

T3 - ESTUDO DE FENÓMENOS DE INTERFERÊNCIA ÓTICA E APLICAÇÕES

Mania Helene Nunes de Sá Ribeiro, PL1, Grupo 2

2/10/2023

(2/10/2023)

OBJETIVOS

- Determinar o índice de refração do ar através de 2 métodos
- Determinar o índice de refração do nitro
- Observar o fenômeno de difração e determinar a largura da vela fundo, o diâmetro da vela fundo e o diâmetro da vela abertura circular

INTRODUÇÃO TEÓRICA

índice de refração do ar à pressão atmosférica e temperatura pedida (20°C) : $n_a = 1,00029$

Método 1 para índice refração ar

$$(1) n_a = \frac{N \lambda_0}{2 \Delta d} \quad \rightarrow \text{comprimento de onda da frise do Aram} : \lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$$

mádia do deslocamento do envelope 1 (isto é, do parafuso micrométrico)

Método 2 para índice refração ar

$$(2) n_{\text{at. atom}} \approx 1 + \frac{\lambda_0 N}{2 d_c} \quad \rightarrow \text{mádia do } m^{\circ} \text{ de passagem de mínimos / máximos}$$

espessura do círculo do ar : $d_c = 3 \pm 0,1 \text{ cm}$

$$(3) n_{\text{at. N2O}} \approx \frac{h_{\text{N2O}} \text{ em } \text{mm}}{h_{\text{air}} \text{ em } \text{mm}} \cdot n_{\text{air}}$$

Determinação do índice de refração do vidro

$$(3) \frac{m}{n_{te,N(i)}} = \frac{l_{ma} m^i}{l_{ma} m^i - N(i) l_0}$$

n_{te} (técnico para vidro normal) = 1,517

→ espessura do vidro: $h = 5,5 \pm 0,5$ mm

Difração → abertura da janela / diâmetro do fio

$$(4) b = m d \frac{\lambda_0}{\lambda_{ma}}$$

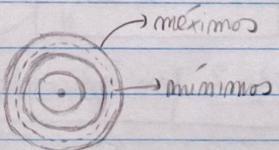
$$(5) D_{\text{mínima janel}} = 1,22 \frac{\lambda_0}{\lambda_{ma}} \frac{d}{g_{\text{mínima janel}}}$$

$$(6) D_{\text{janela janel}} = 2,23 \frac{\lambda_0}{\lambda_{ma}} \frac{d}{g_{\text{janela janel}}}$$

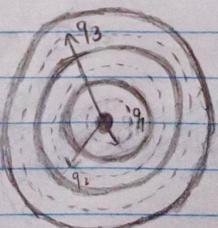
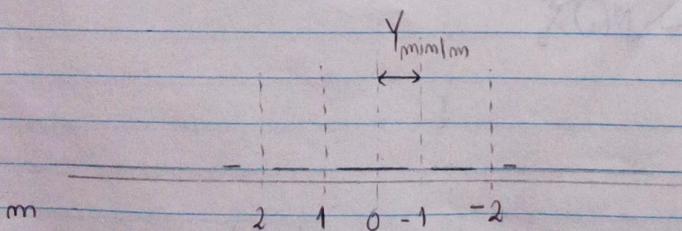
$D \rightarrow$ diâmetro do orifício circular

$$(7) D_{\text{terceira janel}} = 3,24 \frac{\lambda_0}{\lambda_{ma}} \frac{d}{g_{\text{terceira janel}}}$$

Interferência →干涉干渉 de ondas



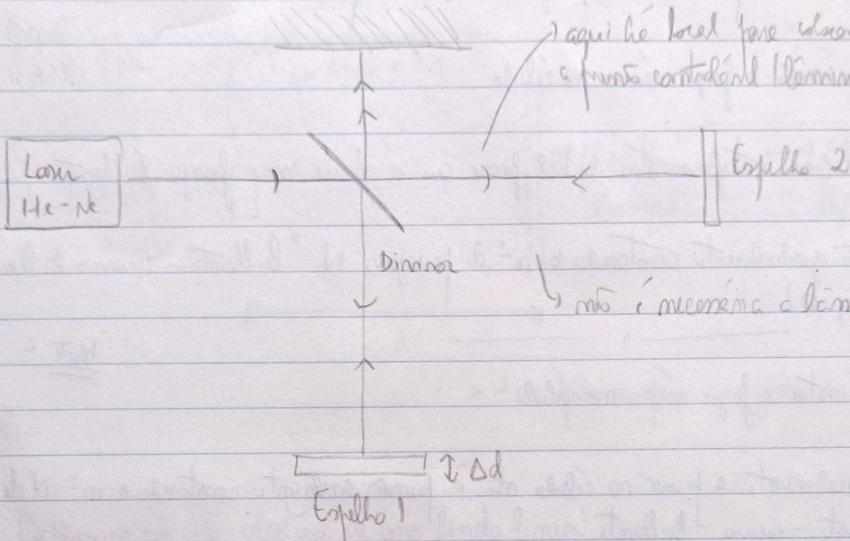
Difração → onda encontra um obstáculo e contorna-o, espalhando-se ou formando uma abertura (abertura é fonte remota de propagação de onda)



