

Experimento 6

INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO DA LUZ DE UM LASER POR FENDAS

6.1 OBJETIVOS

Estudo da figura de difração da luz por uma fenda fina em função da largura da fenda.

Estudo da figura de interferência e da figura de difração da luz por várias fendas paralelas e idênticas em função da quantidade de fendas e do espalhamento entre elas.

6.2 PARTE TEÓRICA

6.2.1 Difração

Consideremos um feixe de raios de luz paralelos representando uma porção de uma onda plana propagando retilineamente em um meio homogêneo, infinito e que esse feixe seja parcialmente bloqueado por um obstáculo como mostra a figura (Fig. 6.1).

A sombra que se observa num anteparo colocado à frente não é exatamente a sombra geométrica do obstáculo. Pode-se observar uma região iluminada, uma região de sombra difusa e uma região de sombra. Observando-se cuidadosamente a região difusa pode-se até perceber, em seu interior, locais alternados claros e escuros. Esse fenômeno de “curvatura” da trajetória da luz, em que os raios luminosos atingem regiões na sombra geométrica do obstáculo, é chamado de *difração da luz*.

A figura de difração pode ser observada em um anteparo a qualquer distância do obstáculo e sua forma se modifica com a variação dessa distância. Quando o anteparo encontra-se a uma grande distância, a difração recebe o nome de difração de Fraunhofer e, para obstáculos com formas geométricas simples como no caso de uma fenda, pode ser avaliada analiticamente.

O fenômeno da difração pode ser mais bem compreendido com o auxílio do *princípio de Huygens* que diz que todo ponto do espaço em uma frente de onda pode ser considerado

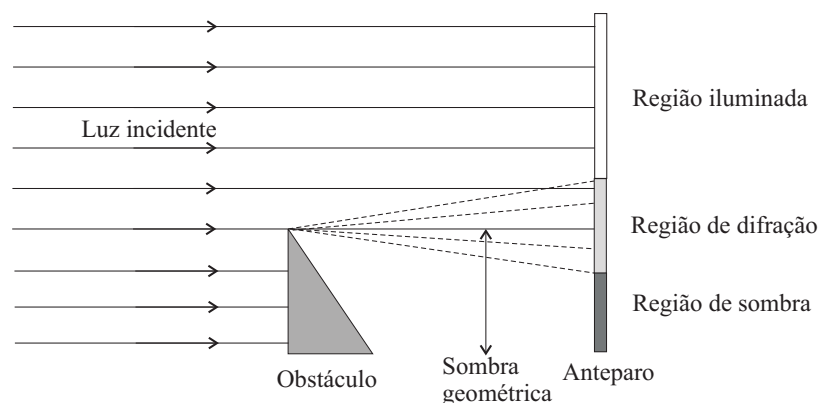


Figura 6.1: Difração produzida por um obstáculo que bloqueia parcialmente um feixe raios de luz paralelos .

como origem (uma fonte puntiforme) de ondas esféricas centradas neste ponto. Se adotarmos esse princípio como verdade, poderemos compreender como a frente de onda que não foi bloqueada pelo obstáculo consegue iluminar o anteparo na região de sombra geométrica. Basta observar que os pontos da frente de onda que estão logo acima do obstáculo estão gerando ondas esféricas e essas ondas se espalham em todas as direções não havendo superposição com as ondas esféricas dessa mesma frente de onda que foram bloqueadas pelo obstáculo.

Um obstáculo de forma geométrica simples e interessante consiste em um pequeno orifício circular em uma placa opaca colocado defronte a um feixe paralelo de luz. Se o orifício for bastante pequeno observaremos a emissão de uma onda hemisférica a partir desse orifício. Isso pode ser constatado pela iluminação uniforme em um anteparo colocado em frente ao orifício (Fig. 6.2).

