo espalhado uniformemente. Deveremos encomendar um ou dois sacos a mais para eventuais acamamentos.

Teremos assim a nossa mesa óptica construída e pronta a ser utilizada. Os componentes ópticos e os objectos necessários para cada montagem irão ser fixos na areia. Para além de prática e económica, esta mesa tem ainda a vantagem de ser *desmontável* (não esquecer de guardar os sacos de areia vazios para essa eventualidade).

2.2.2 A Câmara Escura

Na construção de um holograma, diversas etapas envolvem a utilização de um ambiente que se possa isolar da luz exterior, como foi salientado em 2.1. Colocar a mesa óptica em tal local não é especialmente difícil. Basta termos à nossa disposição um quarto. As janelas, se houverem, poderão ser tapadas com várias camadas de cortinas espessas e pretas, e a porta deverá ser bem calafetada (atenção à fechadura). Quanto ao processamento da película, existem diversos tanques próprios para o seu processamento à luz ambiente. O problema de uma câmara escura encontra-se assim facilmente ultrapassado.

2.2.3 Os Químicos

Depois de sensibilizarmos a película à luz de um laser, as etapas do seu processamento são muito idênticas às do processamento de película a preto e branco e foram já referidas em 2.1. Teremos então:

Revelação Devido à grande definição do material, nem todos os reveladores de preto e branco podem ser utilizados. O mais comum é o **D-19**, da Kodak, originalmente concebido para películas de raios-X. A Tetenal também comercializa um muito bom designado por **Neofin Blau**.

Paragem Ácido acético diluído, ou qualquer outro agente ácido.

Fixação Qualquer fixador de preto e branco serve.

Lavagem Água corrente.

Molhante Qualquer agente próprio para película fotográfica serve.

Secagem De preferência ao ar e num ambiente ausente de poeiras.

Branqueamento Esta etapa é muito especial e depende do tipo de holograma onde vai ser efectuada.

Transmissão Para este tipo de hologramas, o banho branqueador é introduzido depois da fixação, e tem como objectivo transformar a prata escura de novo num sal de prata transparente. A eficiência do holograma aumenta enormemente (poderá passar de 3% para 80 ou 90%), visto a difracção passar a ser feita *em fase*. É facultativo. Uma fórmula possível:

Água	700	ml
Nitrato de Ferro (cristalino)	150	g
$\text{Fe}(\text{NO}_3) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$		
Brometo de Potássio KBr	30	g
Água até	1000	ml

Reflexão O banho branqueador é essencial para este tipo de hologramas. Deve ser efectuada logo depois da revelação e pretende aumentar a definição do holograma. Um exemplo:

Água	700	ml
Brometo de Potássio KBr	30	g
Borax	15	g
Dicromato de Potássio	2	g
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$		

Antes de utilizar adicionar:

P.B.Q. (p-benzoquinona)	2	g
Água até	1000	ml

Depois de se adicionar P.B.Q., a solução deverá ser utilizada dentro de 15 minutos.

A lavagem poderá ser reforçada com um banho tipo *Hypo-Clear*.

2.2.4 As Películas

A característica fundamental de um suporte visual para um holograma terá que ser a sua enorme definição.

Não procuramos apenas registrar um padrão de escuros e claros, como em fotografia. Nesse caso, só precisamos de ter a definição suficiente para que o que o nosso olho percebe como ponto infinitamente pequeno no mundo o seja também na imagem fotográfica. Isso é conseguido com resoluções na ordem das poucas centenas de linhas por milímetro. Para termos uma ideia mais concreta basta ver que uns dos filmes a preto e branco que maior definição tem, no que respeita à fotografia, consegue resolver cerca de 300 linhas por milímetro.

Isto revela-se totalmente insuficiente para a holografia, onde necessitamos de resoluções na ordem dos milhares de linhas por milímetro, pois queremos registrar as “ondas de luz” em si. Não podemos, assim, utilizar uma película de preto e branco “normal”. Felizmente, existem no nosso mercado diversas marcas (Kodak, Agfa, ...) que fabricam filmes para holografia de muito boa qualidade e definição (mais de 2000 linhas por milímetro).

Dentro dos diversos filmes existentes especialmente concebidos para holografia, teremos que escolher o que melhor se adapta à nossa instalação. Para isso teremos que ter em conta os seguintes factores:

- qual o comprimento de onda do laser, para escolher a película com a *sensibilidade* mais apropriada;
- se desejamos ou não uma *camada anti-halo*²; esta camada poderá ser útil para hologramas de transmissão, mas *não é permitida em hologramas de reflexão*;
- qual o suporte da película, se vidro, se acetato; vidro é preferencial para a maior parte das utilizações, devido à sua rigidez;
- qual a dimensão da película (9×12 cm, 13×18 cm, ...).

A nossa recomendação será a de chapas de vidro de 13×18 cm, com anti-halo para hologramas de transmissão e sem para de reflexão.

2.2.5 O Laser

Escolher um laser é como escolher um carro novo, ou uma casa, ou qualquer coisa cara com diversas aplicações e com diversos modelos disponíveis.