PROCEDIMENTO

① Interferômetro de Michelson

Plano de Observação



→ aqui há local para colocar célula de ar a frente do espelho 1
→ não é necessário a lâmina

turn parafuso micrométrico, atuar nisto para observar
frangos, no ponto central a franja para alternamento de
claro e escuro e assim sucessivamente, no plano de observação

1.1 Determinação do índice de refração do ar - Método 1

- Determinar no plano de observação o ponto central dos pedidos de interferência, deve-se manter fixo no deverso de exponência (interferômetro tem de estar bem alinhado)
- Deslocar o espelho 1 com o parafuso micrométrico em deslocamento Δd , no parafuso correspondente a certos números N de franjas (brilhante - escuro - brilhante) do ponto central dos pedidos de interferência (número: $N = 30$) (as leituras correspondentes de deslocamento para uns divisões do tornozelo do parafuso)
- (1) não sair franjas durante a contagem; ajustar posicionadores do espelho 2 sempre que necessário para manter fixo o ponto central
- Repetir procedimento num cuto m° de arco (número: 10 arcos), ou seja, (Δd_{N_i}) , $i = 1, 2, \dots, 10$
- Obter valor médio das leituras, $\bar{\Delta d}_{N_i}$, e registrar a temperatura ambiente

- Obter o índice de refração do ar com a eq. (1) e ~~refletivo~~^{luminoso}, e comparar com o valor tabelado

①.2) Determinar do índice de refração do ar - Método 2

Parte 1

- Colocar célula de ar com faces perpendiculares ao eixo do feixe. A célula está ligada num monómetro com membrana com alavanca que permite variar a pressão do ar no interior da célula para aderir inferiormente à parte exterior; aquela alavanca permite a variação da ar
- Alinhar interferômetro e fazer vazio na célula
- Com parafuso colocar interferômetro de tal forma que se observe uma faixa brillante
- Aumentar pressão gradualmente contando o nº de franges N "brillante - escuro - brillante", registrando (p , N)
- Parte 2
- Alinhar interferômetro e fazer vazio na célula

- Aumentar gradualmente a pressão na célula até a pressão ambiente contando o nº N de franges "brillante - escuro - brillante"
- Repetir procedimento um certo nº de vezes (registro: 10 vezes), ou seja, N_i ; $i = 1, 2, \dots, 10$
- Obter valor médio \bar{N} das leituras e obter índice de refração do ar com a eq. (2) e ~~refletivo~~^{luminoso}, e comparar com o valor tabelado

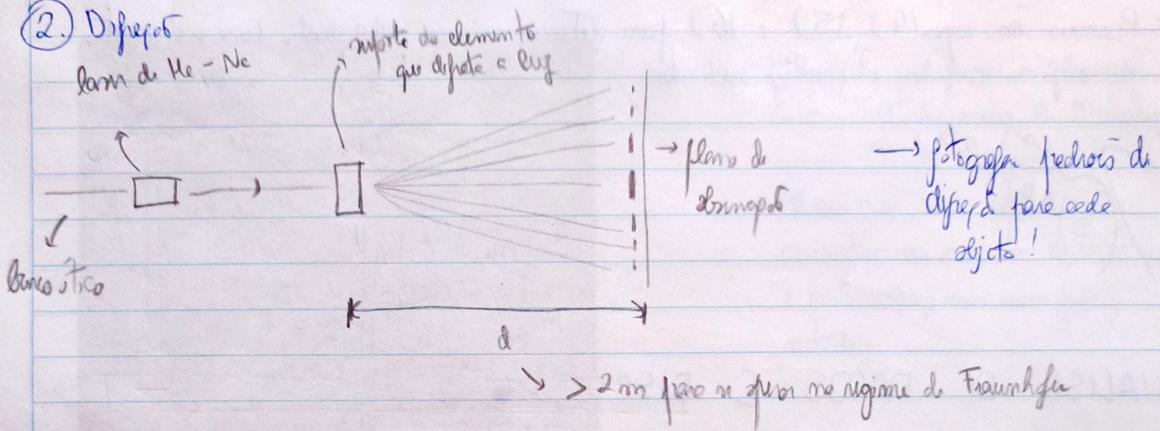
①.3) Determinar do índice de refração do vidro

