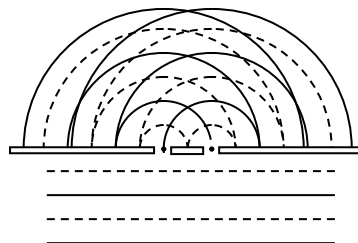


## T7 - Interferência e Difracção

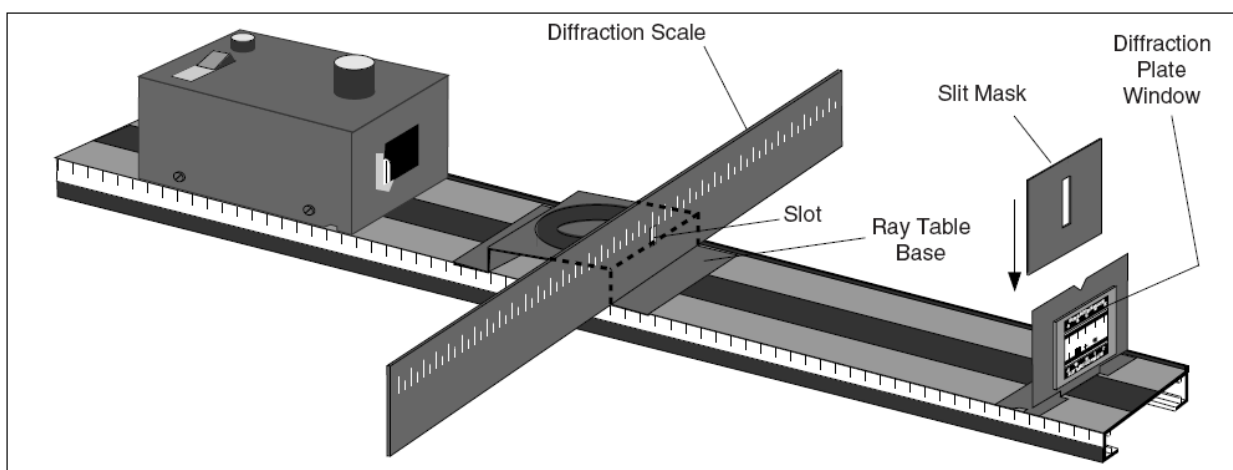
### Parte 1 - Introdução<sup>1</sup>

#### 1. Padrão de interferência produzido por duas fendas

Para produzir interferência são necessárias duas fontes coerentes. Esta situação é conseguida interpondo um obstáculo com duas fendas a uma distância razoável de uma fonte de luz, de forma a garantir que as frentes de onda da luz que incidem nas fendas, é aproximadamente plana (ver figura).

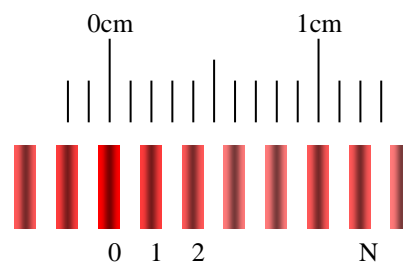


**A.** Realize a montagem mostrada na figura.



Alinhe o filamento da lâmpada com o orifício na régua (slot) e com a máscara (slit mask). Coloque a **fenda D** (diffraction plate window) que corresponde a duas fendas de  $b=0.04\text{mm}$  de espessura separadas de  $a=0.125\text{mm}$ .

Olhe através da fenda de forma a ver em simultâneo o padrão de interferência e a escala da régua (diffraction scale), como mostra a figura ao lado.



<sup>1</sup> Versão reduzida do original adaptado por Vicente Fonseca do manual do kit OS-8500 da PASCO  
O manual pode ser obtido em:  
[http://store.pasco.com/pascostore/showdet1.cfm?&DID=9&Product\\_ID=1552&page=Manuals](http://store.pasco.com/pascostore/showdet1.cfm?&DID=9&Product_ID=1552&page=Manuals).

Anote a distância  $L$  entre a escala (diffraction scale) e a fenda (diffraction plate window).