²evita reflexões espúrias do suporte da emulsão

Para não nos perdermos no meio de tantos modelos e preços, convém antes decidirmos que tipo de hologramas pretendemos fazer e até quanto estamos dispostos a pagar por isso.

Os lasers existentes actualmente no mercado dividem-se actualmente em dois tipos básicos:

- de feixe contínuo;
- de impulso.

Os lasers de feixe contínuo são aqueles que produzem um feixe de luz continuamente, enquanto estão ligados. O tipo de radiação poderá ser visível ou invisível, mais ou menos potente, consoante o modelo comprado.

Os de impulso funcionam, como o nome indica, por disparos muito rápidos. São geralmente mais caros e o seu funcionamento mais delicado, mas permitem efectuar hologramas mais arrojados que os de feixe contínuo.

Um exemplo será um holograma de um ser vivo. Por mais imóvel que esteja, como uma planta num ambiente sem vento, apenas o facto de existirem fluidos movendo-se no seu interior durante a exposição à luz de um laser contínuo (a seiva, por exemplo) é suficiente para arruinar os padrões de interferência. Utilizando um laser de impulso ultrapassamos esse problema, devido à alta frequência do disparo.

No entanto, como primeira aquisição, recomendaria adquirir-se um laser contínuo de He-Ne (hélio-neon). São dos mais baratos e o facto de emitirem radiação na zona do vermelho torna as montagens mais fáceis de realizar. A sua potência é mínima, o que diminui grandemente os riscos da sua má utilização. Teremos apenas que ter o cuidado de nunca olharmos directamente para o feixe concentrado (vide Apêndice A).

Como última recomendação, é bom verificar que o laser adquirido permite o modo de funcionamento tem_{00} , pois vai ser dessa maneira que será utilizado para fazer hologramas.

2.2.6 Os Componentes Ópticos

São vários os componentes ópticos que serão introduzidos no caminho do laser. Embora alguns dependam da montagem em questão, a maior parte são comuns a quase todas, e é sobre esses que nos iremos debruçar:

Obturador O primeiro obstáculo que o raio de laser deverá encontrar no seu caminho é o obturador. Este poderá ser comprado nas lojas da especialidade, adaptado de uma câmara fotográfica antiga ou, para as montagens mais simples, feito utilizando o *método do cartão opaco*.

Em qualquer dos casos devemos ter em conta que o obturador tem que permitir longas exposições (de segundos a minutos) com algum controle (erro não superior a 10%).

Espelhos De seguida, o laser irá ser “guiado” por espelhos num percurso por nós escolhido. O número de espelhos pode variar desde um até cem(!), sendo o número médio de quatro. As suas dimensões deverão andar à volta de metade das da película, mas dependem também de cada montagem. Devem ser comprados em lojas especializadas em artigos ópticos, e não em qualquer vidraceiro.

Separadores de feixe O essencial da holografia está em conseguirmos criar um padrão de interferência. Este só é conseguido com, no mínimo, duas fontes de luz perfeitamente coerentes entre si. A maneira mais segura de o fazer é utilizar o mesmo laser para simular as duas fontes. Para isso utilizamos os separadores de feixe, que têm a capacidade de reflectir só parte da luz que os atinge, transmitindo a restante. Um separador de feixe circular e variável e outro de 50/50 serão suficientes.

Lentes Estas servirão para divergir o feixe do laser. Sem elas o feixe seguiria em linha recta, sem se espalhar pelo espaço e iluminando apenas uma pequena área do objecto a holografar e da emulsão. Para a maior parte dos casos, uma lente divergente será suficiente.

Cartões opacos Estes têm diversas utilizações. Uma será a de bloquearem a luz, garantindo que a radiação que atinge a emulsão é apenas a proveniente do objecto e a directamente do laser. Outra poderá ser a de envolverem o fundo do objecto, dando a ideia de que este flutua no ar.

Suportes Cada objecto deverá ter o seu suporte próprio, que permitirá orientá-lo e movê-lo garantindo ao mesmo tempo uma estabilidade a toda a prova. Poderão ser comprados ao mesmo tempo que os outros objectos (espelhos, obturador, *beam-splitters*, ...) ou poderão ser construídos e presos depois na areia.

O material acima descrito é mais do que suficiente para realizar com sucesso as montagens que se seguem, mas é natural que, consoante se tente novas técnicas, se revele incompleto. Deverá então ser renovado ou melhorado.

2.3 Montagens

Estamos agora aptos a efectuar as primeiras montagens para construir os primeiros hologramas. As montagens mais simples foram já descritas nas

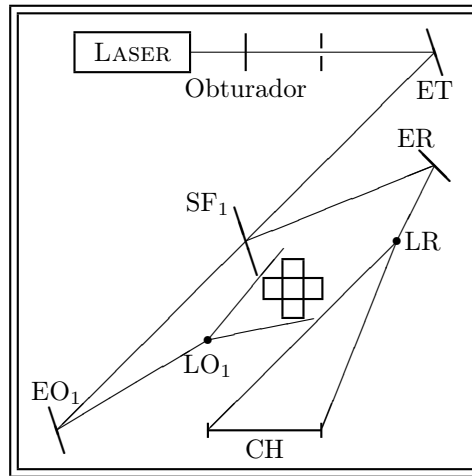


Figura 2.5: Montagem de um holograma de transmissão.

