

# Difração de Ondas Eletromagnéticas e de Eletrões (T3)

David Cristino (96518), Duarte Marques (96523), João Marques (96542), Rodrigo Pereira (96563)

10 e 12 de novembro de 2020

## Grupo B2, Terça-feira e Quinta-feira

*Mestrado Integrado em Engenharia Física e Tecnológica*  
*Laboratório de Mecânica, Oscilações e Ondas*  
*Profs. Pedro Sebastião e António Ferraz*

---

### Resumo

Neste trabalho, estudou-se a difração de uma luz laser através de duas redes de difração, duas fendas simples e uma fenda dupla. Recorrendo às posições de máximos e mínimos dos padrões de difração, foi possível determinar o valor do comprimento de onda da luz laser e compará-lo com o valor tabelado,  $\lambda_{\text{tabelado}} = 632.8$  nm. Chegou-se a um valor final de  $\lambda = (6.32 \pm 0.07) \times 10^{-7}$  m, cujo erro experimental é 0.1%. Além disso, foi possível determinar a abertura da fenda simples,  $S$ , e a distância entre fendas,  $a$ , nas redes de difração (para as quais existem valores teóricos) e na fenda dupla.

Por fim, estudou-se a difração de micro-ondas através de duas fendas entre placas metálicas, tendo-se determinado o comprimento de onda das mesmas, o qual foi comparado com o valor teórico,  $\lambda_{\text{tabelado}} = 2.857 \times 10^{-2}$  m. O valor obtido foi  $\lambda = (2.854 \pm 0.004) \times 10^{-2}$  m, de erro experimental 0.1%. Adicionalmente, também se analisou a reflexão das micro-ondas nas placas metálicas.

Não foi estudada a difração de eletrões porque o material necessário se encontrava danificado.

---

## I Introdução teórica

A luz, devido à sua natureza ondulatória, evidencia fenómenos de difração caraterísticos de uma onda. Como tal, na primeira componente deste trabalho, procurou-se determinar o comprimento de onda de um laser HeNe através do padrão de difração criado quando o feixe atravessa diferentes obstáculos.

A expressão para a intensidade do feixe,  $I$ , em função do ângulo de desvio (assumindo que o diâmetro do feixe é muito menor que a distância entre a fenda e o alvo) é :

$$I(\theta) = I_0 \left( \frac{\sin(u)}{u} \right)^2 \left( \frac{\sin(Nv)}{N \sin(v)} \right)^2 \quad (1)$$

Para  $N = 1$  e  $N = 2$ , obtém-se, respetivamente:

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

e

$$I(\theta) = I_0 \left( \frac{\sin(u)}{u} \right)^2 (\cos(v))^2 \quad (3)$$

No entanto, esta equação é válida para um sistema de

$N$  fendas reais igualmente espaçadas, onde:

$$u = \frac{\pi S}{\lambda} \sin(\theta) \quad (4)$$

e

$$v = \frac{\pi a}{\lambda} \sin(\theta) \quad (5)$$

Sendo que  $S$  representa a abertura de cada fenda e  $a$  a distância entre fendas.

Nestas expressões,  $I_0$  é a intensidade máxima, o primeiro termo (dependente de  $\sin(u)$ ) representa a difração causada por uma fenda e o segundo termo (dependente de  $\sin(Nv)$ ) representa a interferência gerada pela existência de múltiplas fendas.

Como tal, é possível extrair o comprimento de onda através da inspeção do seu padrão de interferência.

A expressão para os máximos de interferência num sistema de  $N$  fendas é dada pela condição  $\sin(v) = 0$  (não se está a dividir por 0, visto que o numerador também se anula se  $v = \pi k$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ ) e portanto:

$$\frac{\pi a}{\lambda} \sin(\theta) = k\pi \quad (6)$$

Reordenando os termos:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{k\lambda}{a}\right) \quad (7)$$

Para o caso de uma única fenda, a expressão para os mínimos será tal que  $\sin(u) = 0$  e, por isso, é da forma:

$$\frac{\pi S}{\lambda} \sin(\theta) = k\pi \quad (8)$$

E assim:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{k\lambda}{S}\right) \quad (9)$$

Para o caso de N fendas, aos mínimos anteriores adicionam-se os seguintes ( $\sin(Nv) = 0$ ):

$$\theta = \arcsin\left(\frac{k\lambda}{Na}\right) \quad (10)$$

Note-se, contudo, que no caso de k ser um múltiplo de N, a expressão perde a validade, pois o denominador também fica igual a 0. Obter-se-á, na realidade, um máximo (Eq. 6).

Com recurso às equações anteriores, obtêm-se as duas equações que serão utilizadas para os ajustes gráficos:

$$d = \frac{n\lambda L}{\sqrt{a^2 - \lambda^2 n^2}} + c \quad (11)$$

Para os máximos obtidos com as redes de difração e com a fenda dupla, e:

$$d = \frac{n\lambda L}{\sqrt{S^2 - \lambda^2 n^2}} + c \quad (12)$$

Para os mínimos obtidos com a fenda simples.

O parâmetro c é uma parcela corretiva, que será utilizada para estudar eventuais erros sistemáticos.

## II Montagem e procedimento experimentais

### I Difração do laser

Para o estudo da difração da luz laser, foi utilizado o seguinte material:

- Laser He/Ne vermelho (632.8 nm);
- Calha graduada ( $\pm 0.01$  mm);
- Suporte para placas e redes de difração;
- Placa de difração PASCO OS-8850, com fendas simples e fenda dupla;
- Papel milimétrico;
- Redes de difração: 80 linhas/mm; 300 linhas/mm;
- Fita métrica ( $\pm 1$  mm);
- Esquadro;

- Alvo de cortiça, papel milimétrico e fita-cola.

