



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Experimento 3: Difração da Luz por Fendas

2.3.1 Objetivos

- ✓ Estudar a figura de difração da luz monocromática por uma fenda fina em função da largura da fenda.
- ✓ Estudar a figura de interferência e difração da luz monocromática por várias fendas paralelas e idênticas em função da quantidade de fendas e do espaçamento entre elas.
- ✓ Estudar a figura de difração da luz branca.

2.3.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma fonte de luz branca com lente acoplada
- ✓ Um laser de luz vermelha
- ✓ Uma tela com $N = 2, 5$ e 10 fendas de espaçamento idêntico entre elas.
- ✓ Uma tela com fendas duplas com espaçamentos de $0,2$; $0,4$; e $0,6$ mm entre elas. A abertura das fendas são idênticas
- ✓ Uma tela com fendas únicas e aberturas de $0,1$; $0,2$ e $0,3$ mm entre elas.
- ✓ Rede de difração com 1000 fendas.
- ✓ Régua milimetrada.

2.3.3 Fundamentação Teórica

A ótica geométrica considera os casos em que a luz se propaga em feixes paralelos de raios e encontra objetos cujas dimensões são muito maiores do que o seu comprimento de onda. Neste domínio, inclui-se o estudo das propriedades dos espelhos e das lentes. A experiência mostra, entretanto, que a luz ao atravessar obstáculos muito finos, comparáveis ao comprimento de onda da luz, passa a apresentar suas propriedades ondulatórias, que é o caso da difração por fendas finas. A difração é o desvio ou dispersão de ondas que encontram um objeto em seu caminho. A observação experimental da difração da luz se dá quando um feixe de ondas coerentes (quando as amplitudes das ondas e suas fases são constantes no tempo) atravessa uma abertura muito fina e, um espalhamento de luz é observado em todas as direções. Este caso está ilustrado na Figura 1.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

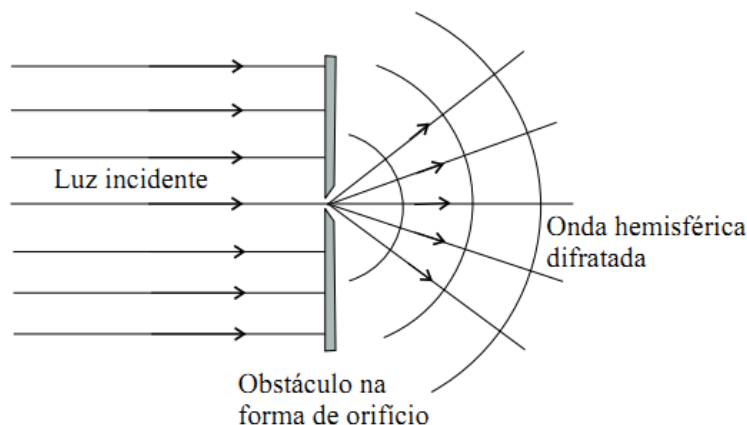


Figura 1 – ilustração da difração da luz por uma fenda fina

Parte 1 - Difração por fenda única

Considere que o obstáculo tenha forma de uma fenda fina. A luz, após ser difratada pela fenda, será formada pela superposição de superfícies esféricas alinhadas e equidistantes da fenda, conforme a Figura 1. Um ponto P qualquer em um anteparo distante e paralelo à fenda receberá as ondas esféricas produzidas ao longo da abertura da fenda. Estas ondas se interferirão e produzirão a chamada *figura de difração*. Uma ilustração deste fenômeno é apresentada na Figura 2, onde os raios que partem da fenda, de abertura a , se interferem em um ponto P do anteparo a uma distância D . A experiência mostra que na figura de difração existem pontos com intensidade mínima e máxima, dependendo se a interferência das ondas luminosas que incidem em P é construtiva ou destrutiva. A Figura 3 é uma imagem de difração, produzida por uma única fenda, quando uma luz monocromática de um laser incide sobre uma fenda.

Para explicar os pontos de mínima interferência, considera-se um anteparo a uma distância D . Se a distância D , do anteparo a fenda for muito maior que a abertura a da fenda, os raios que emergem da fenda serão praticamente paralelos.