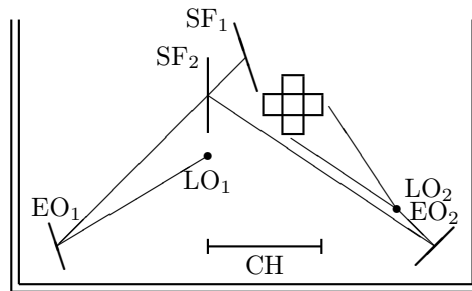


Figura 2.6: Complemento de iluminação.

figuras 1.14 a 1.17, onde não existe uma separação nítida entre o feixe do objecto e o de referência. Nas experiências que iremos descrever de seguida essa separação já é mais clara. Embora se aumente a complexidade da montagem, melhora-se também o resultado final, pois teremos mais controle nos brilhos e na iluminação do objecto a holografar.

2.3.1 Transmissão

Uma montagem para a construção de um holograma de transmissão encontra-se esboçada na figura 2.5. Os passos necessários, por ordem, serão dados de seguida, bem como alguns conselhos e cuidados não clarificados na figura.

1. Coloque o laser, o suporte da chapa holográfica CH e o objecto. O

objecto deve estar colocado de forma que, ao se espreitar pelo enquadramento do suporte, se veja o que se quer ver.

2. Coloque o espelho de transferência ET (o que irá dirigir o feixe ao longo de toda a diagonal da mesa).
3. Coloque o espelho do objecto EO_1 . Este deverá ser posicionado no prolongamento imaginário da aresta do suporte da chapa. Ajuste ET e EO_1 , de modo que o feixe incida no centro do objecto.
4. Coloque o separador de feixe SF_1 .
5. Meça a distância percorrida pelo feixe do objecto desde o separador de feixe até à chapa holográfica. É essencial que esta distância seja igual à percorrida pelo feixe de referência, cujo percurso iremos definir de seguida, devido à coerência espacial. Se a diferença entre as duas distâncias for muito grande, não teremos coerência espacial suficiente para holografar todo o objecto. O holograma aparecerá com pouca “profundidade de campo” ou poderá nem sequer aparecer.
6. Coloque o espelho de referência ER, de modo que o percurso SF_1 –ER–CH seja igual ao SF_1 – EO_1 –CH.
7. Coloque a lente de referência LR, de modo que se obtenha uma iluminação uniforme de CH. Normalmente, LR coloca-se entre ER e CH, mas se for necessário, poder-se-á colocá-la antes, entre SF_1 e ER.
8. Coloque a lente do objecto LO_1 . Esta deverá estar de modo que ilumine o objecto uniformemente e que não apareça no ângulo de visão de CH.
9. De seguida, deveremos proteger CH de reflexões espúrias. Só a luz reflectida pelo objecto e a do feixe de referência deve atingir a chapa. Qualquer outra fonte de luz introduzirá ruído no holograma. Assim, deveremos cuidadosamente, com alguns cartões opacos, bloquear reflexos indesejados (o mais comum é o feixe do objecto, antes de o atingir, chegar também a CH).
10. Para uma melhor qualidade, deve-se tentar uma relação de intensidades entre o feixe de referência e do objecto de 4:1. Esta é conseguida ou com um separador de feixe variável ou movendo as lentes LR e LO_1 .
11. Coloque o obturador, que poderá ser um simples cartão opaco.
12. Coloque a chapa holográfica em CH.

13. Espere cerca de 10 minutos para que todo o sistema assente. Deixe o laser ligado durante esse tempo.
14. Exponha a chapa. O tempo poderá ser determinado por tentativas ou de uma maneira mais segura se se possuir um medidor de potência convenientemente calibrado.
15. Processe a chapa de modo a ter cerca de 15% de densidade. As etapas foram descritas na secção 2.2.3.
16. Para o visualizar, é necessário iluminar o holograma com o laser no mesmo ângulo utilizado para o formar. A chapa tem que estar entre o observador e o laser, como acontece com todos os hologramas de transmissão.

Como alternativa, poderemos iluminar o objecto com um segundo feixe, com o objectivo de melhorar a imagem final. Os passos adicionais encontram-se indicados na figura 2.6. O segundo separador de feixe SF₂ deverá ser de 50/50.

2.3.2 Reflexão

A montagem para a construção de um holograma de reflexão tem muitos passos semelhantes à descrita anteriormente. Novamente, como referência, apresenta-se a montagem completa na figura 2.7. É necessário ter especial cuidado à estabilidade de toda a montagem.