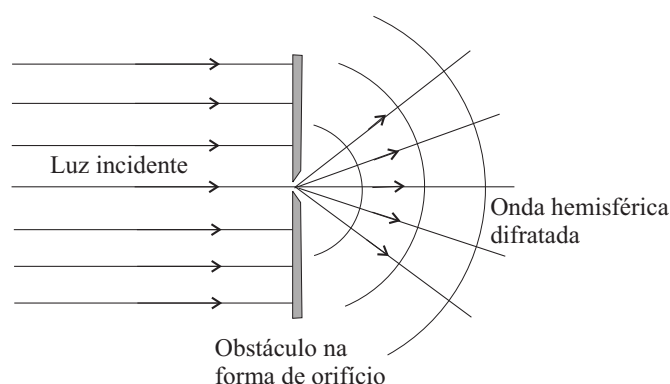


Figura 6.2: Difração produzida por um pequeno orifício sob incidência um feixe raios de luz paralelos.

6.2.2 Difração por uma fenda fina

Consideremos agora que o obstáculo tenha a forma de uma fenda fina. Uma fenda pode ser encarada como uma sucessão de orifícios alinhados e infinitamente prôximos um dos outros de forma que a frente de onda formada pela fenda será a superposição de superfícies esféricas de mesmo raio, alinhadas e equidistantes da fenda. Ou seja, uma frente de onda cilíndrica cujo eixo é paralelo à fenda. Se a fenda for bastante comprida quando comparada com a sua abertura, ela se comportará como uma fenda de comprimento infinito e poderemos analisar o problema num plano bidimensional que corte a fenda perpendicularmente, o plano do papel, como mostra a figura (Fig. 6.3) para uma fenda de abertura a .

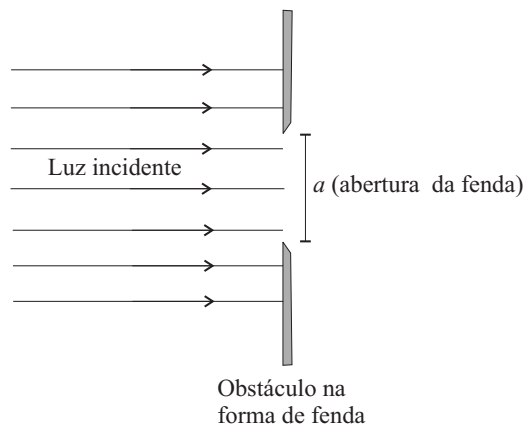


Figura 6.3: Vista de corte de um obstáculo na forma de uma fenda que bloqueia parcialmente um feixe raios de luz paralelos. O eixo da fenda é perpendicular ao plano da folha.

Um ponto P qualquer em um anteparo distante e paralelo à fenda receberá as ondas esféricas produzidas ao longo da abertura da fenda. Essas ondas se interferirão e produzirão uma figura chamada de *figura de difração*. A amplitude da onda luminosa (amplitude do campo elétrico ou do campo de indução magnética) no anteparo será a soma (integral) das amplitudes de todos os campos infinitesimais de todas as ondas que partem da fenda e chegam ao ponto P no anteparo. A figura (Fig. 6.4) mostra dois raios de luz que partem da fenda e chegam em P .

Se o anteparo estiver no infinito, ou seja, se a distância D é muito maior que a abertura da fenda a os raios serão praticamente paralelos e teremos uma *figura de difração no infinito* ou difração de Fraunhofer. Se o anteparo estiver próximo à fenda ($D \approx a$) teremos a difração de Fresnel e se a distância for intermediária teremos a difração de Rayleigh.

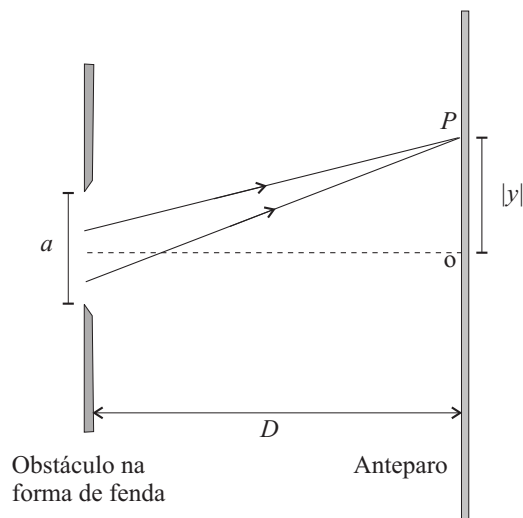


Figura 6.4: Vista de corte de dois raios de que partem de uma fenda e chegam em um ponto do anteparo.