Considere que θ , na Figura 4, seja tal que a diferença entre os caminhos percorridos pelos raios 1 e 3 seja $\lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda da luz monocromática que incide em um ponto P no anteparo. Desta forma, o vale de uma das ondas irá coincidir com a crista da outra (veja interferência de ondas em Halliday Resnick, vol 2), havendo uma interferência destrutiva num ponto do anteparo. Observa-se nesta figura, para estes raios, que a diferença de caminho entre eles é dado por $(a/2)\sin \theta$. Um raio muito próximo, abaixo do raio 1, também se interferirá destrutivamente com um raio muito próximo e abaixo do raio 2.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

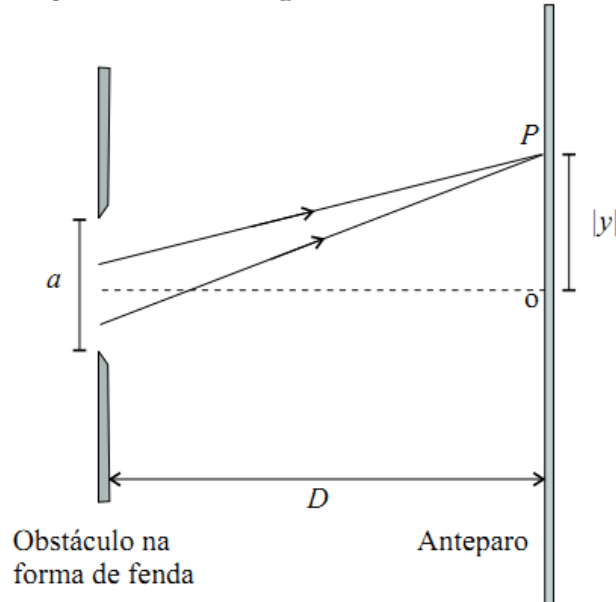


Figura 2 – Vista de corte de dois raios de que partem de uma fenda e chegam em um ponto do anteparo. Nesta Figura, D é a distância do anteparo à fenda, a é a abertura da fenda e y é a distância do ponto de interferência à fenda.

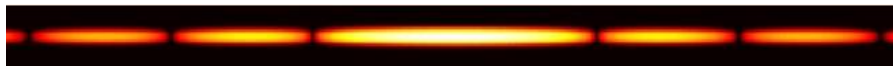


Figura 3- Figura de difração de uma fenda única produzida em um anteparo.

Seguindo este raciocínio para todos os raios, cujas diferenças de caminho seja $(a/2)\sin\theta$, temos um mínimo num ponto do anteparo, dado pela condição:

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

OU

$$a\sin\theta = \lambda$$

Observa-se que quando $a \ll \lambda$, o ângulo θ se aproxima de 90° , iluminando uniformemente o anteparo.

Na Figura 5, representa-se agora 4 raios emergindo da fenda e interferindo em um ponto P' , diferente do ponto P .



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

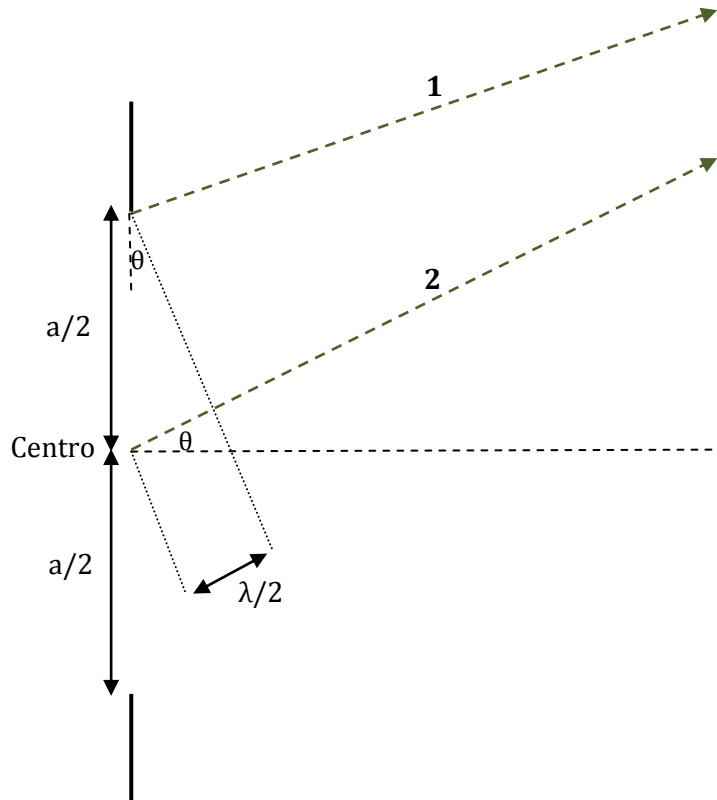


Figura 4- Ilustrações de dois raios luminosos que partem de uma fenda de abertura a e se interferem em um ponto P do anteparo. A diferença de caminho é indicada por $\lambda/2$.

