

# Estudo de Fenómenos de Interferência Ótica

Miguel Paço

UP201805236

Departamento de Física e Astronomia- FCUP

Laboratórios de Física 3

Novembro 2020

## Contents

1	Introdução	3
1.1	Interferência . . . . .	3
1.2	Difração . . . . .	3
2	Interferómetro de Michelson	4
2.1	Determinação do índice de refração do ar . . . . .	4
2.2	Determinação do índice de refração do vidro . . . . .	5
3	Difração	6
3.1	Padrão de Difração por uma fenda . . . . .	6
3.2	Padrão de Difração de um fio . . . . .	7
3.3	Padrão de Difração de uma Abertura Circular . . . . .	7
4	Objetivos	8
5	Procedimento Experimental	8
5.1	Determinação do índice de refração do ar . . . . .	8
5.2	Determinação do índice de refração do vidro . . . . .	9
5.3	Determinação da abertura de uma fenda linear . . . . .	9
5.4	Determinação do diâmetro de um fio . . . . .	10
5.5	Determinação do diâmetro de um orifício circular . . . . .	10
6	Análise de Dados	10
6.1	Índice de refração do ar . . . . .	10
6.2	Índice de refração do vidro . . . . .	12
6.3	Determinação da abertura de uma fenda linear . . . . .	12
6.4	Determinação do diâmetro de um fio . . . . .	13
6.5	Determinação do diâmetro de um orifício circular . . . . .	13
7	Resultados finais e conclusão	14
8	Anexo	14

# 1 Introdução

## 1.1 Interferência

Nesta atividade experimental vamos estudar fenômenos óticos, mais especificamente a interferência usando o Interferômetro de Michelson e a difração. A interferência é um fenômeno muito comum, ocorrendo sempre que temos a sobreposição de duas ondas, podendo estas ser mecânicas, eletromagnéticas, quânticas ou gravitacionais. Nesta atividade é estudada a interferência de ondas eletromagnéticas, que correspondem à propagação no espaço de oscilações de um campo elétrico e de um campo magnético, descritas inteiramente pelas Equações de Maxwell. Nos casos mais simples (e no caso desta atividade) essas ondas são planas (amplitude e fase constantes em planos normais à direção de propagação), monocromáticas (onda periódica sinusoidal no tempo) e com polarização linear (o vetor do campo elétrico tem orientação constante). Uma destas ondas tem como expressão geral:

$$\vec{E} = E_y(x, t)\hat{j} = E_{0y}\hat{j} \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (1)$$

Sendo  $E_{0y}$  a amplitude da onda,  $\omega$  a frequência angular,  $k$  o número de onda e  $\phi$  a fase inicial.

Em meios isotrópicos a velocidade da onda é dada por

$$v = \frac{c}{n} \quad (2)$$

Sendo  $n$  o índice de refração do meio e  $c$  a velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ )

## 1.2 Difração

Quando uma onda de qualquer tipo encontra um obstáculo pode haver alteração da fase ou amplitude da frente de onda por causa da interação da onda com estes. Instrumentos óticos só utilizam parte da frente de onda incidente, o que leva a que estes fenômenos de difração sejam muito importantes para analisar o desempenho dos equipamentos que incluem lentes, diafragmas, fendas e espelhos por exemplo. A difração pode ser compreendida através do Princípio de Huygens-Fresnel, que nos diz:

”Cada ponto de uma frente de onda não obstruída constitui, em qualquer instante, uma fonte de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária); a amplitude do campo ótico em qualquer ponto do espaço resulta da sobreposição de todas essas ondas (tendo em conta as suas amplitudes e fases relativas)”

A fundamentação teórica deste princípio surge com o '*Integral de Difração de Kirchhoff*' que mesmo sendo uma aproximação proporciona resultados próximos da realidade. O problema de obter de modo rigoroso o padrão de difração de uma configuração é em geral muito complexo, pelo que estes mecanismos de aproximação são os mais apropriados que há