- Colocar lâmina de vidro de forma paralela ao eixo do feixe 2
- Com parafuso, colocar interferômetro de forma a que no centro da pedra de interferência esteja uma faixa brillante
- Atuando na alavanca correspondente à placa de vidro e começando em $i = 0$, aumentar o ângulo i de um certo valor registrando o correspondente nº de franges "brillante - escuro - brillante" (registro: $N > 20$)
- Repetir procedimento anterior para outros valores de i , obtendo $(i, N(i))$, vidro $i \sim [0, 14^\circ]$

- Para cada par $[i, N(i)]$ obtém o índice de refração do vidro a partir da eq. (3)
- A partir dos valores para $m_{\text{v}_i, N(i)}$ assim obtidos, determinar um valor médio para o índice de refração do vidro, \bar{m}_{v} , e imantge associada

(2) Difração

lente de He - Ne



2.1 Determinação de abertura de um fôto de lâmina

- Colocar no rosto uma das lâminas, as quais têm indicação de rebaço de abertura
- Fazer a luz do laser incidir na lâmina e formar fechas de difração no plano de observação
- Medir d e $y_{\text{mín}, m}$ (deve ser a média dos valores correspondentes a mínima de ordem m de cada lado do ponto central)
- Com eq. (4) obter o valor b para a abertura de fôto de $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$, calcular rebaço médio e imantge associada
- Colocar no rosto fôto de abertura variável e formar mudanças no fechado de difração

2.2 Determinação do diâmetro de um fio

- Usar cabos de uma das jessas que realize o trabalho e inserir à eq. (4) para determinar diâmetro, modo e procedimento idêntico

2.3) Determinação do diâmetro de um orifício circular

- Colocar no rotores uma placa com um orifício circular (escolher placa que permita melhor visualização)
- Identificar ponto central da janela e determinar distâncias desse ponto até ao 1°, 2° e 3° círculo de intensidade nula (9º primeiro zero, 9º segundo zero, 9º terceiro zero)
- Recorrer às eqs (5), (6) e (7) para determinar um valor médio para o diâmetro do orifício circular e incerteza associada

$$K_{21} \cdot 10^{10} \mu\text{m}^2$$

ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO

1.1) Índice de refração do ar - Método 1

i	$\Delta dN (\pm 0.5 \mu\text{m})$	$\bar{\Delta dN} (\mu\text{m})$	$u(\bar{\Delta dN}) (\mu\text{m})$
1	11.5		
2	9.8		
3	11.7		
4	10.8		
5	10.9		
6	10.3		
7	11.1		
8	11.1		
9	9.7		
10	10.3		

$$T = 24^\circ\text{C}$$

0.20 → incerteza de média: $\frac{\sigma}{\sqrt{N_i}}$ → domínio - janelas

Calcular m_a respeitando à eq. (1), com incerteza determinada por

$$m(m_a) = \sqrt{\left(-\frac{N \lambda_0}{2(\bar{\Delta d}_N)} \cdot u(\bar{\Delta d}_N) \right)^2}$$

obtendo - m

$$m_a (\text{Método 1}) = 0,88545 \pm 0,01680$$

$$\text{incerteza } (\%) = 2\%$$

$$\text{Erro } (\%) = 11\%$$

O ruído foi determinado como erro por desvio, e afeta o índice de refração do ar diminuir com o aumento de temperatura, e a temperatura no laboratório (24°C) é ligeiramente superior à temperatura para a qual foi tabulado n_g (20°C), mas não justifica uma diferença significativa de 1%.