6.2.3 Difração de Fraunhofer de uma fenda fina

Estando o anteparo distante, a experiência mostra que a figura de difração que se forma no anteparo, produzida por uma fenda fina, tem a forma de faixas ou franjas claras e escuras como na figura (Fig. 6.5). A franja central é mais intensa (mais brilhante) e mais larga que as franjas laterais. Pode-se verificar por medidas experimentais que a largura da franja central (entre dois pontos de intensidade mínima) vale o dobro da largura de qualquer franja lateral.

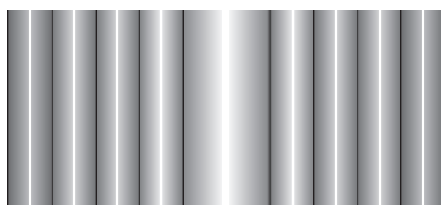


Figura 6.5: Figura de difração formada em um anteparo distante produzida por uma fenda fina iluminada por luz monocromática.

Pode-se mostrar que, sendo I_0 a intensidade luminosa no ponto central (ponto mais brilhante), a intensidade luminosa em uma posição y (tal que $(|y|/D) \ll 1$) sobre o anteparo e medida na direção transversal da fenda é dada pela função

$$I = I_0 \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (6.1)$$

onde

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda D} y \quad (6.2)$$

cujos gráfico tem o aspecto mostrado em (Fig. 6.6).

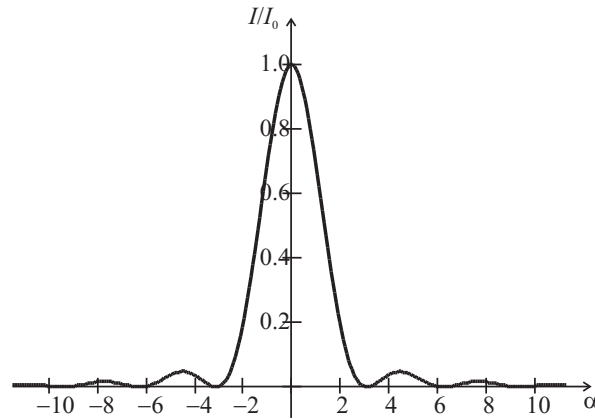


Figura 6.6: Gráfico da intensidade luminosa da figura de difração formada em um anteparo distante produzida por uma fenda fina iluminada por luz monocromática.

Os mínimos de intensidade luminosa ocorrem quando

$$\text{sen} \alpha = 0,$$

ou seja, quando

$$y = k \frac{\lambda D}{a}, \quad k = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (6.3)$$

de modo que a largura da franja central (de mínimo a mínimo ao redor do centro) vale

$$\text{Largura da franja central} = \frac{2\lambda D}{a} \quad (6.4)$$

e a

$$\text{Largura da franja lateral} = \frac{\lambda D}{a}. \quad (6.5)$$

A figura (Fig. 6.7) mostra essas larguras.

Observe que a largura da franja é diretamente proporcional ao comprimento de onda, à distância do anteparo à fenda e inversamente proporcional à largura da fenda. Para uma fenda extremamente fina ($a \rightarrow 0$) o anteparo tende a ser uniformemente iluminado, coerente com a idéia que a frente de onda cilíndrica tende a uma frente de onda plana.

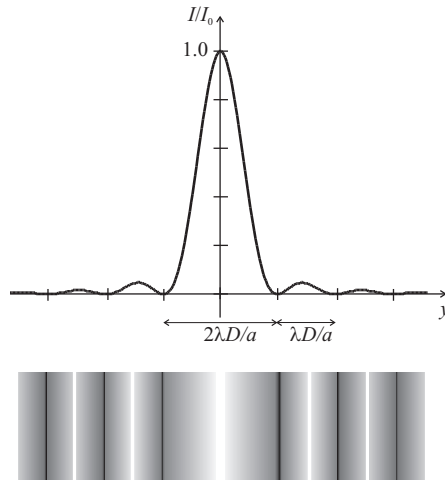


Figura 6.7: Larguras das franjas na figura de difração de uma fenda.