Para cada filtro de cor (azul, verde e vermelho):

- Alinhe a risca de interferência central com o zero da escala e conte  $N$  franjas de máxima intensidade.
- Anote o número de franjas ( $N$ ) e a posição correspondente na escala ( $X$ ). Nota: na figura ao lado, seria  $N=6$  e  $X=1.2\text{cm}$ .
- Calcule o comprimento de onda da luz:  $\lambda = \frac{a}{N} \cdot \frac{X}{L}$ .

O comprimento de onda que obteve para a luz azul foi o esperado? E para a luz verde? E para a luz vermelha?

**B. A fenda E** (diffraction plate window) corresponde a duas fendas de  $b=0.04\text{mm}$  de espessura separadas de  $a=0.25\text{mm}$ .

Se usasse esta fenda em vez da fenda D, que alteração notaria no padrão de interferência?

Confirme experimentalmente a sua previsão.

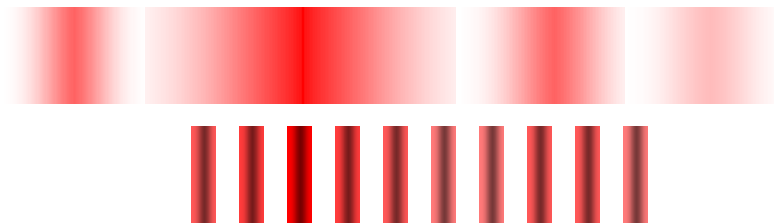
## 2. Padrão de difracção produzido por uma fenda

As franjas de interferência observadas na experiência anterior, para além do padrão claro-escuro, tinham também um padrão de intensidade: as riscas centrais eram mais brilhantes, depois tornavam-se mais ténues e outra vez mais brilhantes repetidamente à medida que nos afastamos da risca central. Esse padrão deve-se ao facto das fendas terem uma certa espessura ( $b=0.04\text{mm}$ ).

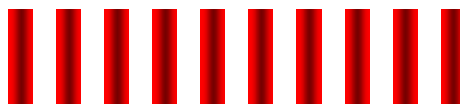
**C.** Observe o padrão das três fendas simples: A ( $b=0.04\text{mm}$ ), B ( $b=0.08\text{mm}$ ) e C ( $b=0.16\text{mm}$ ). Nesta experiência use apenas o filtro vermelho.

Com a **fenda A**, que tem a mesma espessura das fendas D que usou no ponto 1, o padrão de intensidade tem um espaçamento igual ao padrão de intensidade das franjas produzidas pela fenda D?

Nota: deve observar que os dois padrões estão relacionados como mostra a figura seguinte:



Se as fendas fossem muito mais finas, o padrão de difracção seria muito mais largo e ver-se-ia o seguinte padrão com uma dupla fenda:



**D.** As suas observações dos padrões das fendas simples A, B e C concordam com a previsão feita na nota do ponto anterior para o padrão de franjas geradas por duas fendas supostas extremamente finas? Justifique.

## **Parte 2 - Determinação do Comprimento de Onda de Uma Radiação - Dupla Fenda de Young**

Pretende-se realizar a experiência clássica de Thomas Young e utilizar o padrão de interferência de duas fontes pontuais para estimar o comprimento de onda da radiação de um laser de He-Ne.

Para além disso, este trabalho pretende ilustrar de um modo qualitativo o padrão de difracção da fenda simples e de uma dupla fenda. Finalmente, pretende-se ainda ilustrar de que modo o padrão de difracção de múltiplas fendas em transmissão pode ser utilizado na determinação do comprimento de onda de radiação monocromática.

### **1. Introdução**

À interacção entre duas ou mais ondas electromagnéticas que faz com que a irradiância num determinado ponto do espaço seja diferente da soma das irradiâncias nesse ponto devidas a cada fonte de radiação considerada isoladamente chama-se interferência óptica.

#### **1.1. Experiência da dupla fenda de Thomas Young**

Um dos arranjos geométricos mais simples em que a interferência da radiação é evidente deve-se a Thomas Young que, nas suas experiências, provou conclusivamente em 1803 que a luz apresentava características ondulatórias. Esse arranjo está esquematizado na Figura 1.