Na primeira parte da experiência, estudou-se o feixe difratado de um laser de Néon e Hélio por duas redes de difração (uma com 80 linhas/mm e outra com 300 linhas/mm), duas fendas simples A e B e uma fenda dupla D. Uma vez alinhado o laser devidamente (de forma perpendicular ao alvo), a difração da luz laser nos diferentes obstáculos permitirá registar as posições de máximos ou mínimos do padrão de difração no alvo. O laser estava assente numa das extremidades da calha. As diferentes redes de difração e fendas foram apoiados num suporte que podia deslizar ao longo da calha, alterando-se assim a distância do obstáculo ao alvo, o qual tinha uma folha de papel milimétrico afixado.

### II Difração de Micro-ondas

Por sua vez, para o estudo da difração de micro-ondas, foi utilizado o seguinte material:

- Sistema constituído por uma plataforma central giratória graduada ( $\pm 0.1^\circ$ ) e duas calhas;
- Fonte de radiação de micro-ondas - Gun Diode Microwave Transmitter (10.5 GHz);
- Recetor com amperímetro ( $\pm 0.1$  mA);
- Chapas de metal;
- Craveira analógica;
- Esquadro;
- Suporte magnético.

Na segunda parte da atividade, procedeu-se ao estudo da difração de micro-ondas através de uma fenda dupla feita com três chapas de metal magnético opaco às micro-ondas, que formavam duas fendas, entre o recetor e o emissor. A plataforma que suporta o ímane, no qual se colocam as placas metálicas, gira em torno do seu centro, permitindo assim alterar o ângulo feito entre o emissor, o recetor e as fendas. O recetor pode ainda deslocar-se na calha sobre a qual está assente. Deve fixar-se o recetor na posição da calha o mais distante possível e tal que a intensidade medida no amperímetro seja máxima.

Com esta montagem experimental, decidiu-se também estudar a reflexão das micro-ondas nas chapas metálicas.

### III Resultados obtidos

#### I Difração da luz laser

##### I.1 Redes de difração

Com o objetivo de determinar experimentalmente o comprimento de onda da luz laser, utilizaram-se duas redes de difração: uma de 300 linhas/mm e outra de 80 linhas/mm. A partir destes dois valores tabelados, podem-se calcular as distâncias entre as fendas das redes:  $a = 3.33 \times 10^{-6}$  m e  $a = 1.25 \times 10^{-5}$  m, respectivamente. Recorrendo, para cada rede de difração, a este valor tabelado e à equação 11, obtêm-se valores para o comprimento de onda da luz laser. Os ajustes gráficos foram feitos recorrendo ao método dos mínimos quadrados implementado no *software* Fitteia. Além disso, utilizou-se o ajuste gráfico para determinar valores experimentais do parâmetro  $a$ , de forma a compará-los com os valores tabelados. Nestes últimos ajustes, utiliza-se o valor tabelado do comprimento de onda:  $\lambda_{\text{tabelado}} = 632.8$  nm.

Como se verifica pela Eq.11, pode fazer-se o gráfico da posição  $d$  dos máximos em relação ao centro do padrão de difração fazendo variar  $L$  e mantendo  $n$  constante, ou fazendo variar  $n$  e mantendo  $L$  constante. Os valores medidos foram analisados destas duas formas.

Em primeiro lugar, são analisados os valores obtidos para a rede de 300 linhas/mm, os quais se encontram em anexo, na Tabela 1.

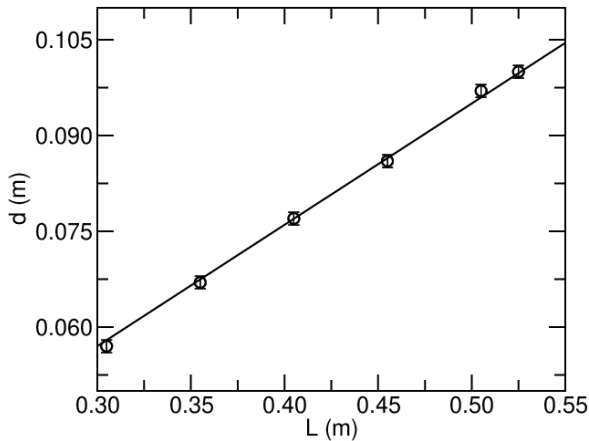


Figura 1: Distâncias dos máximos de ordem  $n=1$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm.

Utilizando o valor tabelado de  $a$ , obteve-se com este ajuste, para o comprimento de onda da luz laser,  $\lambda = (6.22 \pm 0.02) \times 10^{-7}$  m, de incerteza relativa 0.3 %.

Por sua vez, recorrendo ao valor  $\lambda_{\text{tabelado}}$ , obteve-se  $a = (3.39 \pm 0.01) \times 10^{-6}$  m, de incerteza relativa 0.3 %.

Em seguida, fizeram-se ajustes gráficos análogos para as diferentes distâncias  $L$ , tendo-se obtido os va-

lores registados nas duas tabelas abaixo apresentadas. Os respetivos ajustes gráficos encontram-se em anexo (Figuras 9 a 11).

n	$\lambda (\times 10^{-7} \text{ m})$	Incerteza relativa (%)
1	$6.22 \pm 0.02$	0.3
2	$6.23 \pm 0.01$	0.2
3	$6.24 \pm 0.01$	0.2
4	$6.24 \pm 0.01$	0.2

n	$a (\times 10^{-6} \text{ m})$	Incerteza relativa (%)
1	$3.39 \pm 0.01$	0.3
2	$3.38 \pm 0.01$	0.3
3	$3.38 \pm 0.01$	0.3
4	$3.38 \pm 0.01$	0.3

Fazendo a média aritmética de todos estes valores, fica-se com  $\lambda = (6.23 \pm 0.01) \times 10^{-7}$  m, de incerteza relativa 0.2% e erro experimental (relativo a  $\lambda_{\text{tabelado}}$ ) de 1.5% (erro por defeito). Por sua vez, obtêm-se  $a = (3.38 \pm 0.01) \times 10^{-6}$  m, de incerteza relativa 0.3% e erro experimental 1.4% (erro por excesso).