6.2.4 Difração de múltiplas fendas idênticas e paralelas

Consideraremos agora a figura de difração em um anteparo distante produzida por duas ou mais fendas idênticas de abertura a e separadas por uma distância d . Cada fenda produz, individualmente, uma figura de difração no anteparo ligeiramente deslocada da figura de difração produzida pela fenda vizinha. Em outras palavras, cada ponto do anteparo recebe ondas que partiram de todos os pontos *de todas as fendas*. A figura resultante é a superposição ou interferência de todas essas ondas. A experiência mostra e também é possível demonstrar teoricamente que a figura no anteparo é a figura de interferência da mesma quantidade de fendas finas (abertura desprezível) equidistantes (separação d) modulada pela figura de difração de uma única fenda com abertura a . No interior da franja central e das franjas laterais de difração aparecem diversos picos de intensidade correspondentes à figura de interferência. As amplitudes dos picos de interferência são controladas (moduladas) por uma envoltória correspondente à figura de difração de uma única fenda (Fig. 6.8).

A medida que aumenta-se a quantidade de fendas equidistantes os picos de intensidade tornam-se mais agudos e mantém suas posições. Aparecem ainda picos secundários de pequena amplitude entre os picos principais. Tais picos secundários aumentam em quantidade com o aumento da quantidade de fendas, contudo, suas amplitudes tornam-se tão pequenas que ficam imperceptíveis. A distância entre os picos principais depende da distância de separação entre as fendas.

A intensidade em um ponto P , que se encontra sobre a tela de observação, devido à difração de um feixe luminoso sobre um conjunto de N fendas de mesma largura a e igualmente espaçadas por uma distância d , é dada pela expressão:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\text{sen}N\beta}{\text{sen}\beta} \right)^2 \quad (6.6)$$

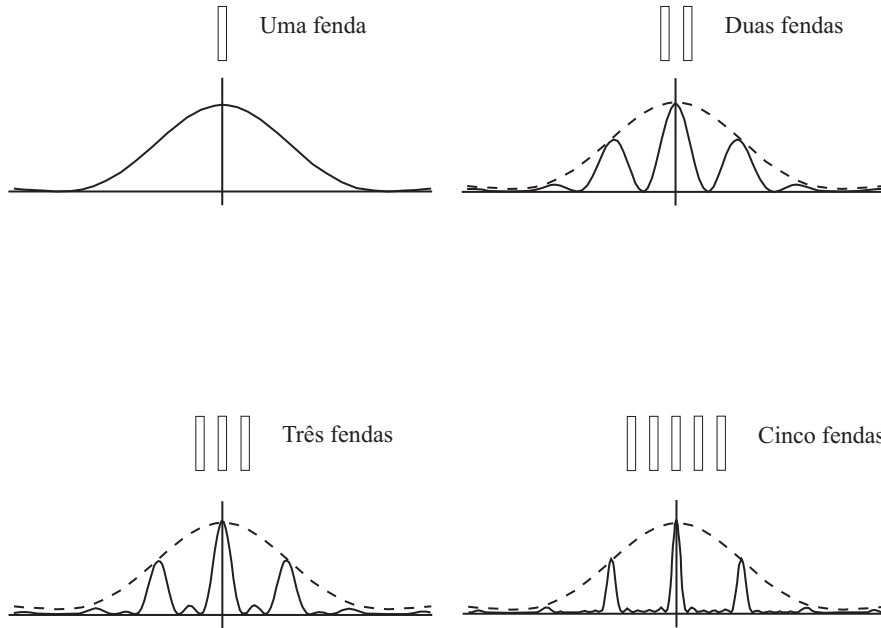


Figura 6.8: Figuras de difração de várias fendas largas e equidistantes.

$$\alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \quad \beta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (6.7)$$