Novamente, se o ângulo θ' , é tal que o par de raios ($1'$, $2'$) esteja meio comprimento de onda defasados, assim como o par ($3,4$), haverá uma interferência destrutiva destes raios, num ponto P' do anteparo. Da mesma forma, os raios imediatamente abaixo de cada raio $1'$, $2'$, 3 e 4 , interferirão destrutivamente aos pares e novamente, um mínimo se estabelecerá, em um ponto P' do anteparo, se:

$$\frac{a}{4} \text{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

ou

$$a \text{sen} \theta = 2\lambda$$



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Se agora, houver $2m$ raios (Figura 5), onde m é um número inteiro, a condição geral para os mínimos tem a forma:

$$\frac{a}{2m} \operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

ou

$$a \operatorname{sen} \theta = m\lambda \quad \text{com } m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Pontos de mínimo} \quad (1)$$

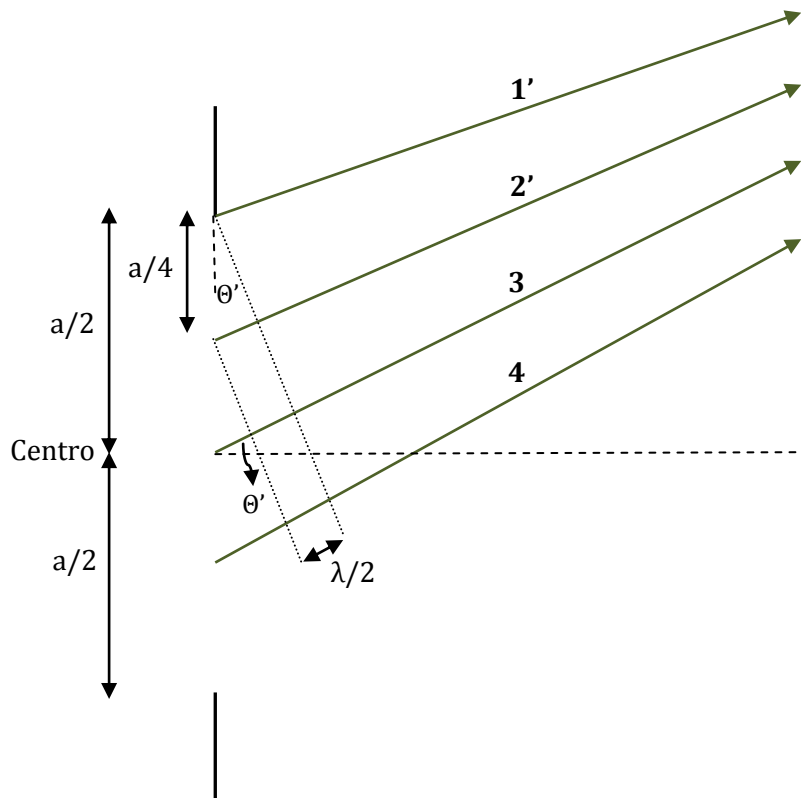


Figura 5- Ilustração de dois pares [(1,2) e (3,4)] de raios luminosos que partem de uma fenda de abertura a e se interferem em um ponto P' do anteparo. A diferença de caminho é indicada por $\lambda/2$.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Como a intensidade de cada máximo varia com a distância do ponto central do anteparo? A curva deitada na Figura 6 é um gráfico de como intensidade dos pontos na difração de fenda única, varia em função do ângulo de abertura θ . Demonstra-se que, sendo I_o a intensidade luminosa no ponto central (o mais brilhante), a intensidade luminosa em uma posição y (tal que $y/D \ll 1$) sobre o anteparo é dada pela função:

$$I = I_o \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

onde

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

(2)

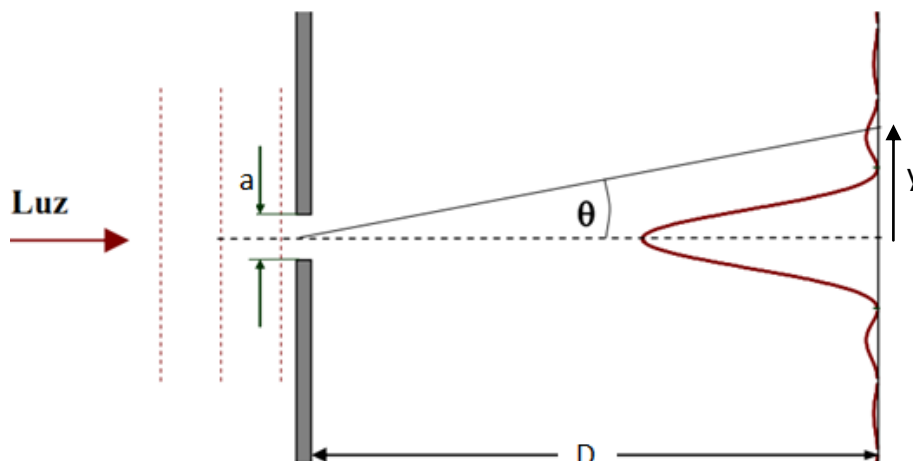


Figura 6- Ilustração da difração da luz por uma fenda de abertura a . A curva ilustra os pontos de máxima e mínima interferência dos raios luminosos em função do ângulo θ . Figura adaptada de Hugo L. Fragnito e Antônio C. Costa.