Ora, conclui-se que a precisão destes resultados é bastante elevada, devido às incertezas relativas baixas. Este facto também é corroborado pelos valores baixos de  $\chi^2$  que se obtinham para os diferentes ajustes. Porém, verifica-se um ligeiro desvio face aos valores tabelados, sendo que todos os valores de  $\lambda$  possuem erro por defeito e todos os valores de  $a$  estão afetados de um erro por excesso. Consequentemente, espera-se que as medidas estejam afetadas sobretudo por erros sistemáticos.

Para corroborar esta conclusão, fizeram-se os mesmos ajustes gráficos, mas adicionando a constante  $c$  tal como na Eq.11. Os novos valores obtidos apresentam-se nas tabelas abaixo.

n	$\lambda (\times 10^{-7} \text{ m})$	Incerteza relativa (%)
1	$6.42 \pm 0.12$	1.9
2	$6.42 \pm 0.04$	0.6
3	$6.40 \pm 0.02$	0.3
4	$6.32 \pm 0.01$	0.2

n	$a (\times 10^{-6} \text{ m})$	Incerteza relativa (%)
1	$3.28 \pm 0.06$	1.8
2	$3.28 \pm 0.02$	0.6
3	$3.29 \pm 0.01$	0.3
4	$3.34 \pm 0.01$	0.3

n	$c (\times 10^{-3} \text{ m})$
1	$-2.84 \pm 1.59$
2	$-6.30 \pm 1.59$
3	$-11.7 \pm 1.6$
4	$-13.5 \pm 1.6$

Ora, para estes novos valores, chega-se aos valores médios  $\lambda = (6.39 \pm 0.07) \times 10^{-7}$  m, sendo o respetivo erro experimental (por excesso) 0.1%, e  $a = (3.30 \pm 0.04) \times 10^{-6}$  m, que difere em 1.0% (erro por

defeito) face ao valor tabelado. Nestes casos, as incertezas relativas aumentaram, embora não sejam relevantes para o estudo dos erros sistemáticos que se pretende fazer. Além disso, verifica-se que os valores de  $c$  obtidos foram todos negativos, de ordens de grandeza de  $-10^{-3}$  m e  $-10^{-2}$  m. Desta forma, confirma-se a existência de erros sistemáticos a afetar as medidas obtidas, sempre no mesmo sentido. Por outro lado, também se poderá inferir que os valores tabelados poderão ser ligeiramente diferentes dos considerados. Tendo em conta o procedimento efetuado em aula, espera-se que os erros sistemáticos provenham das medidas da distância  $L$ , facto este que será discutido no presente relatório.

Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos para os ajustes gráficos da distância  $d$  em função das ordens dos máximos.

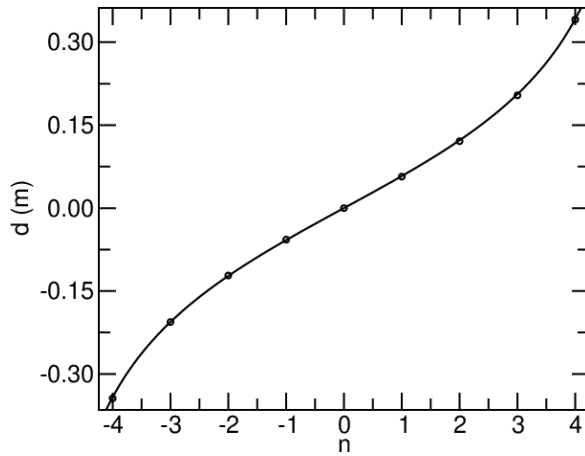


Figura 2: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm e  $L = (30.5 \pm 0.01)$  cm.

Os gráficos correspondentes às restantes distâncias  $L$  encontram-se em anexo (Figuras 12 a 16). Os valores de  $a$  e  $\lambda$  obtidos para estes ajustes encontram-se nas duas tabelas abaixo.

$L (\pm 0.01 \text{ cm})$	$\lambda (\times 10^{-7} \text{ m})$	Inc. relativa (%)
30.5	$6.21 \pm 0.01$	0.2
35.5	$6.21 \pm 0.01$	0.2
40.5	$6.25 \pm 0.01$	0.2
45.5	$6.22 \pm 0.01$	0.2
50.5	$6.27 \pm 0.01$	0.2
52.5	$6.26 \pm 0.01$	0.2

$L (\pm 0.01 \text{ cm})$	$a (\times 10^{-6} \text{ m})$	Inc. relativa (%)
30.5	$3.39 \pm 0.01$	0.3
35.5	$3.39 \pm 0.01$	0.3
40.5	$3.37 \pm 0.01$	0.3
45.5	$3.39 \pm 0.01$	0.3
50.5	$3.36 \pm 0.01$	0.3
52.5	$3.37 \pm 0.01$	0.3

Assim, os valores médios são  $\lambda = (6.24 \pm 0.03) \times 10^{-7}$  m, de incerteza relativa percentual 0.5% e erro experimental 1.4% (por defeito), e  $a = (3.38 \pm 0.02) \times 10^{-6}$  m, de incerteza relativa experimental 0.6% e erro experimental (por excesso) 1.4%. Desta forma, também nestes ajustes são notórios os efeitos dos erros sistemáticos, tal como esperado. Porém, nestes ajustes, a constante aditiva  $c$  não será uma ferramenta adequada para os estudar, porque se crê que os erros advenham das distâncias  $L$ . Confirmou-se este facto ao se obterem valores de  $c$  extremamente baixos em ajustes para  $d$  em função de  $n$ . Desta forma, decidiu-se, para cada conjunto de dados, deixar  $\lambda$  e  $a$  como valores fixos (valores tabelados), para se obterem valores de  $L$  com ajustes gráficos e comparar com os valores medidos com a fita métrica.