O termo

$$FD = \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (6.8)$$

é frequentemente chamado de Fator de Difração (FD). Os mínimos de FD ocorrem quando

$$\alpha = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (6.9)$$

o que nos leva à condição de mínimos de difração:

$$a \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6.10)$$

Para $\theta \ll 1$ podemos fazer a aproximação $\sin \theta \sim \tan \theta = \frac{|y|}{D}$, onde D é a distância da tela à fenda e $|y|$ a distância do ponto de mínimo ao zero central. Isto nos leva a:

$$a \frac{|y|}{D} = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6.11)$$

O termo

$$FI = \left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2 \quad (6.12)$$

é denominado de Fator de Interferência (FI), cujos máximos ocorrem quando

$$\beta = n\pi \rightarrow d \sin \theta = n\lambda \rightarrow d \frac{|y|}{D} = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6.13)$$

A figura 6.9 mostra (em linha cheia, em vermelho) o gráfico da intensidade $I(\theta)$ (expressão 6.6) para o caso onde $N = 5$ e $d/a = 3$. No mesmo gráfico é mostrado também o Fator de Difração (em verde) modulando a curva de interferência. Como se pode ver, no interior do máximo central de difração existem vários pontos brilhantes, ou seja, picos de intensidade. Contudo, estes picos não correspondem necessariamente aos máximos de intensidade do FI, dados pela expressão 6.13. Discutiremos esta questão nos próximos itens.

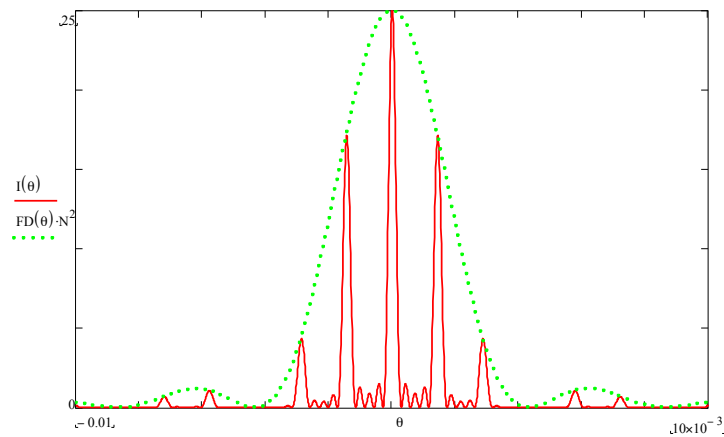


Figura 6.9: Intensidade para 5 fendas com $d/a = 3$.

6.2.5 Fenda Dupla

Fazendo $N = 2$ na expressão 6.6, obtemos:

$$I(\theta) = 4I_0 \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\alpha} \right)^2 \cos^2\beta \quad (6.14)$$

A figura 6.10 mostra a superposição dos gráficos de $I(\theta)$ (em vermelho), do FI (em azul) e do FD (em verde) para uma fenda dupla.

Como se vê, os picos de FI não coincidem com os máximos de $I(\theta)$, de modo que a condição 6.13 não pode ser usada. Contudo, para o caso de fenda dupla, os mínimos de $I(\theta)$ coincidem com os mínimos do FI. Isto ocorre quando

$$\beta = (2n+1)\frac{\pi}{2} \quad \rightarrow \quad d\text{sen}\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \rightarrow \quad d\frac{|y|}{D} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (6.15)$$

Desta forma, a condição 6.15 pode ser usada para se determinar a distância d entre as fendas.

6.2.6 Múltiplas fendas

A figura 6.11 é um detalhe ampliado da figura 6.9, e mostra que não há coincidência entre um pico de $I(\theta)$ (em vermelho) com o máximo correspondente do FI (em azul).