Como o anteparo está localizado a uma distância D , muito distante da fenda, temos que $\theta \ll 1$ e neste caso $\sin \theta \sim \tan \theta = y/D$. Assim, temos:

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda D} y$$

Os mínimos de intensidade luminosa ocorrem quando $\sin \alpha = 0$, ou seja, quando



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

$$\frac{\pi a}{\lambda D} y_{min} = m\pi$$

Neste caso

$$y_{min} = m \frac{\lambda D}{a} \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

Com a expressão acima, a largura do máximo central é o dobro da largura de qualquer máximo lateral, que então é expresso por

$$\Delta y = \frac{2\lambda D}{a} \quad (4)$$

onde é usado $m = 1$ (1ª ordem de difração)

Parte 2 - Difração por fenda dupla

Considere a situação na Figura 7, onde a abertura a de cada uma das fendas é muito menor do que o comprimento de onda λ da luz incidente nas fendas. Cada raio de luz difratado que emerge da fenda superior irá se interferir, em um ponto P do anteparo, com um raio difratado da fenda inferior, quando a distância entre eles é d .

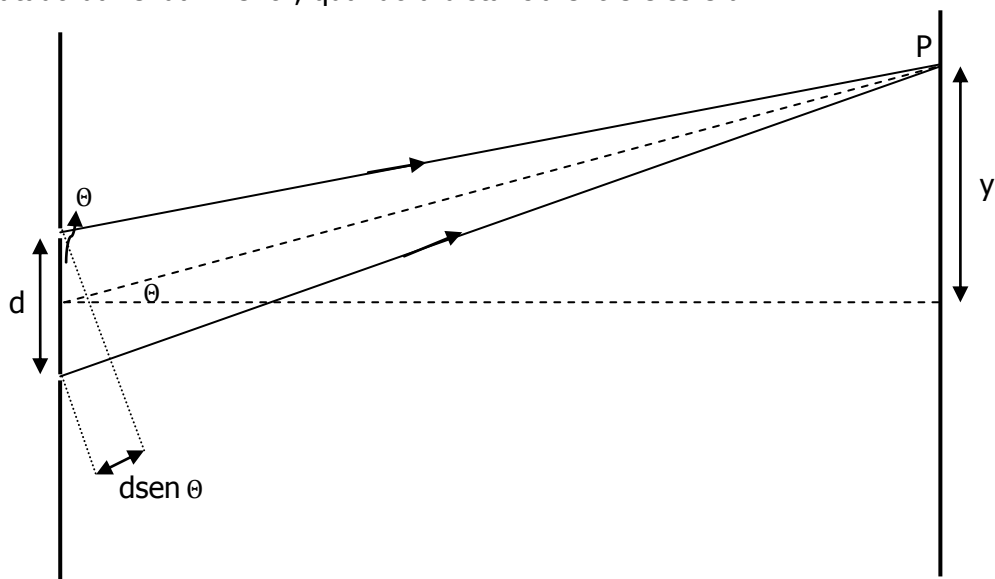


Figura 7- Difração da luz por uma fenda dupla de espaçamento d visto em um anteparo a uma distância D da fenda.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Observa-se na Figura 7 que sendo $d \cdot \sin \theta$ a diferença de caminho percorrido pelos raios da fenda superior e inferior, as seguintes situações para máximo e mínimo de interferência serão observadas:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

Pontos de máximo (5)

$\text{com } m = 1, 2, 3, \dots$

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$$

Pontos de mínimo (6)

$\text{com } m = 1, 2, 3, \dots$

Observa-se experimentalmente que no caso, $a \ll \lambda$, a figura de difração é constituída por pontos de mesma intensidade e igualmente espaçados. Este fato é resultado da interferência da figura de difração de cada fenda, quando cada uma delas ilumina uniformemente o anteparo (se $a \ll \lambda$). A Figura 8 é uma ilustração das franjas de difração produzidas por uma fenda dupla.



Figura 8- Padrão de difração para uma fenda dupla, onde a é da ordem de λ .