$L_{\text{medido}} (\pm 0.01 \text{ cm})$	$L_{\text{ajuste}} (\text{cm})$	Diferença (%)
30.5	$29.3 \pm 0.1$	3.9
35.5	$34.2 \pm 0.1$	3.7
40.5	$39.5 \pm 0.1$	2.5
45.5	$43.9 \pm 0.1$	3.5
50.5	$49.5 \pm 0.1$	2.0
52.5	$51.3 \pm 0.1$	2.3

Chega-se uma discrepância média de 3.0% entre os valores medido em laboratório e os valores dos ajustes, sendo a diferença maior, como expectável, para os casos em que os erros experimentais de  $\lambda$  e  $a$  são maiores. Estará confirmada, assim, a principal fonte de erro sistemático. Todo este procedimento foi repetido para a rede de difração de 80 linhas/mm, tendo-se chegado a conclusões análogas às anteriores. Os dados encontram-se na Tabela 2, em anexo. Com o intuito de evitar repetir informação análoga, serão apenas apresentados dois dos ajustes gráficos obtidos e os valores obtidos para  $a$ , assim como os erros associados às medições de  $L$ .

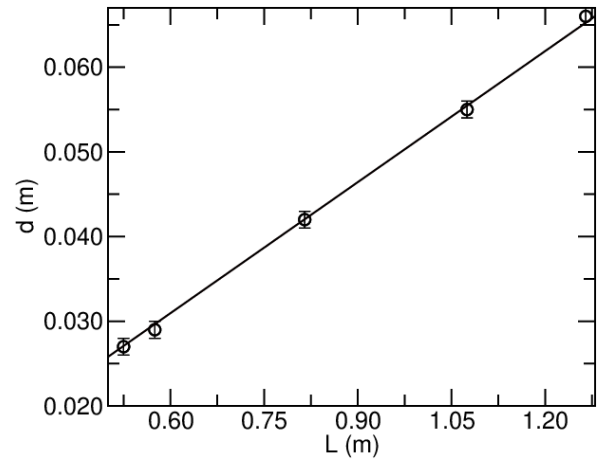


Figura 3: Distâncias dos máximos de ordem  $n=1$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$ , para a rede de difração de 80 linhas/mm.

Os valores obtidos foram:

n	$a (\times 10^{-5} \text{ m})$	Incerteza relativa (%)
1	$1.23 \pm 0.01$	0.3
2	$1.23 \pm 0.01$	0.3
3	$1.23 \pm 0.01$	0.3
4	$1.23 \pm 0.01$	0.3
5	$1.23 \pm 0.01$	0.3
6	$1.24 \pm 0.01$	0.3

O valor médio é  $a = (1.23 \pm 0.01) \times 10^{-5} \text{ m}$ , de incerteza relativa 0.8%, e de erro experimental 1.6% (por defeito), visto que, para esta rede de difração,  $a_{\text{tabelado}} = 1.25 \times 10^{-5} \text{ m}$ .

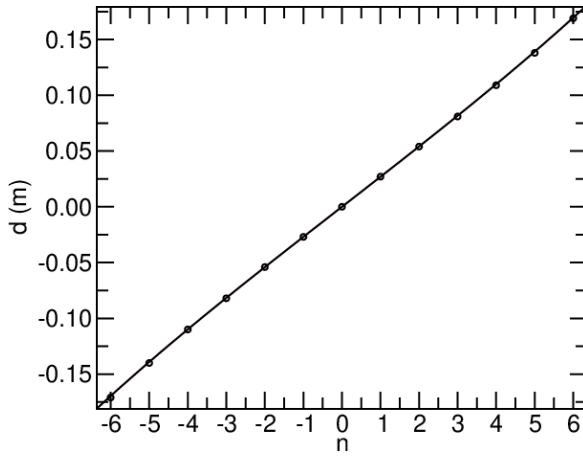


Figura 4: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 80 linhas/mm e  $L = (52.5 \pm 0.01) \text{ cm}$ .

Os valores de  $L$  obtidos por ajustes gráficos foram:

$L_{\text{medido}} (\pm 0.01 \text{ cm})$	$L_{\text{ajuste}} (\text{cm})$	Diferença (%)
52.5	$53.2 \pm 0.1$	1.3
57.5	$57.6 \pm 0.1$	0.2
81.5	$82.6 \pm 0.1$	1.3
107.5	$109 \pm 1$	1.4
126.5	$129 \pm 1$	2.0

Constata-se uma diferença média de 1.2%, mas, agora, por excesso, o que vem de acordo com os valores de  $c$  positivos que se obtinham para gráficos  $d(L)$  da rede de 80 linhas/mm. Assim, embora os erros sistemáticos tenham a mesma origem (provêm da medição de  $L$ ), são por defeito para a rede de 300 linhas/mm e por excesso para a rede de 80 linhas/mm. Isto será analisado na Discussão dos Resultados.

## 1.2 Fendas simples e fenda dupla

O procedimento nesta secção é bastante semelhante ao aplicado às redes de difração. Porém, para as

fendas simples, registaram-se as posições de mínimos. Decidiu-se medir apenas para mínimos de ordem  $n=1$ , e para diferentes distâncias  $L$ . Os dados encontram-se em anexo (Tabela 3). Recorrendo à Eq. 12, consegue-se determinar o valor de  $S$  da fenda simples. Utilizou-se o valor tabelado do comprimento de onda. Não é possível avaliar a exatidão do valor de  $S$  obtido, visto que não existe valor tabelado do mesmo. Também para estas medidas foi utilizado o método dos mínimos quadrados implementado no Fitteia.