## 2 Interferômetro de Michelson

Nesta atividade experimental, todas as partes relacionadas com Interferência da luz serão feitas com uso do Interferômetro de Michelson. Neste temos uma fonte luminosa que se propaga em direção a um divisor de onda. Este divide a amplitude da onda gerando duas ondas que se propagam perpendicularmente. São depois ambas refletidas em espelhos e regressam ao divisor. Ao passar por este uma parte de ambas as ondas é refletida em direção ao detetor, no qual vai ser possível observar interferência devido à sobreposição das duas ondas. O funcionamento está ilustrado na figura abaixo:

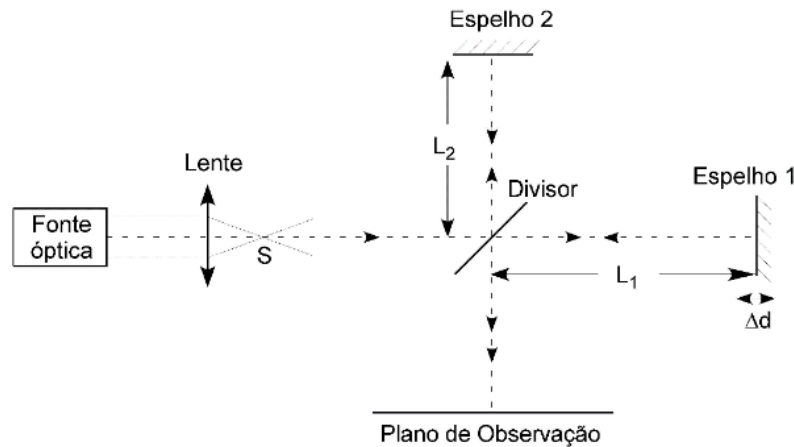


Figure 1: Esquema do Interferômetro. O espelho 1 pode ser deslocado no seu braço

### 2.1 Determinação do índice de refração do ar

É possível observar interferência pois ambas as ondas vêm da mesma fonte e o seu percurso não difere muito em termos de tempo de propagação. Admitindo que ambas as ondas têm a mesma fase inicial, sabemos que ao chegar ao detetor as ondas vão ter uma diferença de fase dada por:

$$\delta = \frac{4\pi n_a}{\lambda_0} \Delta L \quad (3)$$

Em que  $\Delta L$  é dado por  $(L_1 - L_2)$ , em que  $L_1$  é a distância do divisor ao espelho 1 e  $L_2$  a distância do divisor ao espelho 2,  $n_a$  é o índice de refração (neste caso do ar) e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda emitido na fonte luminosa.

Se no centro do padrão de interferência tivermos um máximo a diferença de fase é um múltiplo par de  $2\pi$ , se tivermos um mínimo então a diferença de fase é um múltiplo ímpar de  $2\pi$ . A passagem de um máximo adjacente para outro máximo adjacente corresponde a uma variação de fase de  $2\pi$ , que leva à variação da posição do espelho 1 de  $\Delta d|_{2\pi} = \frac{\lambda_0}{2n_a}$ . Pode-se obter então o índice de refração do ar da seguinte forma:

$$2\pi = \frac{4\pi n_a}{\lambda_0} \Delta d|_{2\pi} \rightarrow n_a = \frac{\lambda_0}{2\Delta d|_{2\pi}} \quad (4)$$

Sendo esta relação para uma passagem entre máximos adjacentes, mas se quisermos determinar a partir de um número  $N$  de passagens temos então:

$$n_a = \frac{N\lambda_0}{2\Delta|_N} \quad (5)$$

E vamos utilizar isto para determinar o índice de refração do ar.

## 2.2 Determinação do índice de refração do vidro

No interferómetro é possível colocar entre o divisor e o Espelho 1 uma lâmina de vidro paralela ao espelho, para que ao rodar o vidro o caminho ótico da luz dentro deste seja alterado. Sendo  $i$  o ângulo de incidência da luz na lâmina e  $h$  a espessura da mesma, obtém se que a diferença de caminho em função da espessura do vidro e do ângulo de refração é

$$\Delta D_v = \frac{h}{2} \left( \frac{n_a}{n_v} \right)^2 \sin^2 i \quad (6)$$

O que leva a um número  $N$  de alternâncias *claro-escuro-claro* dado por:

$$N_v = \frac{h}{\lambda_0} \frac{n_a^2}{n_v} \sin^2 i \quad (7)$$

No ar a diferença de caminho é dada por:

$$\Delta D_a = h \left( \frac{1}{2} - \frac{n_a}{n_v} \right) \sin^2 i \quad (8)$$