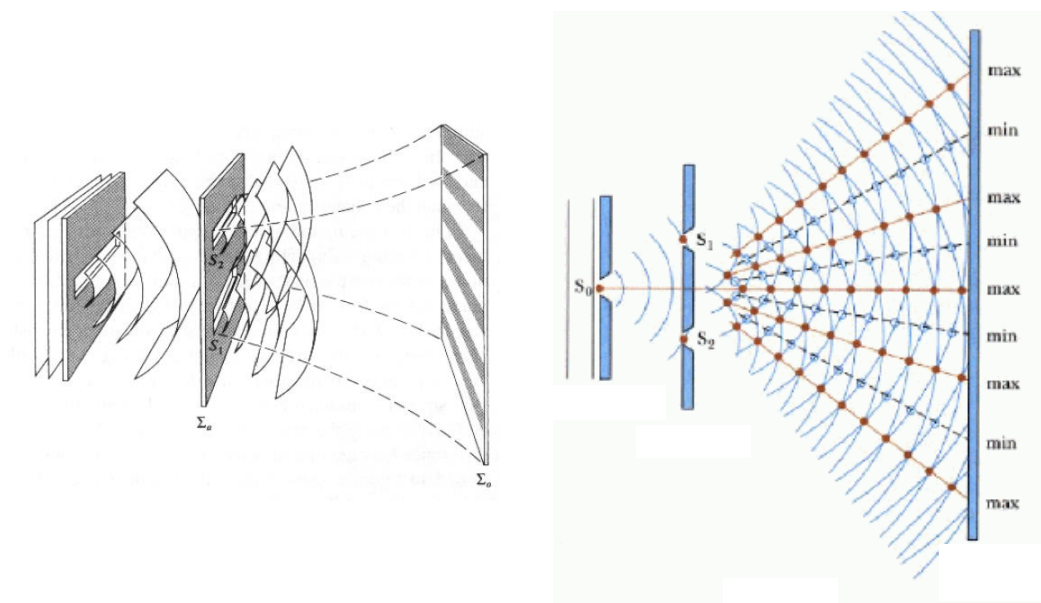


Figura 1: Experiência de Young com zonas de interferência construtiva e destrutiva.

As fontes  $S_1$  e  $S_2$  (duas fendas estreitas) funcionam como fontes de radiação monocromática coerentes (mantêm a diferença de fase relativa constante ao longo do tempo) que dão origem a um padrão de franjas de interferência alternadamente claras (interferência construtiva) e escuras (interferência destrutiva). Ao longo das direcções em que as ondas devidas a  $S_1$  e a  $S_2$  chegam com o mesmo estado de oscilação (linhas a cheio) há reforço da irradiância e resulta um máximo da intensidade; ao contrário, nas regiões em que, por exemplo, uma onda chega num máximo (linhas a cheio) enquanto a outra chega num mínimo (linhas a tracejado) há um mínimo de intensidade. Deste modo, se colocarmos um alvo em frente das duas fontes há formação de um padrão de interferência.

Na Figura 2 mostra-se o arranjo geométrico utilizado na experiência de Young onde se podem identificar os parâmetros relevantes para a interpretação do padrão de interferência:  $a$  distância entre as duas fontes coerentes,  $s$  distância dupla fenda - alvo e  $y$  distância no alvo medida na perpendicular à orientação das fendas.

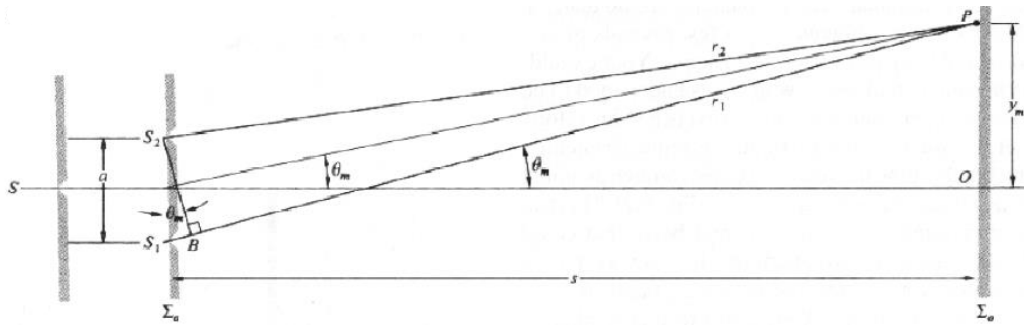


Figura 2: Geometria da experiência de Young.