1. Coloque o laser, o suporte da chapa holográfica CH e o objecto. O objecto deve estar colocado depois de CH, mas razoavelmente próximo desta.
2. Coloque o espelho de transferência ET (o que irá dirigir o feixe ao longo de toda a diagonal da mesa).
3. Coloque o espelho do objecto EO₁. Este deverá ser posicionado no prolongamento imaginário da aresta do suporte da chapa. Ajuste ET e EO₁, de modo que o feixe incida no centro do objecto.
4. Coloque o separador de feixe SF₁. Este deverá ser ou variável ou de 90/1.
5. Meça a distância percorrida pelo feixe do objecto desde o separador de feixe até à chapa holográfica. É essencial que esta distância seja

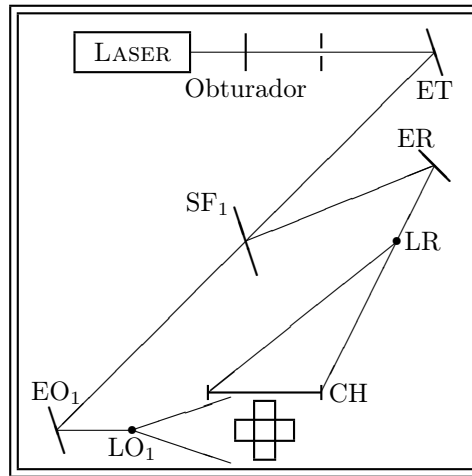


Figura 2.7: Montagem de um holograma de reflexo.

igual à percorrida pelo feixe de referência, cujo percurso iremos definir de seguida, devido à coerência espacial. Se a diferença entre as duas distâncias for muito grande, não teremos coerência espacial suficiente para holografar todo o objecto. O holograma aparecerá com pouca “profundidade de campo” ou poderá nem sequer aparecer.

6. Coloque o espelho de referência ER, de modo que o percurso $SF_1-ER-CH$ seja igual ao SF_1-EO_1-CH .
7. Coloque a lente de referência LR, de modo que se obtenha uma iluminação uniforme de CH. Normalmente, LR coloca-se entre ER e CH, mas se for necessário, poder-se-á colocá-la antes, entre SF_1 e ER.
8. Coloque a lente do objecto LO_1 . Esta deverá estar de modo que ilumine o objecto uniformemente quando visto do lado do laser de CH.
9. Proteger CH de reflexões indesejadas.
10. Para uma melhor qualidade, deve-se tentar uma relação de intensidades entre o feixe de referência e do objecto de 2:1. Esta é conseguida ou com um separador de feixe variável ou movendo as lentes LR e LO_1 e deve ser lida de lados opostos de CH.
11. Coloque o obturador, que poderá ser um simples cartão opaco.
12. Coloque a chapa holográfica em CH.

13. Espere cerca de 15 minutos para que todo o sistema assente. Deixe o laser ligado durante esse tempo.
14. Exponha a chapa. O tempo poderá ser determinado por tentativas ou de uma maneira mais segura se se possuir um medidor de potência convenientemente calibrado.
15. Processe a chapa de modo a ter cerca de 70% de densidade. As etapas foram descritas na secção 2.2.3.
16. Para o visualizar, pode-se utilizar quer o laser, quer uma forte fonte de luz pontual (o Sol, um projector de slides, etc.).

Como na montagem anterior, também poderemos iluminar o objecto com um segundo feixe. Os passos adicionais são semelhantes aos indicados anteriormente.

Apêndice A

Segurança

Qualquer objecto útil pode se transformar num perigo desde que mal manuseado. Esta afirmação é especialmente verdade quando se lida com objectos sensíveis e de alta tecnologia, como é o caso num laboratório holográfico.

Nesta secção pretendemos alertar os interessados para os potenciais perigos (físicos e monetários) envolvidos no processo holográfico e para os métodos de os evitar.

A.1 Mesa Óptica

Se a mesa óptica onde as montagens são realizadas foi comprada, então não há muitas recomendações a fazer. Em princípio ela deverá ser suficientemente sólida para aguentar uma ou outra “sacudidela” mais forte, e o preço que por ela pagaram deverá ser suficiente para a tratarem com o respeito que merece.

Se construíram a mesa de areia descrita na secção 2.2.1, então alguns cuidados extra serão recomendáveis:

- Areia é inimiga de quase todos os materiais. É necessário ter muito cuidado para evitar que danifique os caros componentes ópticos e, claro, o laser.
- Não é recomendável utilizar areia da praia. Deverá vir com bichos que, a longo prazo, se poderão revelar nefastos para o sistema. Além disso, a percentagem de sal nela contida é desaconselhável, visto atrair mais humidade e danificar os materiais mais rapidamente. O aconselhável é comprá-la numa empresa de materiais de construção.
- Para a proteger de lixos e poeiras, manter a mesa sempre tapada. Uma mesa de areia é muito difícil de limpar.

- De vez em quando, verificar o estado da construção, nomeadamente o aspecto geral da madeira, as uniões, a pressão do ar nas câmaras de ar e o nível da areia. É natural que este baixe um pouco nos primeiros tempos, mas depois deverá manter-se constante.