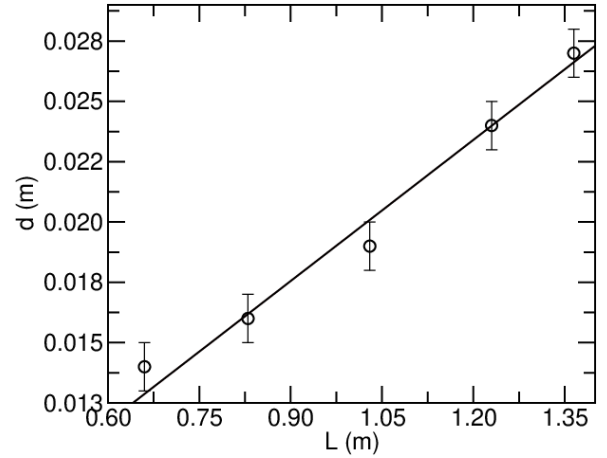


Figura 5: Gráfico da distância do mínimo de ordem  $n=1$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$  para a fenda simples A.

Havendo 5 pontos experimentais e 1 parâmetro livre e tendo em conta que  $\chi^2 = 2.63484$ , conclui-se que o ajuste é bom. Obteve-se  $S = (3.25 \pm 0.07) \times 10^{-5} \text{ m}$  (incerteza relativa percentual 2.2%).

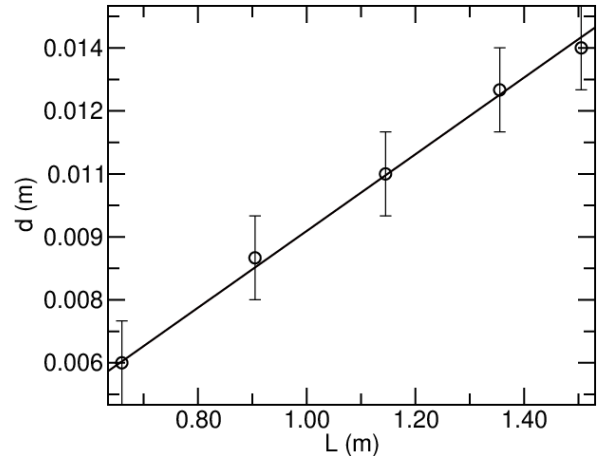


Figura 6: Gráfico da distância do mínimo de ordem  $n=1$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$  para a fenda simples B.

Neste caso,  $\chi^2 = 2.63484$ , pelo que o ajuste foi bom, e tem-se  $S = (6.93 \pm 0.29) \times 10^{-5} \text{ m}$  (incerteza relativa

percentual 4.2%).

Para a fenda dupla, mediram-se as posições de máximos de diferentes ordens, para três distâncias  $L$  diferentes. Tendo em conta o elevado número de ordens  $n$ , apenas se fizeram ajustes para  $d$  em função de  $n$ . A equação de ajuste é a Eq.11. Não havendo valor tabelado para  $a$ , decidiu-se manter  $\lambda$  no respetivo valor tabelado. A partir dos valores de  $a$  obtidos, então, fizeram-se novos ajustes de forma a determinar  $\lambda$ .

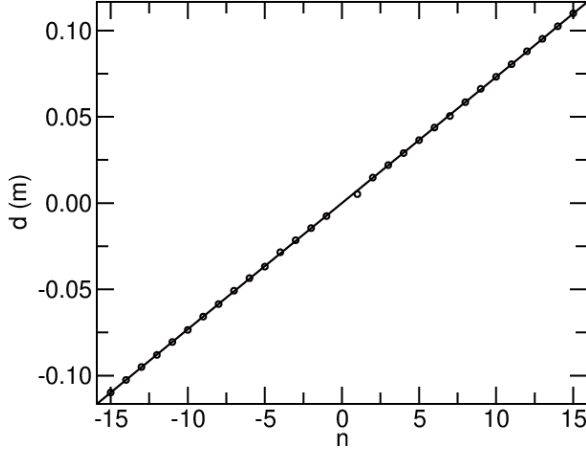


Figura 7: Gráfico das distâncias dos máximos ao centro do referencial em função de  $n$ , para a fenda dupla D e para  $L = (149.0 \pm 0.2)$  cm.

Obteve-se  $a = (1.29 \pm 0.01) \times 10^{-4}$  m, de incerteza relativa 0.8%. A partir deste resultado, obteve-se  $\lambda = (6.32 \pm 0.03) \times 10^{-7}$  m, de incerteza 0.5% e erro experimental 0.1%.

O restante ajuste gráfico encontra-se em anexo (Fig. 17). Em ambos, obtiveram-se valores de  $\chi^2$  bastante baixos, que permitiram confirmar a qualidade dos ajustes. Para  $L = (159.0 \pm 0.2)$  cm, obteve-se  $a = (1.28 \pm 0.01) \times 10^{-4}$  m e  $\lambda = (6.35 \pm 0.03) \times 10^{-7}$  m, de incertezas 0.8% e 0.5%, respetivamente.

Fazendo a média para os dois casos, chega-se a  $a = (1.28 \pm 0.01) \times 10^{-4}$  m e  $\lambda = (6.34 \pm 0.03) \times 10^{-7}$  m, que difere em 0.2% face ao valor tabelado. Conseguiu-se obter um valor bastante exato, o que seria de esperar tendo em conta a correção que se fez, em laboratório, ao medir as distâncias  $L$  para a fenda dupla (e que será discutida posteriormente).