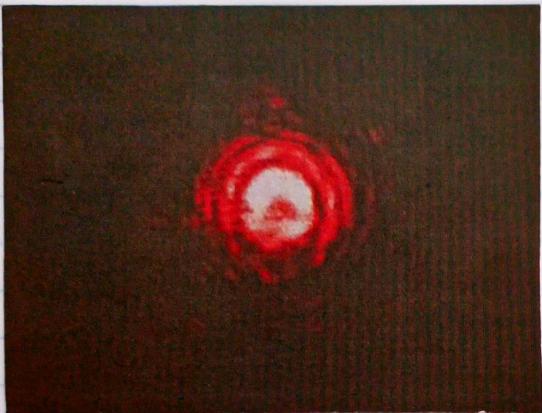


Figure 1 : Padrão de interferência observado com o interferômetro de Michelson (parte ① da experiência).
Observa-se, como esperado, as circunferências concêntricas de máximos e mínimos, com o maior número de máximos.

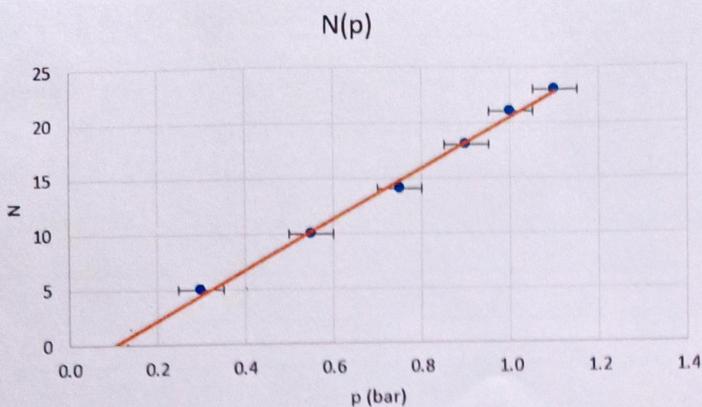
O erro polui os dados, justificado por um erro humano sistemático na contagem das passagens entre máximos N , pois tal como se vê na figura 1, o padrão não é muito preciso.

Outra possibilidade é que haja algum problema com o interferômetro ou alinhamento dos espelhos ou com o calibrador da micrometria, logo o valor de Δd , mas corresponde à realidade, visto que o último micrômetro estava "fuso" próximo da zero e foi necessário registar valores correspondendo um 10 µm.

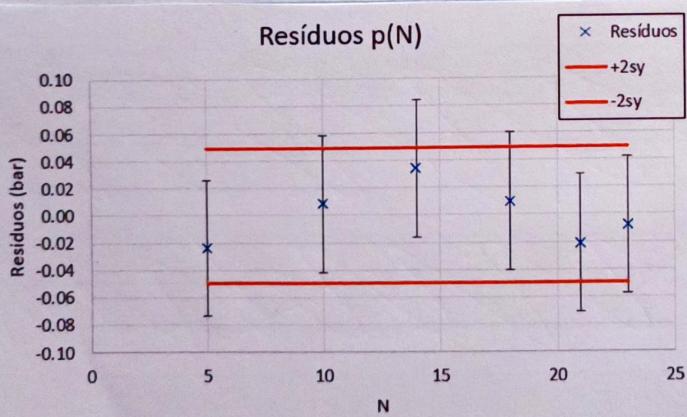
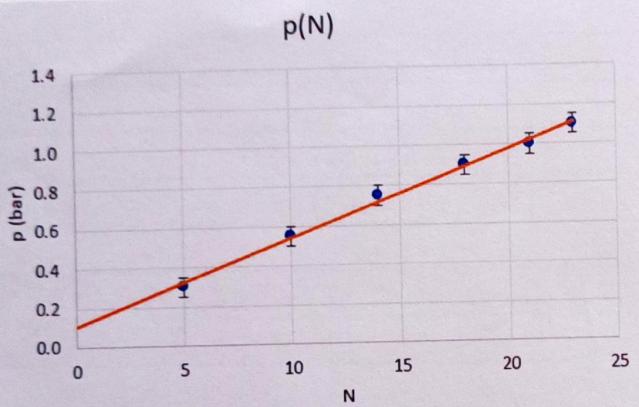
1.2. Índice de refração do ar - Método 2

$p (\pm 0.05 \text{ bar})$	N	N(p)		p(N)	
		Ajuste	Ajuste	Ajuste	Resíduos
0.30	5	4.5	0.32	-0.02	
0.55	10	10.2	0.54	0.01	
0.75	14	14.8	0.72	0.03	
0.90	18	18.2	0.89	0.01	
1.00	21	20.5	1.02	-0.02	
1.10	23	22.8	1.11	-0.01	

Parte 1 - Variação do índice de refração do ar com a pressão



Dado que a variável injeta e incerte, realizou-se um ajuste linear trocando os eixos.