Que leva a um número  $N$  de variações *claro-escuro-claro* dado por:

$$N_a = \frac{h}{\lambda_0} \left( n_a - \frac{2n_a^2}{n_v} \right) \sin^2 i \quad (9)$$

Então quando temos a lâmina inclinada de um ângulo  $i$  vamos observar um número total de alternâncias  $N$  dado por:

$$N = N_a + N_v = \frac{h}{\lambda_0} \left( n_a - \frac{n_a^2}{n_v} \right) \sin^2 i \quad (10)$$

E como queremos obter o índice de refração do vidro ( $n_v$ ) ao resolver a equação anterior em ordem a este temos:

$$n_v = \frac{hn_a^2 \sin^2 i}{hn_a \sin^2 i - N\lambda_0} \quad (11)$$

E com esta equação podemos determinar experimentalmente o índice de refração do vidro

### 3 Difração

Nesta atividade vai ser observada a difração por uma abertura linear e por uma abertura circular, pelo que é necessário fazer uma pequena introdução a estas mesmas. Na atividade vamos tratar a difração no regime de Fraunhofer, que nos leva a uma grande simplificação do problema. Este regime pode ser usado quando temos o padrão de difração a uma grande distância do objeto que provoca a difração

#### 3.1 Padrão de Difração por uma fenda

Um dos regimes possíveis de difração é quando temos uma onda plana que incide numa fenda com diâmetro da ordem de grandeza do comprimento de onda, ilustrado na figura abaixo:

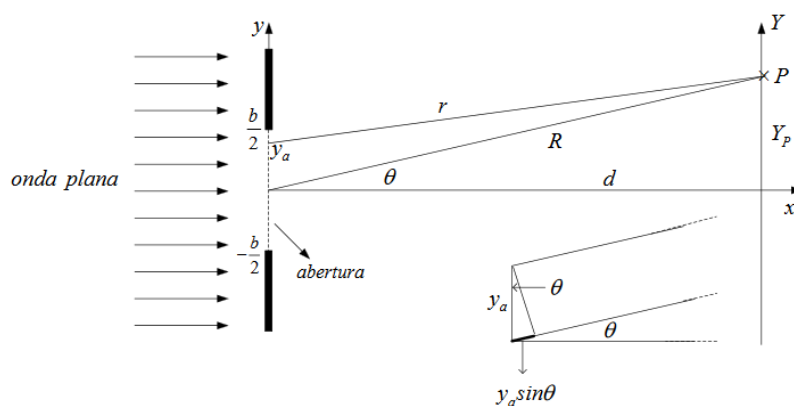


Figure 2: Ilustração do regime de difração quando uma onda plana incide em uma fenda

Como ilustrado na imagem, a um ângulo  $\theta$  com a reta normal ao plano de incidência a diferença de caminho ótico é dada por  $\Delta r = b \sin \theta$ , e caso essa diferença seja um múltiplo inteiro do comprimento de onda as duas ondas vão interferir destrutivamente, pelo que temos a condição:

$$\sin \theta = \frac{\lambda_0}{nb} m, m \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

E como se pode ver na figura  $\tan \theta = \frac{Y}{d}$  e como estamos no regime de Fraunhofer, o ângulo é muito pequeno, pelo que se pode fazer a aproximação  $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta \approx \frac{Y}{d}$

Portanto tendo em atenção aos valores mínimos de intensidade luminosa podemos obter uma relação para a largura da fenda dada por:

$$b = m \frac{d\lambda_0}{nY_{min}}, m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13)$$

### 3.2 Padrão de Difração de um fio

Esta montagem é simplesmente a complementar à anterior, pois no outro tínhamos uma abertura de largura  $b$  e todo o resto obstruído pelo que não há passagem de luz, enquanto que neste caso a luz passa por todo o lado menos pela obstrução de largura  $b$ , pelo que todas as expressões e o tratamento é idêntico à parte anterior. Esta situação é traduzida no *Princípio de Babinet*:

”Num alvo, fora da zona de incidência direta da luz, o campo difratado gerado por uma determinada abertura é idêntico em amplitude e com uma diferença de fase de  $180^\circ$  relativamente ao campo difratado gerado pela abertura complementar”

E como as equações também vão ser idênticas temos que a largura do fio é:

$$b = m \frac{d\lambda_0}{nY_{min}}, m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (14)$$

### 3.3 Padrão de Difração de uma Abertura Circular

Esta configuração esférica é importante quando se utiliza lentes e espelhos (como na astronomia e fotografia) pois estes são muito frequentemente circulares. A simetria circular deste problema permite nos simplificar muitos dos cálculos, pois elimina logo a dependência angular da intensidade da luz, sendo então tudo apenas radial. Como estamos novamente no regime de Fraunhofer temos que a intensidade luminosa em função da distância  $q$  ao centro do padrão é dada por:

$$I(q) = I(0) \left[ \frac{2J_1\left(\frac{kaq}{R}\right)}{\frac{kaq}{R}} \right]^2 \quad (15)$$

Em que  $k$  é o número de onda,  $a$  a abertura da fenda,  $q$  a distância ao centro do padrão de difração e  $R$  a distância do padrão de difração à fonte luminosa.

É possível também apresentar a fórmula da intensidade em função do ângulo  $\theta$  que a distância da abertura a um qualquer ponto faz com a normal ao plano de difração, sendo a relação de passagem  $\sin \theta = \frac{q}{R}$ , o que modifica a expressão da intensidade para:

$$I(q) = I(0) \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 \quad (16)$$

Através dos zeros desta função podemos encontrar uma expressão para o diâmetro da abertura, e o primeiro zero acontece quando  $x = 3,83$ , pelo que temos de ter  $ka \sin \theta = 3,83$ . Novamente como estamos em regime de Fraunhofer vamos ter que:

$$\tan \theta_1 = \frac{q_1}{d} \approx \sin \theta_1 \rightarrow ka \frac{q_1}{d} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} a \frac{q_1}{d} = 3,83 \quad (17)$$

Portanto a relação para o diâmetro da abertura em função da distância do padrão de difração ao alvo e da coordenada radial da primeira coroa escura é:

$$D = 1,22 \frac{\lambda_0}{n} \frac{d}{q_1} \quad (18)$$

Sendo novamente  $\lambda_0$  o comprimento de onda da luz e  $n$  o índice de refração do meio. Para o segundo e terceiro zeros também é possível obter uma relação para o diâmetro a partir dos seguintes zeros, que são em  $x = 7,00$  e em  $x = 10,17$ , sendo as expressões:

$$D = 2,23 \frac{\lambda_0}{n} \frac{d}{q_2}; D = 3,24 \frac{\lambda_0}{n} \frac{d}{q_3} \quad (19)$$

## 4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Estudo de fenômenos associados à sobreposição de ondas com auxílio do Interferômetro de Michelson
- Estudo de fenômenos associados à presença de obstáculos/aberturas (Difração)
- Determinação do índice de refração do ar e do vidro
- Determinação do diâmetro de um fio existente no laboratório, do diâmetro de uma abertura linear e de uma abertura circular

## 5 Procedimento Experimental

Na primeira parte da atividade é utilizado o Interferômetro de Michelson (modelo da Pasco Scientific(OS-9255A)) para determinar o índice de refração do ar e do vidro e na segunda parte usamos a montagem com o ecrã e o laser de modo a determinar a largura de uma abertura linear, o diâmetro de um fio e a o diâmetro de uma fenda circular. O modelo utilizado é

E a montagem para o estudo da difração é

### 5.1 Determinação do índice de refração do ar

Sem a lente na fonte luminosa alinhar os dois raios de luz no ecrã, e após estarem corretos por a lente de modo a que o centro do padrão de difração esteja visível e centrado no ecrã. Escolher um número  $N$  de passagens *claro-escuro-claro*, rodar cuidadosamente (de modo a não saltar nenhuma passagem) e registar o deslocamento do parafuso micrométrico após  $N$  passagens. Repetir este processo um número de vezes, de modo a obter um valor médio para o índice de refração do ar e a partir disso o erro. A fórmula a utilizar é a dada na introdução:

$$n_a = \frac{N\lambda_0}{2\Delta_N} \quad (20)$$

O valor de referência do índice de refração do ar é  $n_{ar} = 1,00029$  e  $\lambda_0 = 632,8nm$