Se as duas fontes  $S_1$  e  $S_2$  da mesma frequência forem consideradas pontuais e se tiverem a mesma intensidade o padrão de interferência pode ser descrito pela equação:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

onde  $\delta$  é a diferença de fase relativa e  $I_0$  a intensidade devida a cada uma das fontes considerada isoladamente. Verifica-se assim que a intensidade varia entre um valor mínimo de zero e um valor máximo de  $4I_0$ .

Nas condições em que a experiência é realizada a distância dupla fenda - alvo é muito maior que a distância  $a$  entre fendas o que permite transformar a equação anterior em:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right) \quad (2)$$

e finalmente em:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi a y}{\lambda s}\right) \quad (3)$$

As posições em que surgem os máximos e os mínimos de interferência são dadas por:

$$\begin{cases} y_{\max} = m \frac{\lambda s}{a} \\ y_{\min} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda s}{a} \end{cases} \quad (4)$$

em que  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Daqui se pode concluir que a separação entre máximos ou mínimos consecutivos ( $\Delta y$ ) é constante e dada por:

$$\Delta y = \frac{\lambda s}{a} \quad (5)$$

ou seja, sabendo as distâncias  $a$  e  $s$  estamos habilitados a calcular o comprimento de onda da radiação.

### 1.2. Padrões de difracção da fenda simples e dupla

A aproximação envolvida na secção anterior de considerar as fontes pontuais é uma abstracção matemática pois, em rigor, as fendas têm uma largura não nula. A dupla fenda deverá ser descrita então pela Figura 3 onde, além da distância entre fendas  $a$ , se identifica a distância  $b$ , largura de cada uma das fendas.

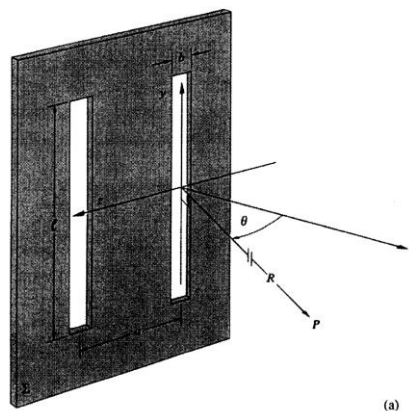


Figura 3: Geometria da dupla fenda.

Quando a radiação encontra no seu percurso as fendas da Figura 3 ocorre uma perturbação da frente de onda e, os vários segmentos da frente de onda que se propagam para além do obstáculo interferem dando origem a uma distribuição de densidade de energia conhecida por padrão de difracção. No caso de o alvo se encontrar suficientemente afastado das fendas (como na experiência a realizar) o tratamento geral da difracção é simplificado obtendo-se aquilo que é conhecido como aproximação de Fraunhofer ou do campo longínquo.

Se a radiação passar através de apenas uma das fendas, o padrão de difracção é dado por:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (6)$$

com  $\beta = \left( \frac{\pi b}{\lambda} \right) \sin \theta$  e onde o ângulo  $\theta$  se encontra definido na Figura 3.

A equação (6) encontra-se representada na Figura 4 em função do ângulo  $\theta$ .