A intensidade luminosa em um ponto P do anteparo, localizado a uma distância $D \gg d$, na difração de fenda dupla, quando $a \ll \lambda$, é dado pela expressão

$$I_{\theta} = I_m \cos^2 \beta$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda D} y$$

(7)

A figura de difração é composta por pontos, ou franjas de intensidades uniforme. A intensidade é proporcional ao quadrado do cosseno do parâmetro β (função periódica). Os máximos de difração serão periódicos com a posição y no anteparo, medidas a partir do seu centro.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Os máximos de interferência correspondem à condição $\beta = n\pi$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Substituindo estes valores de β na equação (7) obtém-se a separação ou a largura (Δ) entre máximos (ou mínimos) de interferência consecutiva:

$$\Delta = \frac{\lambda D}{d}$$

Na Figura 9, a curva tracejada (de mesma amplitude) é uma representação da intensidade das franjas de difração na fenda dupla sobre o anteparo. Esta curva teórica está de acordo com a Figura 8 (obtida experimentalmente), para uma difração de fenda dupla. A separação entre as franjas adjacentes (Δ) é constante. Discute-se no próximo parágrafo, a curva sólida na Figura 9.

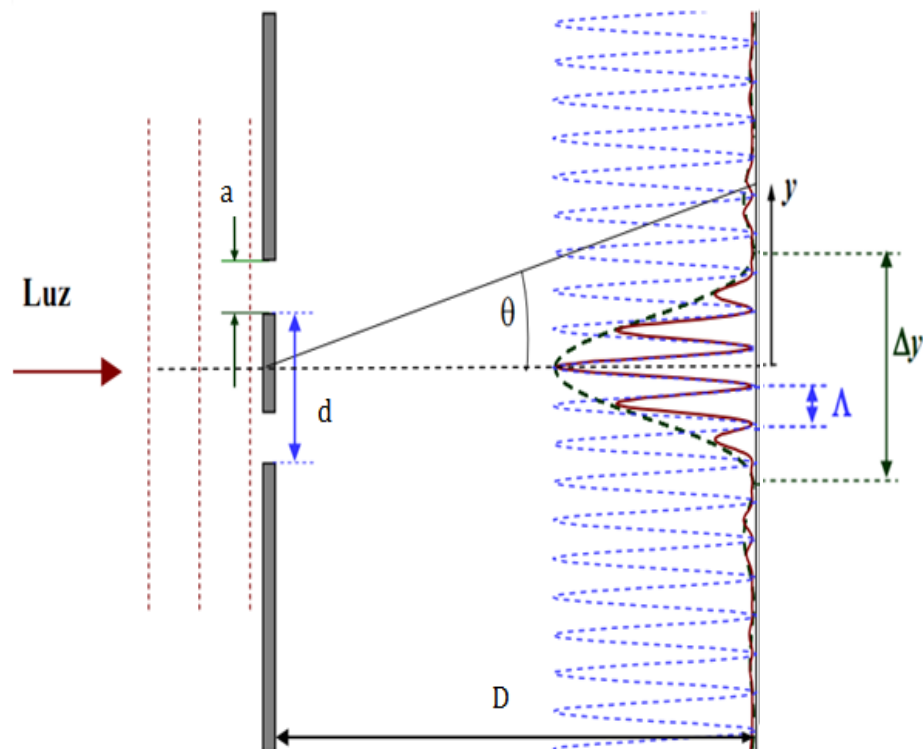


Figura 9 - Ilustração da difração da luz por uma fenda dupla de espaçamento d . A curva em tracejado azul ilustra os pontos de máxima e mínima interferência dos raios luminosos em função do ângulo θ , quando $a \ll \lambda$. A curva em vermelho é a modulação da difração de fenda única na difração de fenda dupla quando a condição $a \ll \lambda$, não é satisfeita. Figura adaptada de Hugo L. Fragnito e Antônio C. Costa.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Na prática, em se tratando da luz visível, a condição $a \ll \lambda$ geralmente não é satisfeita. Para estas franjas relativamente largas, a intensidade das franjas de interferência formada sobre o anteparo, não é uniforme. Quando isto ocorre, a intensidade das franjas é modulada pelo padrão de difração de fenda única (Figura 9). Na ilustração da Figura 9 observa-se este efeito, da abertura a das fendas, sobre a interferência de fenda dupla espaçadas de uma distância d . A curva que descreve a intensidade das franjas em função do ângulo θ é ilustrada nesta figura, através da envoltória tracejada.

A Figura 10(a) é um resultado experimental de uma difração de fenda dupla com a condição $a \ll \lambda$ não é satisfeita. Para comparação, a Figura de difração de uma fenda única é colocada logo embaixo desta [Figura 10(b)].