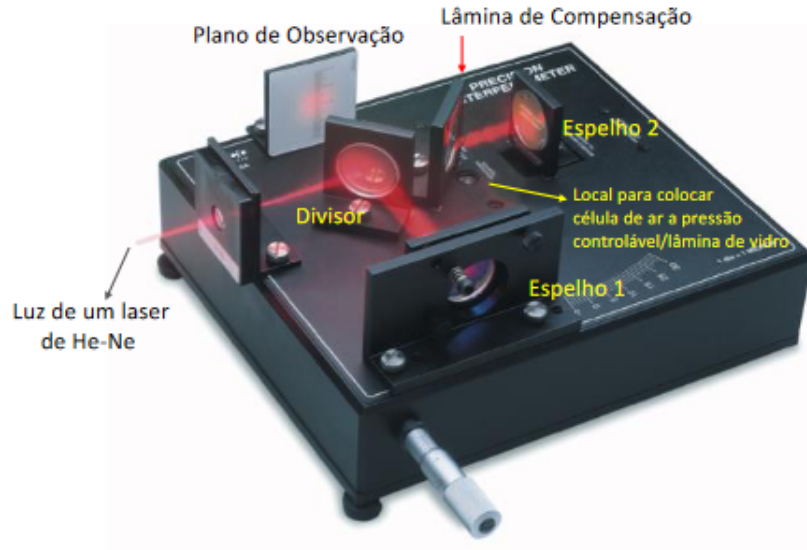


Figure 3: Modelo de interferômetro utilizado

## 5.2 Determinação do índice de refração do vidro

Colocar a lâmina de vidro existente no laboratório no braço do espelho 2 tal como indicado na figura. Alinhar novamente os raios difratados sem a lente na fonte luminosa, e colocar a lente de forma ao centro do padrão de difração estar focado tal como na parte anterior. a partir da lente perpendicular ao espelho ( $i = 0$ ) rodar lentamente a lente até haver  $N$  passagens *claro-escuro-claro* (aconselha-se  $N > 20$ ) e registar o ângulo da lente. Repetir este processo um grande número de vezes de modo a obter um valor médio para o ângulo e para o índice de refração, dado pela expressão da introdução:

$$n_v = \frac{hn_a^2 \sin^2 i}{hn_a \sin^2 i - N(i)\lambda_0} \quad (21)$$

Com o mesmo valor de  $\lambda_0 = 632,8nm$ ,  $h = 5,5 \pm 0,5mm$  e  $n_a = 1,00029$

## 5.3 Determinação da abertura de uma fenda linear

Alinhar uma fenda de um dos suportes existentes no laboratório com a luz proveniente do laser de He-Ne (registrar tamanho da fenda indicado no suporte) e certificar que está corretamente alinhada com o ecrã. Certificar que a distância  $d$  é superior a 2 metros para certificar que estamos no regime de Fraunhofer. Medir a distância  $d$  e, para várias ordens  $m$  a distância do centro do padrão de difração ao  $m$ -ésimo mínimo. Pode se obter a abertura da fenda com a relação dada na introdução:

$$b = m \frac{d\lambda_0}{nY_{min}}, m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (22)$$