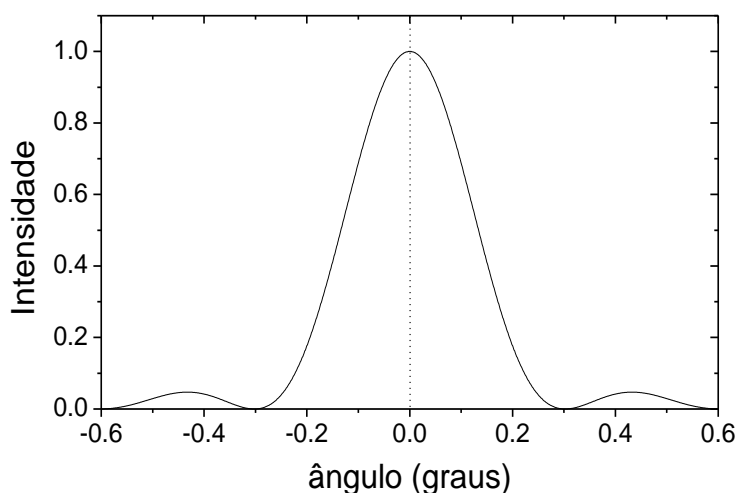


Figura 4: Padrão de difracção da fenda simples.

$$(\lambda = 633 \text{ nm}, b = 0.12 \text{ mm})$$



Se agora fizermos incidir a radiação em simultâneo nas duas fendas obtém-se o padrão de difracção da dupla fenda:

$$I = 4I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha \quad (7)$$

com  $\alpha = \left( \frac{\pi a}{\lambda} \right) \sin \theta$ . Repare-se que o termo que possui  $\beta$  é comum à equação que descreve o padrão de difracção da fenda simples razão pela qual se diz que se tem um termo de interferência entre as fendas de  $\cos^2 \alpha$  modulado pelo termo de difracção da fenda simples  $\left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$  com a mesma largura  $b$ . Na Figura 5 mostra-se o padrão da

dupla fenda em simultâneo com o termo  $\left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$  para mostrar que a distribuição de intensidades é limitada pelo termo da difracção. Devido a isto, para certos valores da razão  $a/b$ , a um mesmo valor do ângulo  $\theta$  pode corresponder um máximo do termo de interferência e um mínimo do termo de difracção. Nessa posição do espaço não existe luz para participar no processo de interferência e ao pico assim suprimido chama-se uma ordem (de interferência) ausente.

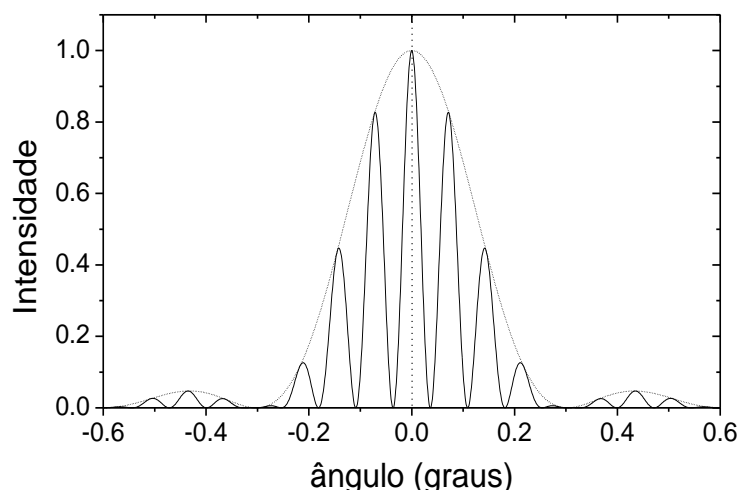


Figura 5: Padrão de difracção da dupla fenda.

( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $a = 0.5 \text{ mm}$ ,  $b = 0.12 \text{ mm}$ )

No limite das fendas infinitamente estreitas:

$$\lim_{\substack{b \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 = 1$$

obtendo-se a equação (2) correspondendo à interferência “pura”.

### 1.3. Padrão de difracção da múltipla fenda

Se em vez de duas fendas a radiação encontrar no seu percurso um obstáculo constituído por  $N$  fendas de largura  $b$  e espaçadas de  $a$  entre si, o padrão de difracção resultante é:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left( \frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \quad (8)$$

expressão que contém como casos particulares a fenda simples ( $N = 1$ ) e a dupla fenda ( $N = 2$ ). Na Figura 6 mostra-se o padrão de interferência obtido no caso de 10 fendas.