Seguindo as recomendações acima expostas, a mesa óptica de tensão areia/madeira será tão fiável como qualquer outra comprada especialmente para o efeito.

A.2 Laser

Este será, em princípio, o elemento mais caro do laboratório e o que irá requerer mais cuidados.

Um laser de feixe contínuo, como o de He-Ne, dificilmente danifica materiais, desde que a sua potência seja inferior a 500 mW (classe IIIB). Mas, regra geral, qualquer feixe de raio laser ainda não disperso *pode causar danos à retina*. A recomendação principal é, então, *nunca olhar para um feixe de luz laser não divergente, original ou reflectido, seja de que potência for*. Se o feixe já estiver disperso espacialmente, então não deverá haver problema.

Se se trabalhar com um laser de impulsos, então os cuidados deverão ser maiores, pois estes já têm mais facilmente potência suficiente para danificarem a pele humana.

Qualquer laser deve ser protegido da *retroreflexão*, i. é, de que o seu feixe volte a entrar devido a reflexões na sala (espelhos mal colocados, uma superfície metálica polida, etc.). Quando isso acontece, é muito provável que o laser fique seriamente danificado.

Um laser de feixe contínuo deverá ser deixado ligado cerca de 15 minutos antes de ser utilizado, para uniformizar a temperatura interna e estabilizar a radiação emitida.

A.3 Componentes Ópticos

Regra geral, os componentes ópticos utilizados em holografia (lentes, filtros espaciais, espelhos, separadores de feixe) pretendem-se da melhor qualidade possível. Isto, muitas vezes, significa também uma grande fragilidade e um preço proporcional. A recomendação principal é, então, *“todos os cuidados são poucos”*.

A.4 Químicos

Os químicos utilizados no processamento da película holográfica não são muito diferentes dos utilizados para fotografia a preto e branco. Isto significa que não são especialmente activos contra a pele, nem tóxicos¹. A única excepção são os branqueadores, que devem ser manipulados com luvas de borracha e em ambientes arejados.

Qualquer recipiente usado para guardar químicos nunca deverá ser reutilizado para outra função.

¹Atenção às alergias!

Apêndice B

Interferômetro

O interferômetro é uma experiência muito simples que permite decidir se determinado ambiente é suficientemente livre de vibrações para se tornar num estúdio de holografia. Consiste na criação de uma figura de interferência visível a olho nú. Se se mantiver estável, o ambiente (quarto, sala, chão, edifício, etc.) é isolado de vibrações de modo que nele se pode colocar a mesa óptica. Se não, o melhor será procurar outro sítio.

O material necessário é:

- Um laser de feixe contínuo de luz visível, sem grandes preocupações de potência — um laser de HeNe de 0.2 mW será suficiente.
- Um separador de feixe de 50/50.
- Três espelhos ópticos.
- Uma lente divergente de $-11\times$.
- Uma câmara de ar velha.
- Um suporte pesado.
- Pedacos de velhas alcatifas.

Os passos para a construção do interferômetro são os seguintes:

1. Colocar um pedaço de alcatifa no chão. Em cima pôr uma câmara de ar parcialmente cheia e uma nova camada de alcatifa. Finalmente, o suporte pesado.
2. Colocar o laser, o separador de feixe e os três espelhos como se indica na figura B.1. O feixe sai do laser, é reflectido para a diagonal da base pelo

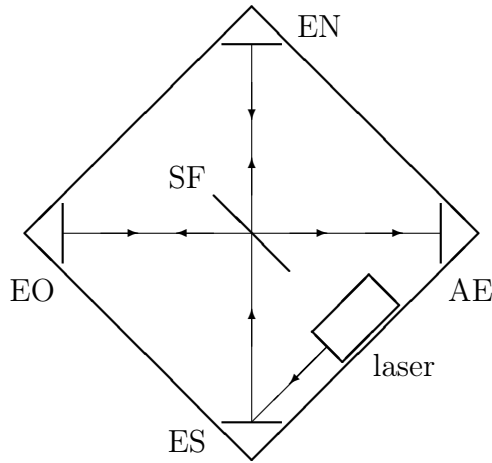


Figura B.1: O interferômetro.

espelho ES e atinge o separador de feixe SF, ao centro. Aí dois feixes vão emergir: um continua até ao espelho EN, onde irá ser reflectido de volta para o separador de feixe SF e por este até ao alvo AE — uma simples folha de papel branco, por exemplo, que não necessita de estar assente no suporte; outro será desviado até ao espelho EO e reflectido de volta até SF, que atravessará, atingindo também o alvo AE.

É preciso garantir que a distância entre SF e EN seja igual à entre SF e EO, para garantir a coerência espacial.