Viu-se que os resíduos do ajuste $p(N)$ têm uma tendência polinomial, logo não foi feita a regras lineares entre o índice de refração da ar e a pressão. Observando o ajuste de pressão em função de N (proportional ao índice de refração), há uma estabilização dos valores de p próximo de 1 bar devido ao menor efeito das variações totais fornecido (não fornecendo medias muito superiores a este, diminuindo a pressão significativamente após volta a bomba a cada medida).

i	N	N	u(N)
1	18		
2	17		
3	17		
4	18		
5	16		
6	17		
7	18		
8	18		
9	16		
10	19		

Parte 2 - Determinar o índice de refração do ar

17.4 0.3

incerteza da média

↳ contagem realizada para $p = 1$ bar (pressão atmosférica)

Calculou-se m_c segundo a eq. (2), com incerteza determinada por:

$$u(m_c) = \sqrt{\left(\frac{\lambda_0 \bar{N}}{2 d_c^2} \cdot u(d_c) \right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2 d_c} \cdot u(\bar{N}) \right)^2}$$

obtendo - m

$$m_c (\text{Método 2}) = 1,00000 \pm 0,00001$$

$$\text{Incerteza} (\%) = 0,001\%$$

$$\text{Erro} (\%) = 0,03\%$$

Comparativamente ao método 1, determinou-se o índice de refração do ar com mais precisão e exatidão.

Apesar do manômetro não conseguir manter a célula a pressão constante, conseguindo a pressão a diminuir mal se a atingir a pressão atmosférica e se largar a bomba, isto foi um aspecto que afeta uniformemente todos os ensaios: menor pressão resulta em menores valores de \bar{N} , explicando o erro no cálculo de m_c calculado.

1.3 Índice de refração do vidro

$i(\pm 0.5^\circ)$	N	n_v	\bar{n}_v	$u(\bar{n}_v)$
4.6	20	1.557		
5.3	25	1.509		
5.7	30	1.538		
6.2	35	1.528		
6.5	40	1.561		
7.0	45	1.535		
7.3	50	1.554		
8.0	55	1.485		
8.2	60	1.514		
9.0	65	1.440		

1.522 0.011 → incerteza da média

Calculou - m, para cada cíngulo e mº de paralegos entre máximos, o índice de refração do vidro segundo a eq. (3), e determinando a média e a incerteza da média, como referido no Table acima:

$$m_v = 1,522 \pm 0,011$$

$$\text{Incerteza} (\%) = 0,7\%$$

$$\text{Erro} (\%) = 0,3\%$$

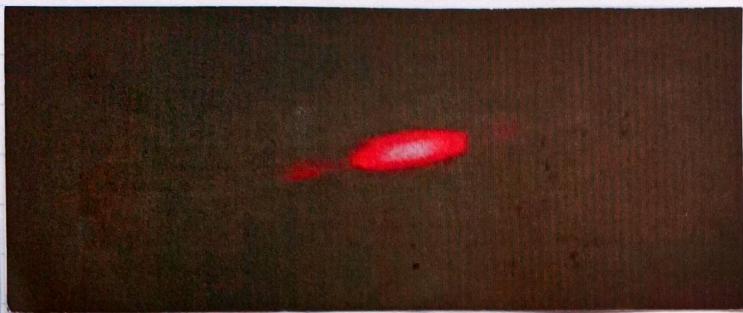
Determinou - m o índice de refração do vidro com mais precisão e exatidão do que o índice do ar com o método 1. Dado que, nessa parte de experiência, usamos a alavanca dos cíngulos e o micrómetro, refrega - m a possibilidade de traçar vidro a mé calibragem do micrómetro e a sua difícil utilização as causas do erro para o índice de refração do ar obtido como método 1.

~~m. Determinando o excesso dividindo por duas cada ângulo, podemos ter uma certa menor variação entre máximos do que o método 1, além disso humanos não realizam com tanta precisão deslocamento de alavanca.~~

~~m. Determinando o excesso dividindo por, para algum ângulo, podemos ter uma certa menor variação entre máximos do que o método 1, ou seja, os humanos na leitura de escala dos cíngulos.~~

Voltando a m_v , o erro determinado pode ser explicado por erros na contagem dos paralegos entre máximos, dado que estes ocorrem bastante rapidamente, rituário a qual associa a dificuldade um maior a alavanca dos ângulos uniformemente. Além disso, também é possível erros de leitura da escala dos ângulos. Ainda assim, significa - m que a incerteza percentual é suficiente ao erro, pelo que o valor apurado está dentro do intervalo de incerteza.