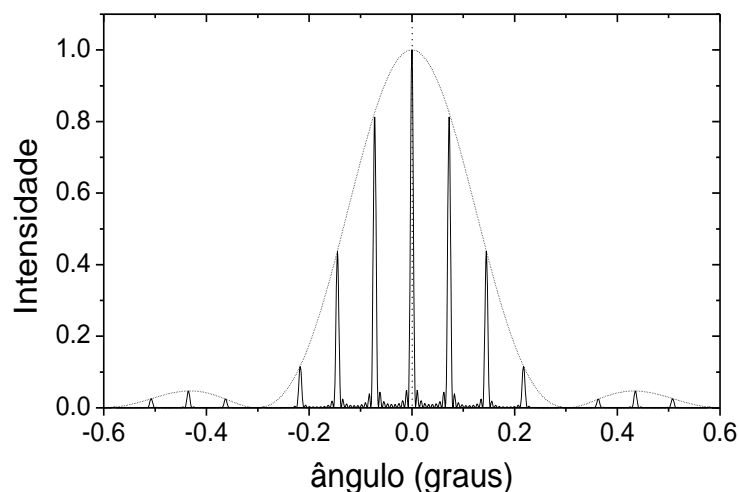


Figura 6: Padrão de difracção de uma múltipla fenda constituída por 10 fendas

$$(\lambda = 633 \text{ nm}, a = 0.5 \text{ mm}, b = 0.12 \text{ mm})$$

Neste caso cada fenda gera a mesma distribuição de densidade de fluxo e da múltipla interferência do padrão de difracção de cada fenda resulta a figura de interferência final. Esta é modulada pelo envelope da difracção da fenda simples e tem máximos principais nas regiões do espaço onde se verificar:

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad (9)$$

Se o alvo estiver suficientemente afastado da múltipla fenda é válida a aproximação  $\sin \theta_m \approx y_{\max}/s$ , obtendo-se então a expressão para os máximos da experiência ideal de Young da equação (4). Quer isto dizer que a localização dos máximos principais de interferência no caso de uma múltipla fenda em transmissão é constante e independente do valor de  $N \geq 2$  o que aliás se pode facilmente ver pela comparação das Figuras 4 a 6.

## **2. Procedimento experimental**

### **2.1. Material**

- Laser de He-Ne
- Fendas
- Calha óptica com os respectivos suportes
- Régua e fita métrica

### **2.2. Descrição do procedimento experimental**

#### **2.2.1. Padrões de difracção das fendas simples e dupla**

Deverá observar qualitativamente os padrões de difracção das fendas simples e dupla. Comece por verificar se o feixe laser passa através das duas fendas aproximadamente com a mesma intensidade.

Assegure-se que compreende a razão pela qual existem ordens de interferência "ausentes", no padrão de difracção da dupla fenda.

### 2.2.2. Cálculo de $\lambda$ a partir da difracção da dupla fenda

No cálculo do comprimento de onda do laser a partir do padrão de interferência da dupla fenda deverá medir a diferença entre mínimos de intensidade. O cálculo do comprimento de onda é feito com base na equação (5); como a distância entre mínimos consecutivos ( $\Delta y$ ) é muito pequena e, para reduzir o erro, a equação (5) pode ser reescrita na forma:

$$\lambda = \frac{\Delta y_m a}{m s}$$

onde  $\Delta y_m$  é agora a separação entre  $m + 1$  máximos ou mínimos (a medida directa).

Meça então a diferença entre mínimos de intensidade correspondentes a cerca de 15 a 25 franjas escuras. Deverá fazer o maior número possível de medidas independentes aproximadamente centradas em relação ao alvo (cerca de 7). Calcule um valor do comprimento de onda para cada medida e só depois o valor médio do comprimento de onda.