Entretanto, à medida que o número de fendas aumenta, observa-se que:

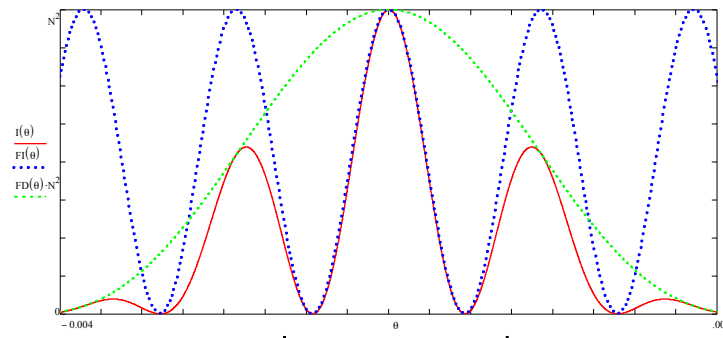


Figura 6.10: Intensidade para fenda dupla.

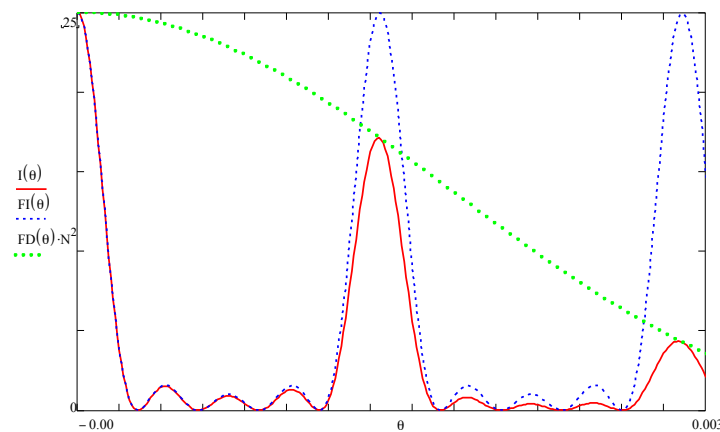


Figura 6.11: Detalhe ampliado da figura 6.9.

- Os máximos de interferência tornam-se mais estreitos
- A intensidade dos picos secundários tornam-se desprezíveis
- Os picos de $I(\theta)$ tendem a coincidir com os máximos do FI.

Assim, nestas condições, a condição de máximo de interferência, dada por 6.13, poderá ser usada para a determinação da distância d entre as fendas.

6.3 PARTE EXPERIMENTAL

6.3.1 Lista de materiais

Identifique os seguintes equipamentos e materiais que se encontram sobre a mesa:

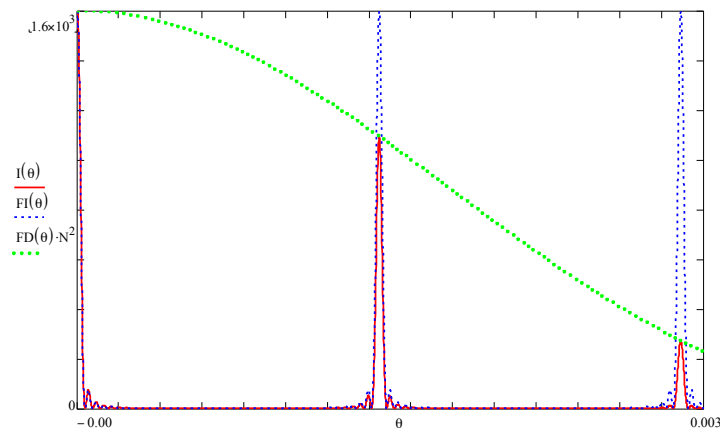


Figura 6.12: Figura de interferência e difração por $N = 40$ fendas..

- Bancada Ótica
- Laser de diodo com $\lambda = (650 \pm 5)$ nm
- Um suporte para slides
- Conjunto de slides numerados com várias configurações de fendas
- Um anteparo
- Uma trena

Importante: Nunca incida o feixe de laser diretamente sobre seus olhos. Isso pode causar lesões graves em seu olho.

6.3.2 Ajustes iniciais

- Ligue o laser e, com o suporte de fendas sem slide, desloque a bancada ótica de modo que o feixe de laser incida sobre o zero central da escala milimétrica pregada no anteparo.
- Mantendo a trena bem esticada, meça a distância entre o anteparo e o suporte das fendas. Anote o desvio.
- A partir deste momento, você não deve deslocar a bancada ótica e nem o anteparo.