## IV Difração de Micro-ondas

Movimentando o recetor na calha, começou-se por determinar a distância às placas que maximizava a intensidade das micro-ondas emitidas (ondas estacionárias), captadas em  $\theta = 0^\circ$ , como sendo  $L = (50.9 \pm 0.1)$  cm. Em seguida, seguindo o procedimento já apresentado, registou-se a intensidade da corrente

no amperímetro do recetor para diferentes valores do ângulo  $\theta$  entre o recetor e a respetiva posição inicial. Devido aos fatores-escala que se utilizam para a leitura dos valores no amperímetro, deve fazer-se o gráfico de  $I$  normalizado por  $I_0$  (intensidade medida em  $\theta = 0^\circ$ ), de acordo com a equação:

$$\frac{I(\theta)}{I_0} = \left( \frac{\sin(u)}{u} \right)^2 (\cos(v))^2 \quad (13)$$

A qual se obtém diretamente da Eq. 3. Os valores de  $u$  e  $v$  são dados, respetivamente, por 4 e 5.

Mediram-se também com uma craveira os seguintes valores:  $S = (1.970 \pm 0.002)$  cm, o tamanho de cada fenda;  $a = (10.960 \pm 0.004)$  cm, a distância entre as fendas. Também para estas medidas foi utilizado o método dos mínimos quadrados implementado no Fit-teia. O ajuste gráfico obtido foi o seguinte:

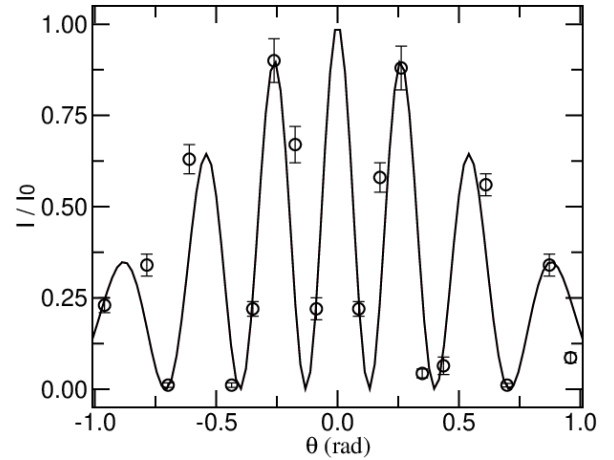


Figura 8: Intensidade normalizada das micro-ondas em função da posição angular do recetor de ondas.

Obteve-se para o comprimento de onda o valor  $\lambda = (2.854 \pm 0.004) \times 10^{-2}$  m, de incerteza relativa percentual 0.1%, pelo que este apresenta uma elevada precisão. Ora, a frequência das micro-ondas emitida é, de acordo com as informações do aparelho,  $f = 10.5$  GHz. Recorrendo à equação  $c = \lambda f$ , na qual  $c = 3 \times 10^8$  m/s é a velocidade da luz, obtém-se, como valor verdadeiro,  $\lambda_{\text{tabelado}} = 2.857 \times 10^{-2}$  m. Desta forma, o erro experimental do comprimento de onda obtido é 0.1%, pelo que o resultado é bastante exato.

## V Reflexão de Micro-ondas

Aproveitando a montagem experimental anterior, procurou-se estudar a intensidade das ondas refletidas pelas placas metálicas. Para isso, rodou-se o recetor de micro-ondas em ângulos superiores a  $90^\circ$  face ao ângulo  $\theta_0$  da secção experimental anterior. Considera-se, para esta nova secção experimental, o ângulo de  $0^\circ$  como

o ângulo no qual o recetor se encontrava paralelo às placas metálicas. As placas metálicas permaneceram perpendiculares ao emissor e o sentido de rotação do recetor é considerado como o sentido positivo. É de notar que apenas se realizaram medições para um sentido de rotação, porque a área de trabalho impossibilitava a rotação do suporte do recetor no outro sentido, para estudo de ondas refletidas. A distância do suporte do recetor, medida na calha, continuou a ser de  $L = (50.9 \pm 0.1)$  cm. Os resultados apresentam-se nas Tabelas 6 e 7, em anexo.

Em primeiro lugar, estudaram-se as ondas refletidas mantendo as placas metálicas afastadas, tal como se encontravam na secção anterior. Em segundo lugar, estudaram-se as ondas refletidas com as placas metálicas juntas, isto é, sem haver difração.

É possível observar que, em geral, a intensidade das ondas refletidas, quando há difração, é maior, comparativamente a quando se juntam as chapas. Isto poderá dever-se ao facto de que, sem difração, as ondas refletidas serem mais direccionais, ou seja, bastante mais predominantes no ângulo igual ao ângulo de incidência (Lei de Reflexão), que, nestes casos, era nulo. Contrariamente, havendo difração, ocorrerá um maior "espalhamento" das ondas, mesmo que refletidas. Logo, medir-se-ão micro-ondas de maior intensidade. Além disso, o laboratório não se trata de um ambiente controlado, pelo que as micro-ondas, devido às suas características, se difratam e refletem em diversos pontos da sala. É também de apontar que havia sido observado, com a luz laser, que a luz refletida na parede pelas fendas era mais intensa do que a onda refratada, o que se encontra em concordância com as medidas efetuadas para as micro-ondas: as ondas refletidas (para uma mesma sensibilidade do amperímetro) eram mais intensas do que as micro-ondas estudadas na secção anterior.

Por fim, rodou-se o suporte das placas metálicas de forma a variar o ângulo de incidência das micro-ondas nas mesmas, e verificou-se que a intensidade medida no recetor era máxima quando o ângulo entre o emissor e as placas era o mesmo que o ângulo entre o recetor e as placas; isto corrobora o facto de a reflexão ocorrer sobretudo segundo um ângulo que é igual ao ângulo de incidência, pela Lei da Reflexão.