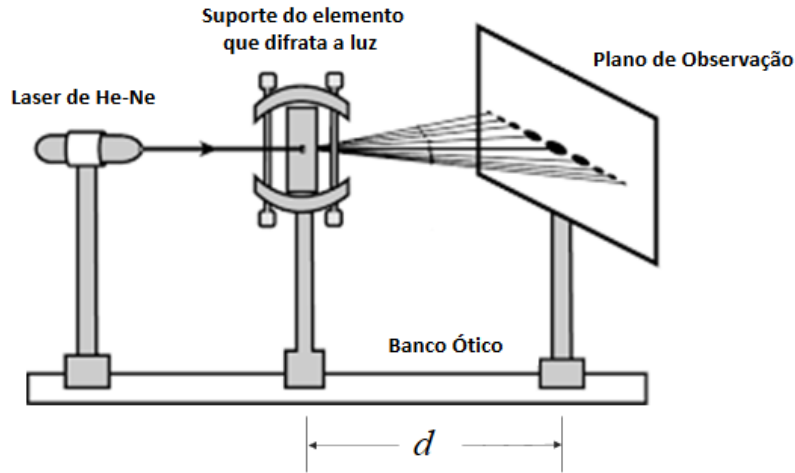


Figure 4: Montagem experimental para o estudo da difração

Em que para cada  $m$ , o  $Y_{min}$  é dado pela média entre o valor para  $m$  e para  $-m$ , e assim é possível obter um valor médio para a abertura e a respetiva incerteza

#### 5.4 Determinação do diâmetro de um fio

O procedimento experimental é idêntico ao da parte anterior mas em vez de alinhar a fenda do suporte existente utiliza-se o suporte com um fio existente no laboratório, sendo preciso alinhar o fio com o centro do raio luminoso.

#### 5.5 Determinação do diâmetro de um orifício circular

Colocar o suporte com os orifícios circulares e alinhar com o raio laser de modo a que o centro do padrão de difração seja visível no ecrã. Medir a distância ao centro das três primeiras coroas escuras e determinar um valor médio para o diâmetro do orifício a partir das relações de passagem dadas na introdução:

$$D = 1,22 \frac{\lambda_0}{n} \frac{d}{q_1}; D = 2,23 \frac{\lambda_0}{n} \frac{d}{q_2}; D = 3,24 \frac{\lambda_0}{n} \frac{d}{q_3} \quad (23)$$

## 6 Análise de Dados

### 6.1 Índice de refração do ar

Para a determinação do índice de refração do ar foram usados dois métodos: um com um número  $N$  fixo de passagens e retirou-se a partir do valor médio e registou-se para uma gama de valores de  $N$  e a partir do declive da projeção linear é possível determinar o índice. Para o primeiro método todos os dados estão em anexo mas calculando o índice de refração com a fórmula conhecida temos

$$n_{ar} = 1,18650 \quad (24)$$

E a incerteza dada pelo desvio padrão dividido pela raiz do número de ensaios (15 neste caso) é:

$$u(n_{ar}) = \frac{DP(\bar{\Delta d})}{\sqrt{15}} = 0,01505 \quad (25)$$

Que para o valor tabelado do índice de refração é um erro de 18,6%, alto mas que nos faz ponderar se a escolha do  $N$  foi a mais adequada e se o método em si é o melhor. Foi anotado em laboratório que não era possível retornar o parafuso micrométrico ao seu 0, estando o mínimo nos  $75\mu m$ , o que indica que este muito possivelmente não se encontra devidamente calibrado, a escolha de  $N$  também não foi a melhor, seria melhor ter escolhido um  $N$  maior. Para o segundo método os dados também se encontram em anexo mas a representação gráfica é

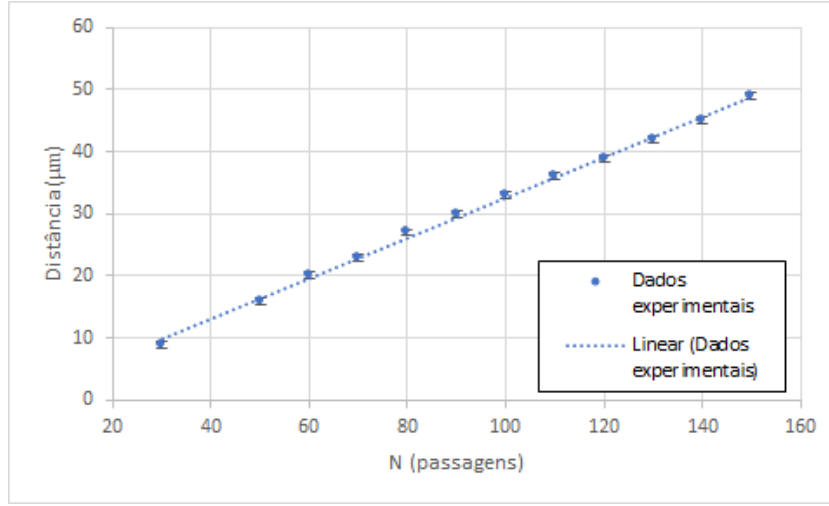


Figure 5: Representação gráfica dos dados do segundo método

E pela expressão sabemos que o declive da reta está relacionado com o índice de refração pela relação:

$$\Delta d(N) = \frac{N \lambda_0}{2n_{ar}} \quad (26)$$

E obtendo a matriz de ajuste temos os dados:

m	3,25E-07	9,9E-08	b
u(m)	4,3E-09	4,4E-07	u(b)
$R^2$	0,998	5,41E-07	u(y)

As barras de erro do gráfico dos dados têm o valor dado na matriz de ajuste por  $u(y)$ , que está muito próximo da incerteza de leitura do parafuso micrométrico de  $0,5\mu m$ . A

partir do valor do declive da matriz que sabemos como relacionar com o índice de refração vamos ter

$$m = \frac{\lambda_0}{2n_{ar}} \quad (27)$$

Que para o mesmo  $\lambda_0 = 632,8nm$  nos dá que  $n_{ar} = 0,972$ , com uma incerteza dada por:

$$u(n_{ar}) = \frac{\lambda_0}{2} \frac{\partial n_{ar}}{\partial m} u(m) \rightarrow \frac{\lambda_0 u(m)}{2m^2} = 0,013 \quad (28)$$

Este valor de índice de refração não tem significado físico pois isto indicaria que a velocidade da luz no ar seria superior à velocidade da luz no vácuo, o que é impossível. Este resultado leva nos a ponderar se o parafuso micrométrico está corretamente calibrado (sendo 1 micrómetro de deslocamento do espelho uma divisão do parafuso). No entanto comparando com o valor tabelado do índice temos um erro de 2,8%, bastante menor que o da parte anterior.

## 6.2 Índice de refração do vidro

Para esta parte da experiência apenas se utilizou o método do protocolo e os dados obtidos encontram-se em anexo, e a partir da fórmula da introdução obtemos um valor para o índice e a respetiva incerteza (método igual à da refração do ar):

$$n_{vidro} = 1,500; u(n_{vidro}) = \frac{DP(\bar{i})}{\sqrt{14}} = 0,009 \quad (29)$$

O que para o valor tabelado de 1,517 é um erro de 1,1%

## 6.3 Determinação da abertura de uma fenda linear

Foi possível obter os valores para  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ , que permitem obter cada um um valor da abertura:

m	$Y(\pm 0,5mm)$	b(mm)
1	5	0,123
2	9	0,137
3	13	0,142
4	15	0,145

E a partir destes obtemos o valor médio do diâmetro e a sua incerteza

$$\bar{b} = 0,140mm, u(\bar{b}) = \frac{DP(\bar{b})}{\sqrt{4}} = 0,006mm \quad (30)$$

Que para o valor indicado no alvo de 0,16mm é um erro de 12,5%, o que tendo em conta a dimensão em que estamos a trabalhar é bastante baixo. É possível que a

distância do alvo e do laser não fosse a mais apropriada neste caso (apenas  $0,975m$  em vez dos  $2m$  recomendados) e o regime de Fraunhofer não fosse a aproximação mais correta, o que nos leva a este efeito nos resultados. Quando alteramos para a fenda de largura variável nota-se um número crescente de bandas largas e escuras visíveis no ecrã com a diminuição da largura da fenda e devido a isso cada banda torna se cada vez mais fina.

#### 6.4 Determinação do diâmetro de um fio

A análise desta parte é idêntica à anterior mas neste caso foi possível obter valores até  $m = \pm 7$ , possivelmente devido ao facto da distância entre o alvo e o laser ter sido aumentada para  $2,565$  distância essa perfeitamente já dentro do regime de Fraunhofer e que permite uma análise mais correta

m	$Y(\pm 0,5mm)$	b(mm)
1	0,5	0,32
2	1,2	0,27
3	2	0,24
4	2,9	0,22
5	3,7	0,22
6	4,6	0,21
7	5,3	0,21