3. Ajustar os espelhos e o separador de feixe de modo que se consiga uma perfeita sobreposição dos dois feixes no alvo. Nessa altura já deverá ser possível detectar um padrão de interferência, mas pequeno devido à pouca divergência dos feixes originados pelo laser.
4. Para aumentar a área da figura de interferência no alvo, pode-se colocar a lente divergente em duas posições diferentes:
 - Entre o primeiro espelho ES e o separador de feixe SF. A figura de interferência, maior, consistirá em diversos círculos concêntricos de claro-escuro.
 - Entre SF e o alvo AE. Aí a figura de interferência deverá ficar do tipo da figura 1.10, consistindo em rectas de claro-escuro paralelas.

E agora, as conclusões:

- Se não se notar *nada*, deverá ser devido ou a um alinhamento errado dos dois feixes no alvo ou a uma grande diferença entre os dois percursos ou a ambos. Refazer a montagem mais cuidadosamente.
- Se as riscas não estiverem estáveis, deve-se esperar alguns minutos para deixar todo o sistema estabilizar.
- Se ao fim de 10 a 15 minutos não se notar um abrandamento significativo no *deslizamento* das riscas, então deve-se dar uma volta pelo edifício à procura das causas: correrias, um frigorífico ligado na sala ao lado, trânsito pesado passando pela rua ou obras no quarteirão são alguns dos factores a investigar.
- Se nada disto funcionar, se a montagem estiver perfeita e o local calmo e silencioso e se mesmo assim as riscas não estabilizarem no alvo após alguns minutos de espera, então o local não é bem escolhido para instalar a mesa óptica. Talvez o edifício seja demasiado antigo, ou se tenha escolhido um andar demasiado alto. Será necessário procurar outro sítio e repetir a experiência.

Depois da mesa óptica montada, poder-se-á fazer nela uma nova montagem do interferómetro, para ter uma ideia do seu grau de estabilidade e do tempo de assentamento de cada montagem.

Apêndice C

Bases Matemáticas

Nesta secção iremos dar um tratamento matemático mais rigoroso aos aspectos teóricos da holografia. Primeiro, mostraremos que as equações de Maxwell conduzem a soluções do tipo *onda plana*. De seguida, introduziremos a noção de *energia* e de *intensidade*. Finalmente, mostraremos que duas ondas planas monocromáticas produzem figuras de interferência que se podem registar num meio fotossensível, originando franjas de diferentes índices de reflexão ou de refração, que poderão ser utilizadas para reproduzir uma das ondas originais.

C.1 As Equações de Maxwell

Não foi Maxwell que deduziu as equações que hoje portam o seu nome. Aliás, pode-se dizer que estas só foram verdadeiramente deduzidas muitos anos depois de terem sido aceites e testadas no meio científico, com o aparecimento da Mecânica Quântica. A sua dedução sai, assim, para fora do âmbito deste trabalho.

Nem foi Maxwell quem primeiro as “descobriu”. As *equações de Maxwell* foram sendo “construídas” ao longo de todo o século XIX por diversos cientistas interessados nos fenómenos electromagnéticos. A grande contribuição de Maxwell foi ter sido o primeiro que as uniu numa teoria coerente, mostrando que com elas se poderia explicar todo o fenómeno do electromagnetismo¹. Foi também Maxwell quem as apresentou completas, acrescentando um termo que anteriormente ainda não tinha sido descoberto.

As equações de Maxwell afirmam que um campo eléctrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} se manifestam e se relacionam da seguinte forma:

¹A nível macroscópico.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{C.1})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{C.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{C.3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{C.4})$$

onde

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

\vec{D} designa-se por *deslocamento eléctrico* e \vec{H} por *excitação magnética*. ρ e \vec{J} representam respectivamente a *densidade volumétrica de carga* e a *densidade volumétrica de corrente* e são a origem do campo electromagnético.

Interessa-nos estudar as soluções das equações de Maxwell no caso particular de um meio sem perdas nem fontes de campo. Isto é o que sucede aproximadamente num laboratório holográfico, com a propagação de um feixe de laser no ar.

Num meio sem fontes, $\rho = 0$ e $\vec{J} = \vec{0}$; num meio sem perdas e isotrópico, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ e $\vec{B} = \mu \vec{H}$, com ϵ e μ reais. As equações de Maxwell podem-se então reescrever como:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{C.5})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{C.6})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{C.7})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{C.8})$$

Aplicando o operador *rotacional* $\vec{\nabla} \times$ a ambos os membros da equação C.6 e utilizando a equação C.5, teremos:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \\ &= -\mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

Se nos lembrarmos que $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$, podemos escrever, utilizando a equação C.7,

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{C.9})$$

com $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$

Um raciocínio idêntico permite-nos escrever:

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{C.10})$$

As equações C.9 e C.10 são as conhecidas equações de propagação de uma onda no espaço, com velocidade $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$. As suas soluções são conhecidas e são do tipo

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_E) \quad (\text{C.11})$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_B) \quad (\text{C.12})$$

A equação C.11 é idêntica à 1.2, já apresentada sem justificação.

C.2 Intensidade

Iremos explicar de seguida como uma onda na forma descrita anteriormente é registada num meio fotossensível.