## VI Discussão dos resultados e conclusão

Fazendo a média dos valores finais do comprimento de onda obtidos com a rede de difração de 300 linhas/mm e com a fenda dupla, chega-se a  $\lambda_{laser} = (6.32 \pm 0.07) \times 10^{-7}$  m, de incerteza relativa 1.1% e erro

experimental 0.1%. Verifica-se que este valor é bastante preciso e exato. Obteve-se ainda um valor corrigido de  $a = (3.30 \pm 0.04) \times 10^{-6}$  m para a rede de difração de 300 linhas/mm, de erro experimental 1.0%. Para a rede de 800 linhas/mm, obteve-se  $a = (1.23 \pm 0.01) \times 10^{-5}$  m, de erro experimental 1.6%.

Deste modo, a correção efetuada com  $c$  foi significativa. Além disso, também foi importante a correção que se fez no alinhamento do laser aquando das medições com a fenda dupla. Até então, crê-se que a luz laser não estaria alinhada idealmente. É necessário fazer com que a luz refletida pela rede ou fenda o seja de forma a garantir a exata perpendicularidade entre a luz emitida e a rede de difração ou fenda. Havendo um certo desajuste, os valores de  $L$  medidos não representarão a distância real percorrida pelo feixe depois de atravessar as fendas, o que afetará a exatidão dos resultados finais. É também de notar que à medição de  $L$  em laboratório estão inerentes erros aleatórios associados à utilização de uma fita métrica e não de uma calha graduada, por exemplo.

Por outro lado, a recolha das medidas no padrão de difração é dificultada pela pouca acessibilidade ao alvo. Deste modo, estarão presentes erros de paralaxe. Porém, estes erros não terão sido significativos, tendo em contas os baixos erros relativos que se obtiveram.

Não havendo valores tabelados para  $S$  e  $a$  das fendas simples e dupla, não é possível avaliar as respetivas exatidões, embora se verifiquem elevadas precisões, tal como ao longo de toda a experiência.

Para as micro-ondas, chegou-se a um valor de  $\lambda$  bastante exato e preciso, o que indica a pouca influência de erros aleatórios e sistemáticos nesta parte da experiência. Poder-se-á apontar como eventual erro sistemático o desalinhamento das chapas, o qual se faz de forma mais grosseira que o alinhamento do recetor (com uma escala circular), embora tenha sido usado um esquadro para o tentar evitar.

Foi também possível captar micro-ondas refletidas, com maior intensidade no caso das chapas se encontrarem afastadas. Sendo o comprimento de onda da ordem de grandeza de  $10^{-2}$  m, facilmente são refletidas e difratadas em diferentes pontos do laboratório, ao contrário de uma luz laser, bastante mais dirigida, com um comprimento de onda em 4 ordens de grandeza inferior.

## Referências

- [1] Sebastião P., Difração de Ondas Eletromagnéticas e de Eletrões (T3), *Guia dos Trabalhos Experimentais*, Departamento de Física (IST), Lisboa, 2020.

## VII Anexos

### I Tabelas

**Tabela 1:** Posições dos máximos relativos à rede de difração de 300 linhas/mm

L ( $\pm 0.1$ cm)	Ordem n do máximo	d ( $\pm 0.1$ cm)
30.5	-4	-34.4
	-3	-20.6
	-2	-12.2
	-1	-5.7
	1	5.7
	2	12.1
	3	20.4
	4	34.1
35.5	-4	-40.8
	-3	-24.1
	-2	-14.2
	-1	-6.7
	1	6.7
	2	14.1
	3	23.3
	4	39.1
40.5	-4	-46.2
	-3	-27.5
	-2	-16.3
	-1	-7.7
	1	7.7
	2	16.3
	3	27.5
	4	46.0
45.5	-4	-51.0
	-3	-31.0
	-2	-18.4
	-1	-8.6
	1	8.6
	2	18.4
	3	31.0
	4	51.0
50.5	-4	-57.9
	-3	-34.7
	-2	-20.6
	-1	-9.7
	1	9.7
	2	20.5
	3	34.5
	4	57.7
52.5	-4	-60.0
	-3	-36.0
	-2	-21.3
	-1	-10.0
	1	10.0
	2	21.2
	3	35.7
	4	59.7



**Tabela 2:** Posições dos máximos relativos à rede de difração de 80 linhas/mm

L ( $\pm 0.1$ cm)	Ordem n do máximo	d ( $\pm 0.1$ cm)
52.5	-6	-17.1
	-5	-14.0
	-4	-11.0
	-3	-8.2
	-2	-5.4
	-1	-2.7
	1	2.7
	2	5.4
	3	8.1
	4	10.9
	5	13.8
	6	16.9
57.5	-6	-18.4
	-5	-15.1
	-4	-11.9
	-3	-8.8
	-2	-5.8
	-1	-2.9
	1	2.9
	2	5.8
	3	8.8
	4	11.9
	5	15.1
	6	18.5
81.5	-6	-26.4
	-5	-21.7
	-4	-17.1
	-3	-12.7
	-2	-8.4
	-1	-4.2
	1	4.2
	2	8.4
	3	12.7
	4	17.1
	5	21.6
	6	26.3
107.5	-6	-34.6
	-5	-28.5
	-4	-22.4
	-3	-16.7
	-2	-11.1
	-1	-5.5
	1	5.5
	2	11.1
	3	16.8
	4	22.6
	5	28.6
	6	34.8

L ( $\pm 0.1$ cm)	Ordem n do máximo	d ( $\pm 0.1$ cm)
126.5	-5	-33.8
	-4	-26.8
	-3	-19.8
	-2	-13.1
	-1	-6.6
	1	6.6
	2	13.1
	3	19.8
	4	26.8
	5	33.8

**Tabela 3:** Posições dos máximos de ordem  $n = 1$  para as fendas simples A e B

Fenda	L ( $\pm 0.2$ cm)	d ( $\pm 0.10$ cm)
A	66.0	1.40
	83.0	1.60
	103.0	1.90
	123.0	2.40
	136.5	2.70
B	66.0	0.60
	90.5	0.85
	114.5	1.05
	135.5	1.25
	150.5	1.35