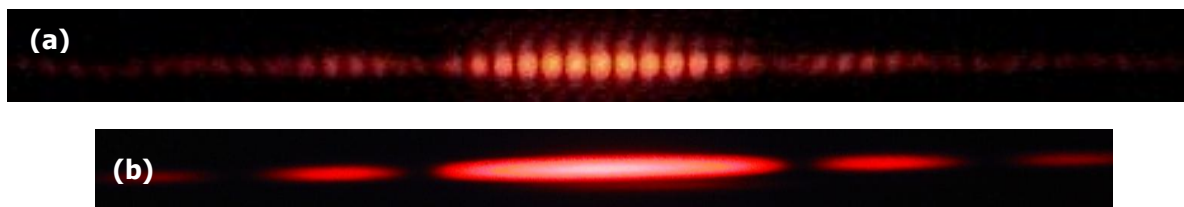


Figura 10 - (a) Padrão de difração para um laser de luz vermelha num sistema de fenda dupla onde a largura da fenda não é desprezível em comparação com o comprimento de onda. (b) padrão de difração de uma única fenda de mesma largura.

Para apenas duas fendas, pode-se mostrar que a intensidade luminosa, sobre um anteparo, onde $D \gg d$, é dada por:

$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 (\cos \beta)^2 \quad (8)$$

onde

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda D} y$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda D} y$$

O termo $(\sin \alpha / \alpha)^2$ é o fator de modulação de uma fenda única e o termo $(\cos \beta)^2$ é devido a difração das duas fendas. As franjas centrais são mais intensas e, a sua largura (distância entre os dois mínimos que a cercam) é dada pela equação (4).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Parte 3 - Difração por fendas múltiplas

Quando o número de fendas é maior que duas fendas, dois fatos importantes são observados experimentalmente: (i) as franjas de difração se tornam mais finas (mais definidas) e (ii) máximos secundários de baixas intensidades aparecem entre as franjas claras. Na Figura 11 observa-se uma porção do padrão de difração para $N = 2$ fendas até $N = 5$ fendas. Não se discute neste experimento, o aparecimento dos máximos secundários, cuja abordagem envolve o método de fasores para o campo elétrico das ondas de luz incidentes no anteparo.

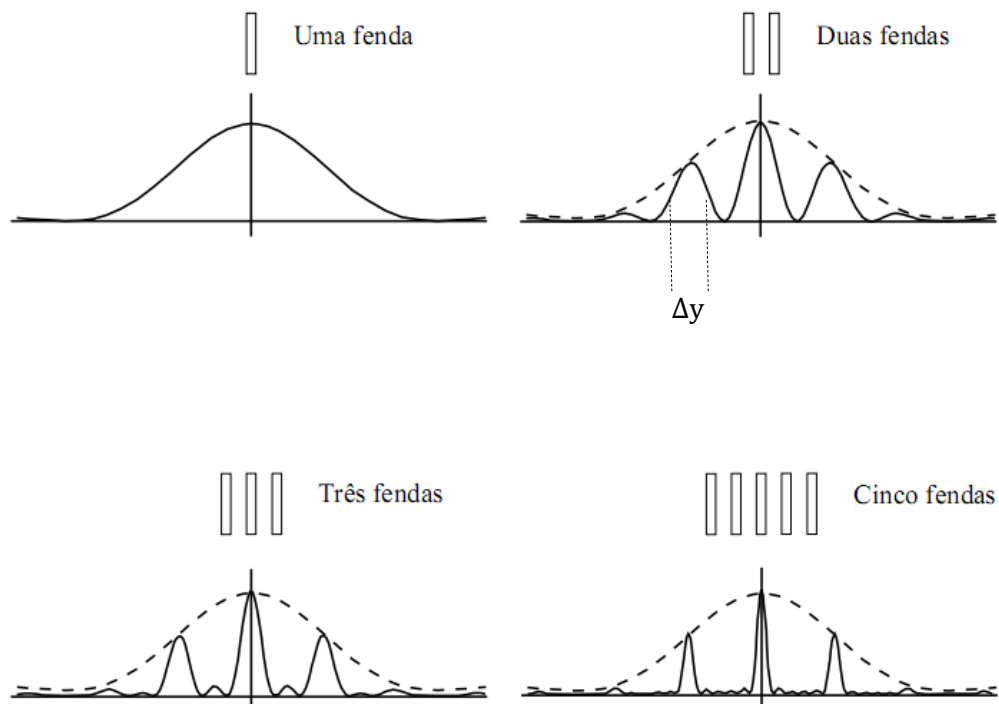


Figura 11 - Ilustração da difração da luz por $N = 1, 2, 3$ e 4 fendas de mesmo espaçamento d . Figura adaptada de N. B. Oliveira.