6.3.3 Difração por fenda simples

- Coloque no suporte o slide número 1, que contém 3 fendas simples de diferentes larguras. Ajuste o slide de modo que o feixe de luz incida sobre a fenda mais estreita. Meça no anteparo a largura da franja central, isto é, a distância entre o primeiro

mínimo de difração à esquerda e o primeiro mínimo à direita desta franja central. Avalie o desvio*.

- Anote o valor da largura da fenda e calcule o valor do comprimento de onda do laser com o respectivo desvio. Considere que a largura da fenda tenha um desvio de 5%. Compare com o valor fornecido no item 6.3.1
- Repita estes procedimentos para as duas outras fendas que estão no slide.

***Observação:** Você irá notar que o ponto de mínimo não está perfeitamente definido, de modo que esta medida tem uma razoável incerteza. Note que o desvio desta medida não será a metade da menor divisão da escala milimétrica e dependerá da largura da fenda. Embora a escolha do desvio tenha uma certa arbitrariedade, ela deve se basear em algum critério. Discuta que critério é o mais conveniente para esta medida.

6.3.4 Difração por fenda dupla de mesma largura e distância entre as fendas variável

- Insira no suporte o slide número 2, que contém 4 fendas duplas de mesma largura e distâncias variáveis. Neste slide a largura da fenda é identificada pela letra b ao invés de a , enquanto que a distância entre as fendas é identificada pela letra g , ao invés de d . Você irá notar que dentro do máximo central de difração observado no item anterior terão vários pontos brilhantes e escuros. Na realidade, o que temos é a curva de interferência sendo modulada pela de difração (Veja expressão 6.14). É preciso notar que os pontos brilhantes não correspondem necessariamente aos máximos do fator de interferência. Contudo, os pontos escuros correspondem aos mínimos de interferência.
- Meça a distância entre o primeiro mínimo de interferência à esquerda do zero central e o primeiro mínimo de interferência à direita.
- Calcule a distância d entre as fendas, com o respectivo desvio. Para este e demais cálculos, utilize $\lambda = (650 \pm 5)$ nm. Compare este resultado com o valor impresso no slide.
- Identifique os pontos de mínimo de difração e faça a leitura do primeiro mínimo à esquerda e à direita do máximo central. Calcule a largura a de cada fenda, com o respectivo desvio.
- Repita estes procedimentos para as demais fendas duplas contidas no slide.

6.3.5 Difração por fenda dupla de mesma distância entre as fendas e largura variável

- Insira no suporte o slide número 3, que contém três fendas duplas de mesma distância d entre as fendas, mas com largura a de cada fenda variável. Repetindo o procedimento experimental do item anterior, determine a distância d e a largura a de cada fenda, com os respectivos desvios.

6.3.6 Difração por fendas múltiplas

- Insira no suporte o slide número 4, que contém um conjunto de fendas múltiplas igualmente espaçadas e com mesma largura. Cada conjunto contém N fendas, onde $N = 2, 3, 4, 5$ e 40.
- Incida luz sobre o conjunto que contém $N = 3$ fendas. Você irá notar que dentro do máximo central de difração irão existir vários picos, com brilhos diferentes. Anote a posição destes picos. Troque agora o conjunto para $N = 4$ fendas e anote a posição dos picos que aparecem dentro do máximo central. Você notará que aparecerão mais pontos brilhantes (mas de intensidade menor), mas alguns manterão a mesma posição do caso anterior.
- Repita o procedimento para $N = 5$ e você vai notar que o comportamento será o mesmo. Anote a posição do primeiro pico principal à esquerda e à direita do pico central. A partir desta medida, calcule a distância d entre as fendas, e o respectivo desvio, usando a condição 6.13. Contudo, de acordo com o item 6.2.6, esta não é a condição ideal para se medir a distância d . Discuta então se o valor por você obtido é aceitável, à luz do desvio calculado e do resultado obtido no item 6.3.4.

6.4 BIBLIOGRAFIA

[4], [5], [6], [7], [10], [22], [3], [11], [12], [13], [14], [15]