E com estes valores o diâmetro médio obtido e a sua respetiva incerteza são

$$\bar{b} = 0,22mm; u(\bar{b}) = \frac{DP(\bar{b})}{\sqrt{7}} = 0,01mm \quad (31)$$

Para este fio não há valor teórico do diâmetro, pelo que não é possível encontrar um erro percentual

#### 6.5 Determinação do diâmetro de um orifício circular

Para este método foi mantida a distância entre o ecrã e o laser de modo a termos na mesma o regime de Fraunhofer bem estabelecido e conseguiu-se obter corretamente as 3 distâncias pretendidas com os seguintes valores

m	$Y(\pm 0,5mm)$	D(mm)
1	2	0,38
2	3	0,46
3	5	0,40

Que nos leva a um valor médio do diâmetro e a respetiva incerteza de

$$\bar{D} = 0,40mm; u(\bar{D}) = \frac{DP(\bar{D})}{\sqrt{3}} = 0,02mm \quad (32)$$

Que para o valor indicado de  $0,4mm$  no suporte é um erro de 0%, foi possível determinar o valor médio sem erro, mas como só temos 3 valores para nos basear não devemos pensar neste resultado em nada mais que um acaso, pois temos apenas 1 valor de  $0,4mm$ , enquanto que os outros dois são relativamente diferentes.

## 7 Resultados finais e conclusão

Temos como resultados finais para esta atividade experimental os seguintes

		Erro (%)
$n_{ar}$ 1º método	$1,18650 \pm 0,01505$	18,6
$n_{ar}$ 2º método	$0,972 \pm 0,013$	2,8
$n_{vidro}$	$1,500 \pm 0,009$	1,1
$b_{aberturalinear}$	$0,140 \pm 0,006 \text{ mm}$	12,5
$d_{fio}$	$0,22 \pm 0,01 \text{ mm}$	–
$D_{circular}$	$0,40 \pm 0,2 \text{ mm}$	0

E tal como dito anteriormente o zero do parafuso micrométrico do Interferómetro não se encontra devidamente calibrado, o que leva a crer que 1 divisão não corresponde exatamente a  $1 \mu m$  tal como consideramos, podendo essa ser uma das fontes do erro, pois ambos os métodos de determinação do índice de refração do ar deram resultados algo fracos. O primeiro método com um erro percentual bastante alto e o segundo método com um resultado que não tem significado físico. Na determinação do índice do vidro foi possível obter um resultado de uma qualidade muito maior, talvez por não ser preciso trabalhar com o parafuso micrométrico e sim apenas rodar o vidro no suporte, sendo a escala de leitura mais clara e direta. Para a montagem de difração a primeira parte teve um erro elevado possivelmente por o ecrã e o suporte da fenda estarem muito próximos, não sendo a aproximação ao regime de Fraunhofer a mais correta. A segunda parte de difração não tem nenhum valor teórico com o qual comparar mas foi corrigido esse erro, pelo que se conclui que os resultados obtidos assim são melhores do que os que seriam obtidos de outra forma, o que se confirma com o erro de 0% na terceira parte, que não tem grande significado pois temos sempre incerteza associada ao valor e apenas três ensaios.

Foram cumpridos todos os objetivos com sucesso

## 8 Anexo

No anexo encontram se todos os dados obtidos experimentalmente

Table 1: 1º Método de determinação do índice de refração do ar

$\Delta D(\pm 0,5\mu m)$	$n_{ar}$
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
8	1,18650
9	1,05467
9	1,05467
9	1,05467
8	1,18650
8	1,18650
9	1,05467
8	1,18650
9	1,05467

Table 2: 2º Método de determinação do índice de refração do ar

N	d( $\mu m$ )
30	9
50	16
60	20
70	23
80	27
90	30
100	33
110	36
120	39
130	42
140	45
150	49

Table 3: Determinação do índice de refração do vidro

i	N(i)	$n_{vidro}$
7,6	50	1,490
7,7	50	1,472
7,6	50	1,490
7,7	50	1,472
7,6	50	1,490
7,4	50	1,531
7,5	50	1,510
7,8	50	1,454
7,5	50	1,510
7,5	50	1,510
7,7	50	1,472
7,2	50	1,578
7,3	50	1,554
7,3	50	1,554