O número de fendas pode ser tão grande quanto 10^4 fendas. Tal arranjo de fendas múltiplas é chamado de rede de difração. Conforme o número de fendas vai aumentando, para uma distância fixa entre elas, o número de máximos secundários também aumenta mais seu brilho diminui; por outro lado, os máximos principais se tornam mais destacados, pois vão se tornando mais estreitos. Para um dado comprimento de onda, o espaçamento entre as franjas é determinado pela distância d entre as fendas, enquanto as intensidades das franjas são determinadas pelos efeitos de difração associados a largura (a) da fenda.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

O valor aproximado da largura de linha à meia altura (Δy) de qualquer máximo é dada pela expressão:

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{Nd} \quad (10)$$

2.3.4 Procedimentos Experimentais

1. Realize a montagem experimental conforme a Figura 12.

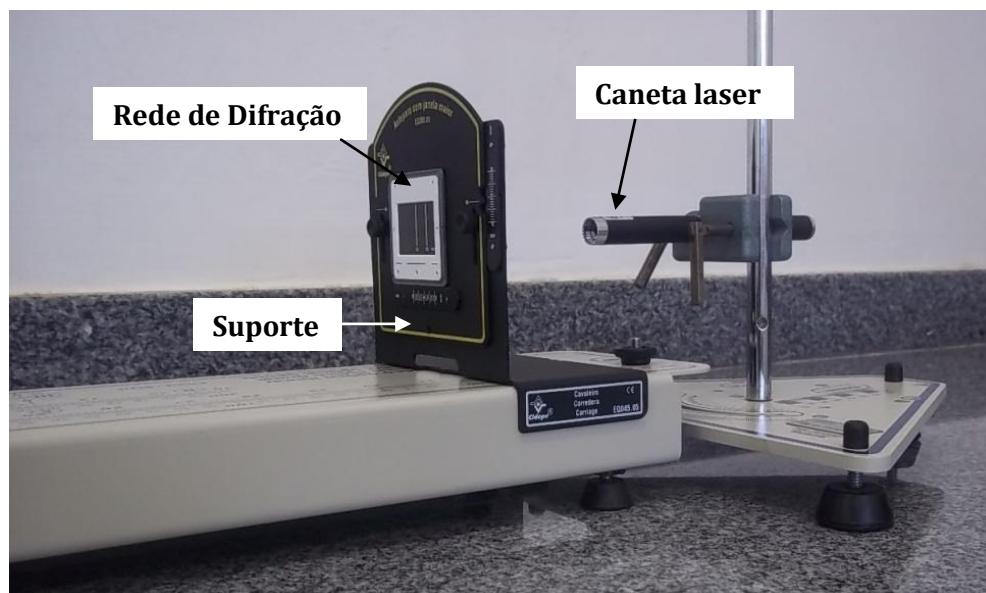


Figura 12 – Montagem experimental para a difração da luz por fendas

2. Para que as medidas sejam feitas da melhor forma possível, a tela com a rede de difração deve ser colocada perpendicularmente ao feixe do laser. Isso pode ser facilmente feito enviando o feixe refletido no vidro novamente para a saída do laser. Isto deve ser feito toda vez que a tela com as fendas forem trocadas.
3. Fixe uma folha de papel com fita adesiva em um anteparo (ou na parede do laboratório). Assim é possível registrar com um lápis o perfil da difração.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Parte 1 - Difração por fenda única

4. Monte o conjunto com o laser, a tela com fenda única e anteparo. Use inicialmente a fenda com abertura **$a = 0,1 \text{ mm}$** . Projete o padrão de difração/interferência sobre o anteparo, tal que os padrões de difração possam ser facilmente observados.
5. Utilize uma trena para medir a distância $D \pm \Delta D$, da tela com fenda única ao anteparo.

$D \pm \Delta D =$

6. Desenhe cuidadosamente sobre a folha no anteparo, a lápis, o padrão de difração, indicando claramente as posições dos máximos e mínimos. Meça com uma régua a largura $\Delta y_1 \pm \delta(\Delta y_1)$ do máximo central. Anote esta medida na Tabela 1.

Tabela 1 – Largura dos máximos centrais para a tela com fenda única de abertura variável.

$a_1 = 0,1 \text{ mm}$	$\Delta y_1 \pm \delta(\Delta y_1) =$
$a_2 = 0,2 \text{ mm}$	$\Delta y_2 \pm \delta(\Delta y_2) =$
$a_3 = 0,3 \text{ mm}$	$\Delta y_3 \pm \delta(\Delta y_3) =$

7. Deslize a tela com a rede de difração sobre o suporte, tal que a abertura da fenda seja de **$a = 0,2 \text{ mm}$** . Suba cerca de 3 cm a folha de papel sobre o anteparo. Repita o item 5. Anote os dados na Tabela 1. Faça o mesmo para a abertura **$a = 0,3 \text{ mm}$** .
8. Comente no espaço abaixo: (i) as mudanças observadas no padrão de difração, quando a abertura (**a**) da fenda única é aumentada e, (ii) a relação entre o máximo central e os padrões de difração secundários. No caso (ii), você deverá realizar medidas da largura do máximo central e os padrões de difração secundários.