(2.1) Fendas



Parte 1 - Fenda de abertura 0,08 mm

Figura 2: Padrão de difração observado para fenda de 0,08 mm.

Apesar de não ter o menor me foto, durante a experiência observou-se um máximo central.
3 máximos simetricamente distorcidos do centro

A distância do máximo central a cada mínimo, Y_{\min} , foi medida com uma régua

$Y_{\min} (\pm 0.5 \text{ cm})$	m	$b (\text{mm})$	$\bar{b} (\text{mm})$	$u(\bar{b}) (\text{mm})$
1.80	-1	0.081		
1.60	1	0.091		
3.60	-2	0.081		
3.50	2	0.083		
5.60	-3	0.078		
5.40	3	0.081		

$$\text{Média - m } \bar{b} = (230,9 \pm 0,5) \text{ cm}$$

→ incerteza de média

Para cada Y_{\min} , como registado na tabela acima, calculou-se b resolvendo a eq. (4), e determinando a média e a incerteza de média, obtive-se para o valor experimental da fenda

$$b = (0,083 \pm 0,002) \text{ mm}$$

$$\text{Incerteza } (\%) = 2\%$$

$$\text{Erro } (\%) = 3\%$$

Nota: o valor experimental apresenta mais uma casa decimal do que o valor tabelado de modo a mostrar a incerteza

Verifica-se que o erro é inferior à incerteza percentual → qual foi m explicado pela dificuldade de visualizar os padrões no seu ambiente, nomeadamente nos mínimos mais distorcidos do centro ($m = 3$ e $m = -3$). Ainda assim, foi possível retirar estes valores, o que permitiu reduzir a incerteza de b .

Parte 2 - Fundo de abertura variável ($b = [0, 02 \cdot 0, 20]$ mm)



Figura 3 e 4: Padrão de difração observado para uma menor (esquerda) e maior (direita) abertura de fundo

Verificou-se, como esperado, a diminuição de distância entre mínimos com o aumento da abertura de fundo, de modo que, pelo eq. (4), y_{min} é inversamente proporcional a b .

2.2. Fio de cabo

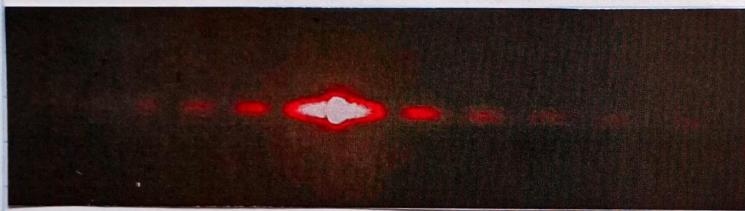


Figura 5: Padrões de difração observados para um fio de cabo. Considerou-se como valor referencial o diâmetro $b =$ cerca $0,10$ mm, o valor médio do intervalo $[50, 150]$ nm, que é uma estimativa do range de espessura de cabos humanos.

Realizou-se um procedimento análogo a 2.1.

$y_{min} (\pm 0.5 \text{ cm})$	m	$b (\text{mm})$	$\bar{b} (\text{mm})$	$u(\bar{b}) (\text{mm})$
1.70	-1	0.087		
1.65	1	0.090		
4.30	-2	0.069		
4.40	2	0.068	0.079	0.003
5.50	-3	0.081		
5.80	3	0.077		

$$\text{Média - se } d = (235,1 \pm 0,5) \text{ cm}$$

↳ incerteza da média

Como indicado na tabela acima, obtém-se para o valor experimental do diâmetro do fio:

$$b = (0,079 \pm 0,003) \text{ mm}$$

$$\text{Incerteza } (\%) = 4\%$$

$$\text{Erro } (\%) = 21\%$$

Nota: o valor experimental apresenta mais um caso decimal do que o valor tabulado de modo a manter a incerteza.