### 2.2.3. Cálculo de $\lambda$ a partir da difracção da múltipla fenda

O cálculo do comprimento de onda do laser a partir do padrão de interferência das múltiplas fendas é análogo ao feito para a dupla fenda. Agora deverá medir a diferença entre máximos de intensidade correspondentes a cerca de 8 a 18 franjas. Deverá fazer o maior número possível de medidas independentes aproximadamente centradas em relação ao alvo.

### 2.2.4. Determinação da espessura de um cabelo

De acordo com o princípio de Babinet, o padrão de difracção observado com um obstáculo é idêntico ao que seria produzido por uma fenda de largura igual à do obstáculo.

Com base no princípio enunciado e nos pontos anteriores, execute as medições necessárias à determinação da espessura de um cabelo.

## 3. Resultados e cálculos

Faça um registo das medições experimentais directas e efectue os cálculos necessários ao preenchimento das tabelas que se seguem tendo em conta as seguintes observações.

Efectue o cálculo do erro associado ao comprimento de onda para os resultados obtidos com a dupla fenda admitindo como estimadores razoáveis dos erros associados às medidas directas os seguintes valores:

Parâmetro	Estimativa do erro
$\Delta y_m$	1 mm
$s$	10 mm

O padrão de difracção da dupla fenda na aproximação de Fraunhofer é dado pela equação (7) com os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  tendo o significado usual. Note que  $\alpha$  e  $\beta$  são funções do ângulo  $\theta$  e que este pode ser escrito como:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{s}\right)$$

Represente graficamente as contribuições para  $I(\theta)/4I_0$  devidas ao termo de interferência e ao termo de difracção (isoladamente e depois em conjunto) para os valores de distância entre fendas e largura de cada fenda fornecidos pelo fabricante em função da

distância  $y$  no alvo (primeiro de  $-12.5\text{ cm}$  até  $12.5\text{ cm}$  e depois apenas os  $10\text{ cm}$  centrais). Relacione este gráfico com o padrão experimental que observou e justifique as ordens "ausentes".

Na representação gráfica deverá utilizar os valores teóricos do comprimento de onda e dos parâmetros  $a$  e  $b$ .

• Dados:

Espaçamento e largura das fendas:

-  $a = 0.1\text{ mm}$

-  $b = 0.05\text{ mm}$

Laser de He-Ne:  $\lambda = 632.8\text{ nm}$

## T8 - Parte 2 - Determinação do Comprimento de Onda de Uma Radiação - Dupla Fenda de Young

Distância entre fendas:

Cálculo de  $\lambda$  a partir da difracção da dupla fenda:

Resultado final:  $\bar{\lambda} \pm \delta\bar{\lambda} =$

Valor esperado:  $\lambda_{teor} =$

Percentagem de erro em relação ao valor esperado:

Comentário:

Distância fenda - alvo:  $s =$

$\delta s =$

$m$	$\Delta y_m$	$\lambda$	$\delta\lambda$
$\delta(\Delta y_m) =$		$\bar{\lambda} =$	$\delta\bar{\lambda} =$

Equações: Cálculo de  $\lambda$ :

Cálculo de  $\delta\lambda$ :

Cálculo de  $\lambda$  a partir da difracção da múltipla fenda:

Resultado final:  $\bar{\lambda} \pm \delta\bar{\lambda} =$

Valor esperado:  $\lambda_{teor} =$

Percentagem de erro em relação ao valor esperado:

Comentário:

Distância fenda - alvo:  $s =$

$m$	$\Delta y_m$	$\lambda$
		$\bar{\lambda} =$

Cálculo de  $\lambda$ :

**Resultados finais:**

Valor esperado:  $\lambda_{teor} =$

Fenda	$\lambda$	% de Erro
dupla		
múltipla		

**Cálculo da espessura de um cabelo:**

**Análise criticamente todos os resultados obtidos.**

### Gráficos

Inclua uma folha com os gráficos pedidos no ponto 3 e responda **sucintamente** às seguintes questões.

**Questões:**

- Qual a relação entre os padrões de difracção da dupla fenda e de uma fenda simples equivalente?
- Relacione os gráficos com o padrão observado experimentalmente para a dupla fenda.
- Justifique a existência de ordens de interferência "ausentes".