Comentários:



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

9. Para cada linha da Tabela 1, calcule o comprimento de onda do laser utilizado ($\lambda \pm \Delta \lambda$). Obtenha o valor médio com seu respectivo desvio padrão.

Parte 2 - Difração por fenda dupla

1. Substitua a tela de fenda única por uma que possui fendas duplas, separadas pelas distâncias de **$d = 0,2, 0,4$ e $0,6$ mm**. A abertura (**a**) das fendas é constante.
2. Antes de iniciarmos as medidas, deslize sobre o suporte, a tela com fenda dupla, aumentando continuamente a distância entre as aberturas até **$d = 0,6$ mm**. Para cada separação, desenhe cuidadosamente sobre a folha no anteparo, a lápis, o padrão de difração, indicando claramente as posições dos máximos e mínimos. Faça comentários a respeito dos padrões de difração, incluindo:

a) O que é modificado com relação ao experimento anterior ?

b) Padrão com separação $d = 0,2$ mm

c) Padrão com separação $d = 0,4$ mm

d) Padrão com separação $d = 0,6$ mm

e) A largura do máximo central se modifica ? Explique.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3. Use a fenda dupla com separação **$d = 0,6 \text{ mm}$** . Meça a largura do máximo central (distância entre os mínimos que cercam as franjas centrais) e calcule a abertura **$a \pm \Delta a$** das fendas. Anote o resultado no espaço abaixo. Utilize para isto o comprimento de onda da luz vermelha do laser e a distância $D \pm \Delta D$, entre o anteparo e a tela com as fendas duplas.

$a \pm \Delta a =$

4. Tome agora, a distância (Λ) entre 4 franjas à esquerda e 4 franjas à direita da franja central. Obtenha uma média destas distâncias. Obtenha também o desvio padrão, que servirá como incerteza nestas distâncias. Anote os dados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores medidos da distância entre franjas adjacentes.

Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ_5	Λ_6	Λ_7	Λ_8	$\Lambda_{\text{médio}}$	$\delta\Lambda$

5. De posse do valor de $\Lambda_{\text{médio}} \pm \delta\Lambda$ e, o comprimento de onda $\lambda = (532 \pm 10) \times 10^{-9} \text{ m}$ da luz laser, faça um cálculo da distância entre o anteparo e a tela com as fendas duplas. Este valor coincide, dentro da faixa de incertezas com o valor medido de $D \pm \Delta D$?

Parte 3 - Difração por fendas múltiplas

1. Substitua o conjunto de fendas duplas pelo conjunto com fendas múltiplas. Mova a tela para a esquerda, aumentando o número de fendas, desde $N = 2$ até $N = 5$ fendas. Observe as mudanças que ocorrem no padrão de difração. Descreva suas observações no espaço abaixo e explique em seu relatório.

2. De acordo com a Figura 13, substitua o laser pela lanterna com luz branca. Tome agora a tela com a rede de difração (1000 fendas por milímetro). Ligue a lanterna e

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO

Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

observe o padrão de difração sobre o anteparo, que deve estar agora, bem mais próximo da rede de difração.



Figura 13 – Montagem experimental para a difração da luz branca

3. Você deverá observar uma luz branca no centro e a partir desta as cores do arco-íris na sequência: violeta, anil, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. Explique em seu relatório esta sequência de cores sobre o anteparo, baseado nos comprimentos de onda de cada componente da luz branca.

2.3.4 O que incluir no relatório do experimento

Parte 1 - Difração por fenda única

- Desenho sobre o papel das figuras de difração.
- Todos os comentários do tópico 8, da parte 1.
- Cálculos dos comprimentos de onda da luz laser incluindo o valor médio e seu desvio padrão.

Parte 2 - Difração por fenda dupla

- Todos os comentários do item 2, da parte 2.
- Cálculo da abertura a $\pm \Delta a$ das fendas.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

- Cálculo da distância $D \pm \Delta D$ que separa o anteparo da tela com as fendas.

Parte 3 - Difração por fendas múltiplas

- Mudanças observadas quando o número de fendas aumenta de $N = 2$ a 5 fendas.
- Explicação do padrão de cores e suas posições sobre o anteparo quando é realizado a difração da luz branca.

2.3.5 Bibliografia

Difração da luz por fendas Hugo L. Fragnito e Antonio C. Costa. Unicamp – IFGW, Março de 2010.

Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de Janeiro RJ (1996).

Ótica, Relatividade e Física Quântica. Moysés Nussenzveig. 4ª edição. Editora Blucher, São Paulo SP (2011).