Segundo Maxwell, a densidade de energia associada a um campo eléctrico é dada por:

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (\text{C.13})$$

A média temporal, durante um tempo $2T$, é, por definição:

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u \, dt \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon \langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle \end{aligned} \quad (\text{C.14})$$

É costume, em Óptica Clássica, designar a média temporal do fluxo da densidade de potência através de uma superfície unitária como *intensidade*, I_P :

$$I_P = c \langle u \rangle = \frac{1}{2} c \varepsilon \langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle \quad (\text{C.15})$$

c é a velocidade de propagação no meio.

Por outro lado, em holografia prefere-se definir *intensidade* de uma forma mais abreviada:

$$I = 2 \langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle \quad (\text{C.16})$$

Consideremos agora uma película fotossensível sendo atravessada por radiação electromagnética, de modo que a intensidade da radiação seja pouco

atenuada. Num qualquer volume de emulsão, a quantidade de grãos de sais de prata tornados “reveláveis” num determinado intervalo de tempo é função da energia recebida pela emulsão durante esse período. Se o volume considerado tiver secção unitária e for perpendicular ao fluxo de energia, este fluxo de energia *por unidade de tempo* é I_P . Após um determinado tempo t_e de exposição, o número de sais de prata impressionados, no volume em questão, será uma função de $I_P t_e \propto I t_e$, que se designa por *índice de exposição* EI :

$$\begin{aligned} EI &= I_P t_e \\ &\propto I t_e \end{aligned} \quad (\text{C.17})$$

Se escrevermos, de uma maneira simplificada, o campo eléctrico \vec{E} como

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(2\pi f t + \phi),$$

onde \vec{E}_0 é a amplitude e depende apenas das coordenadas espaciais e ϕ é uma função de fase também dependente apenas das coordenadas espaciais, então a equação C.16 dá-nos:

$$\begin{aligned} I &= \frac{2}{2T} \int_{-T}^T \frac{\vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0}{2} [1 + \cos(4\pi f t + 2\phi)] dt \\ &\approx \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0 = E_0^2 \end{aligned} \quad (\text{C.18})$$

onde a aproximação é feita para $T \gg 1/f$. Tem-se então que a intensidade é igual ao *quadrado do campo eléctrico* e que medindo a intensidade de uma só onda *não fornece informação sobre a sua fase*.

C.3 Interferência

Se em vez de uma onda, estivermos a trabalhar com um conjunto de ondas, a situação muda de figura. Para facilitar a exposição, iremos tratar do caso de duas ondas monocromáticas, que é a situação com que geralmente se lida em holografia.

Consideremos então duas ondas planas e monocromáticas, de igual frequência, emitidas por duas fontes pontuais distintas:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{01} \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1) \\ \vec{E}_2(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{02} \cos(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2) \end{aligned}$$

Num ponto \vec{r} , o princípio da sobreposição $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ permite-nos escrever:

$$\begin{aligned} I &= 2\langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle \\ &= 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \rangle + 2\langle \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2 \rangle + 4\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \\ &= I_1 + I_2 + 4\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \end{aligned} \quad (\text{C.19})$$

Lembrando-nos que $2 \cos(A) \cos(B) = \cos(A + B) + \cos(A - B)$, o último termo da equação C.19 resolve-se facilmente:

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1) \cos(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2) \\ &= \frac{\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}}{2} [\cos(2\omega t + \phi_1 + \phi_2) + \cos(\phi_1 - \phi_2)]\end{aligned}$$

onde fizemos a seguinte mudança de variável:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= -\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1 \\ \phi_2 &= -\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2\end{aligned}$$

Logo

$$\begin{aligned}\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \\ &= \frac{1}{2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}\end{aligned}\tag{C.20}$$

se $T \gg 2\pi/\omega$.

Tendo em conta C.20 poderemos finalmente completar a equação C.19:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}\tag{C.21}$$

Visto $EI \propto I$ (eq. C.17), o enegrecimento *depende* da diferença de fase entre as duas ondas, através do termo $\cos(\phi_1 - \phi_2)$.

O termo $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}$ é também importante, pois mostra que a orientação relativa das duas ondas é essencial para a formação de um holograma. Para se ter um registo em fase, $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}$ terá que ser *não-nulo*. Isto significa que, se as duas ondas estiverem polarizadas em direcções perpendiculares entre si, não se terá um registo em fase — o holograma não se formará. Por outro lado, se estiverem polarizadas em direcções paralelas entre si, a intensidade resultante I poderá ser maior ou menor que a soma das intensidades.

C.4 Difracção

Mostrámos que é possível registar num meio fotossensível² a fase relativa entre duas ondas planas, monocromáticas, coerentes e polarizadas em direcções não-perpendiculares. Falta mostrar como, a partir desse registo, se consegue reconstruir as frentes de onda que o originaram.