O diâmetro do fio foi calculado com ligeiramente menos precisão do que a abertura de fundo, apesar de melhor visibilidade dos furos do fio no seu ambiente, nomeadamente a menor intensidade do máximo central. Comparativamente também ao furo de fundo, o fio foi determinado com muito menos exatidão, mas é necessário ter em conta que, como referido anteriormente, o valor esperado estava correspondendo à uma média de intervalo de [50, 150] mm, fios não é possível obter um valor mais fidedigno, dado que a espessura do cabo humano depende de muitas variáveis (estriado, giroso, etc.)

(2.3) Orifício circular

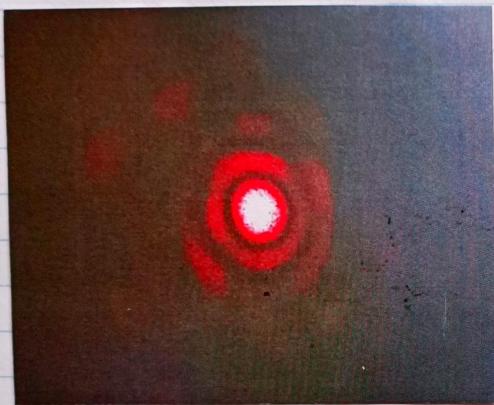


Figura 6: Padrões de difração obtidos para um orifício circular de diâmetro 0,20 mm.

Como reflete, obtém - se o máximo central + circunferências concêntricas de mínimos e máximos alternadamente.

Para cada circunferência de mínimos (q_1 para o 1º círculo, q_2 para o 2º círculo, q_3 para o 3º círculo), mediu - se a distância do máximo central a essa circunferência em 3 pontos diferentes, obtendo - se \bar{q}_1 , \bar{q}_2 e \bar{q}_3 com a média das 3 medições de cada circunferência. De seguida, calculou - se D_1 , D_2 e D_3 usando as eqns (5), (6) e (7) respetivamente, como se viu na tabela abaixo:

	1º zero	2º zero	3º zero	\bar{q} (mm)	D (mm)	\bar{D} (mm)	$u(\bar{D})$ (mm)
q_1 (mm)	0.80	0.80	0.90	0.83	0.214		
q_2 (mm)	1.60	1.75	1.65	1.67	0.195	0.203	0.005
q_3 (mm)	2.30	2.40	2.40	2.37	0.200		

↳ interpretação da média

$$\text{Mediu - se } d = (230,9 \pm 0,5) \text{ cm}$$

Calculando a média com incerteza de medição, temos - m para o diâmetro do orifício

$$D = (0.203 \pm 0.005) \text{ mm}$$

$$\text{Incerteza (\%)} = 2\%$$

$$\text{Erro (\%)} = 2\%$$

Nota: o resultado experimental apresenta menor valor decimal do que o na tabela de medo e mostram a incerteza

O foi calculado com aproximadamente a mesma precisão e exatidão da b de fenda, logo conclui-se que, mesmo assim, a incerteza de medição foi negligenciada dado que se obtiveram valores de q para 3 circunferências de mínimos, e o erro pode ser explicado pela menor visibilidade de alguns pontos na ley ombrística, nomeadamente na circunferência de máximos mais exterior.

RESULTADOS FINAIS E CONCLUSÃO

	Valor	Incerteza	Incerteza (%)	Erro (%)
n_a (Método 1)	0.88545	0.01680	2%	11%
n_a (Método 2)	1.00000	0.00001	0.001%	0.03%
n_b	1.522	0.011	0.7%	0.3%
b (Fenda) (mm)	0.083	0.002	2%	3%
b (Fio) (mm)	0.079	0.003	4%	21%
D (Orifício) (mm)	0.203	0.005	2%	2%

- O índice de refração do ar foi determinado com maior precisão e exatidão utilizando o método 2 (micrômetro e micrômetro), o que pode ser justificado por menor calibre do micrômetro no método 1.
- Não foi possível provar a relação linear entre o índice de refração do ar e a pressão, dado que o micrômetro não permitiu manter a pressão constante, face variações bruscas de pressão atmosférica (1 bar).
- Determinou-se o índice de refração do vidro com maior precisão e exatidão do que na usando o método 1.
- Em geral, erros dos interferômetros podem ser explicados por erros na medição das peças da interferômetro e dificuldade na contagem das franges N.

— Na 2^a part da experiência (fundo, piso e teto) determinaram -n ^{valores com} vinte e três relativamente
melhores deles que se multiplicaram médios dos valores obtidos para cada mínimo. Esses podem
ser explicados por maior vizinhança dos máximos mais distanciados do centro.