Suponhamos então que duas ondas com as características indicadas anteriormente se propagam fazendo um ângulo θ com o eixo dos yy , convergindo

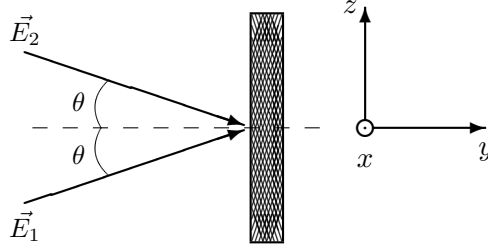


Figura C.1: Formação de um holograma.

uma para a outra (figura C.1). O meio que irá registrar a figura de interferência está colocado no plano xz . Esta será codificada como um padrão de transmitância senosoidal (equações C.17 e C.21) segundo o eixo dos zz para cada x fixo. Se nos lembrarmos da *lei de Bragg*,

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

onde d é o período espacial da figura de interferência, esse padrão poderá ser descrito matematicamente como

$$t(z) = t_0 + t_1 \cos\left(\frac{2\pi}{d}z\right) \quad (\text{C.22})$$

Se fizermos incidir apenas \vec{E}_1 no meio, a radiação transmitida \vec{E}_3 será dada por $t(z)\vec{E}_1$, para cada x fixo. Omitindo, para clareza e sem perda de generalidade, a fase inicial, φ , e a notação vectorial, teremos:

$$\begin{aligned} E_3 &= t(z)E_1 \\ &= t_0E_1 + t_1 \cos\left(\frac{2\pi}{d}z\right) E_{01} \cos\left(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}\right) \end{aligned}$$

Pela figura C.1 podemos escrever

$$\begin{aligned} \vec{k}_1 \cdot \vec{r} &= yk \cos \theta + zk \sin \theta \\ \vec{k}_2 \cdot \vec{r} &= yk \cos \theta - zk \sin \theta \end{aligned}$$

o que nos leva a

$$E_3 = t_0E_1$$

²Isto é, um meio que altera a sua *transmitância* em função da quantidade de energia incidente.

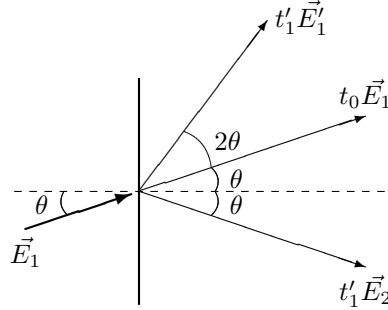


Figura C.2: Reconstrução da onda \vec{E}_2 por difracção da \vec{E}_1 .

$$\begin{aligned}
& + \frac{t_1 E_{01}}{2} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{d} z + \omega t - yk \cos \theta - zk \sin \theta \right) \right. \\
& \left. + \cos \left(\frac{2\pi}{d} z - \omega t + yk \cos \theta + zk \sin \theta \right) \right] \\
= & t_0 E_1 \\
& + \frac{t_1 E_{01}}{2} \cos [\omega t - k(y \cos \theta - z \cos \theta)] \\
& + \frac{t_1 E_{01}}{2} \cos [\omega t - k(y \cos \theta + 3z \sin \theta)]
\end{aligned}$$

Finalmente, fazendo a substituição $t'_1 = \frac{t_1 E_{01}}{2 E_{02}}$, teremos:

$$E_3 = t_0 E_1 + t'_1 E_2 + t'_1 E_{02} \cos \left(\omega t - 2\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \vec{k}_2 \cdot \vec{r} \right) \quad (C.23)$$

No segundo membro da equação C.23, o primeiro termo representa a onda original \vec{E}_1 atravessando a película com atenuação; o segundo termo representa a *reconstrução* da onda \vec{E}_2 , também com atenuação; o terceiro termo, um pouco menos claro, representa uma onda deflectida 2θ em relação a $t_0 \vec{E}_1$ e invertida em fase — pseudoscópica (figura C.2).

C.5 Outras Situações

Ficou então demonstrado que:

- É possível registar informação sobre a fase relativa de duas ondas planas, monocromáticas, coerentes e polarizadas não-perpendicularmente entre si num meio fotossensível.
- Se esse registo for em variação sinusoidal de transmitância, então é possível reconstruir uma das ondas iluminando o material com a outra.

No entanto, geralmente as duas ondas que interferem não são planas, não gerando por isso uma figura de interferência sinuoidal. No entanto, através da análise de Fourier, onde qualquer função é descrita como uma combinação linear de cossenos, é possível demonstrar que estes princípios também lhe são aplicáveis. A demonstração é semelhante à feita anteriormente, mas utilizando-se a notação exponencial para maior facilidade e rigor [OH].

Bibliografia

- [PH] G. Saxby.
Practical Holography.
Prentice Hall International, UK, 1988.
- [HH] F. Unterseher, J. Hansen, B. Schlesinger.
Holography Handbook.
Ross Books, Berkeley, California, 1982.
- [OH] R. Collier, C. Burckhardt, L. Lin.
Optical Holography.
Student Edition.
Academic Press, New York, 1980.
- [VAR] C. Varandas.
Vibrações e Ondas.
Lisboa, AEIST.
- [FEY] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands.
The Feynman Lectures On Physics, Vol. II.
Addison-Wesley, 1966.