**Tabela 4:** Posições dos máximos e mínimos para a fenda dupla D

L ( $\pm 0.2$ cm)	Ordem n	d <sub>max</sub> ( $\pm 0.20$ cm)	d <sub>min</sub> ( $\pm 0.20$ cm)
149.0	-15	-10.98	-10.62
	-14	-10.25	-9.88
	-13	-9.50	-9.15
	-12	-8.80	-8.42
	-11	-8.05	-7.72
	-10	-7.35	-6.95
	-9	-6.58	-6.22
	-8	-5.85	-5.45
	-7	-5.08	-4.72
	-6	-4.35	-3.98
	-5	-3.68	-3.28
	-4	-2.85	-2.52
	-3	-2.15	-1.80
	-2	-1.45	-1.12
	-1	-0.75	-0.22
	1	0.52	0.22
	2	1.48	1.10
	3	2.20	1.82
	4	2.90	2.60
	5	3.65	3.28
	6	4.38	4.00
	7	5.05	4.70
	8	5.85	5.45
	9	6.62	6.25
	10	7.32	6.98
	11	8.05	7.70
	12	8.80	8.42
	13	9.52	9.15
	14	10.25	9.90
	15	11.00	10.62

L ( $\pm 0.2$ cm)	Ordem n	d <sub>max</sub> ( $\pm 0.20$ cm)	d <sub>min</sub> ( $\pm 0.20$ cm)
159.0	-15	-11.70	-11.32
	-14	-10.92	-10.55
	-13	-10.18	-9.72
	-12	-9.30	-8.95
	-11	-8.60	-8.20
	-10	-7.80	-7.45
	-9	-7.05	-6.68
	-8	-6.28	-5.88
	-7	-5.50	-5.12
	-6	-4.72	-4.32
	-5	-3.95	-3.52
	-4	-3.12	-2.75
	-3	-2.35	-2.00
	-2	-1.62	-1.22
	-1	-0.78	-0.22
	1	0.78	0.25
	2	1.55	1.18
	3	2.40	1.95
	4	3.20	2.80
	5	3.98	3.60
	6	4.72	4.35
	7	5.52	5.12
	8	6.35	5.95
	9	7.05	6.70
	10	7.88	7.48
	11	8.60	8.25
	12	9.40	9.00
	13	10.28	9.82
	14	11.00	10.65
	15	11.80	11.40

**Tabela 5:** Intensidade das micro-ondas difratadas

$\theta$ ( $\pm 0.1^\circ$ )	I (mA)	$\delta I$ (mA)	I/I <sub>0</sub>	$\delta(I/I_0)$
-55.0	0.21	0.01	0.23	0.02
-45.0	0.32	0.01	0.34	0.03
-40.0	0.01	0.01	0.011	0.006
-35.0	0.59	0.01	0.63	0.04
-25.0	0.01	0.01	0.011	0.006
-20.0	0.21	0.01	0.22	0.02
-15.0	0.84	0.02	0.90	0.06
-10.0	0.62	0.02	0.67	0.05
-5.0	0.20	0.02	0.22	0.03
5.0	0.20	0.01	0.22	0.02
10.0	0.54	0.01	0.58	0.04
15.0	0.82	0.02	0.88	0.06
20.0	0.04	0.01	0.043	0.012
25.0	0.06	0.02	0.064	0.024
35.0	0.52	0.01	0.56	0.03
40.0	0.01	0.01	0.011	0.005
50.0	0.32	0.01	0.34	0.03
55.0	0.08	0.01	0.086	0.014

**Tabela 6:** Intensidade das micro-ondas refletidas havendo difração

$\theta (\pm 0.1^\circ)$	I (mA)	$\delta I$ (mA)	$I/I_0$	$\delta(I/I_0)$
10.0	1.32	0.03	1.0	0.1
15.0	0.66	0.03	0.50	0.03
20.0	0.68	0.01	0.52	0.02
25.0	0.28	0.01	0.21	0.01
30.0	0.88	0.02	0.67	0.03
35.0	0.02	0.01	0.015	0.008
40.0	0.04	0.01	0.030	0.008
45.0	0.06	0.01	0.045	0.009
50.0	0.10	0.01	0.076	0.009
55.0	0.08	0.01	0.061	0.009

**Tabela 7:** Intensidade das micro-ondas refletidas sem ocorrer difração

$\theta (\pm 0.1^\circ)$	I (mA)	$\delta I$ (mA)	$I/I_0$	$\delta(I/I_0)$
10.0	4.40	0.10	1.0	0.1
15.0	2.60	0.30	0.59	0.08
20.0	1.57	0.07	0.36	0.02
25.0	1.40	0.07	0.32	0.02
30.0	0.67	0.07	0.15	0.02
35.0	0.02	0.01	0.0045	0.0024
40.0	0.14	0.02	0.032	0.005
50.0	0.02	0.01	0.0045	0.024

## II Gráficos

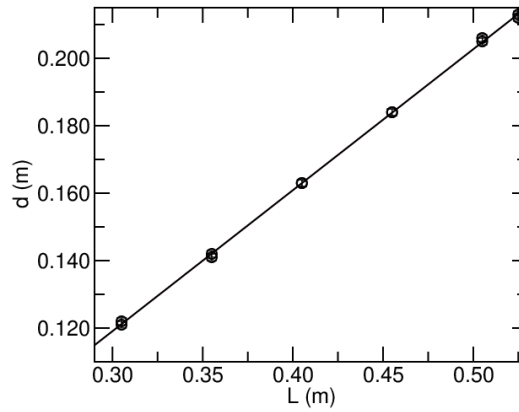


Figura 9: Distâncias dos máximos de ordem  $n=2$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm.

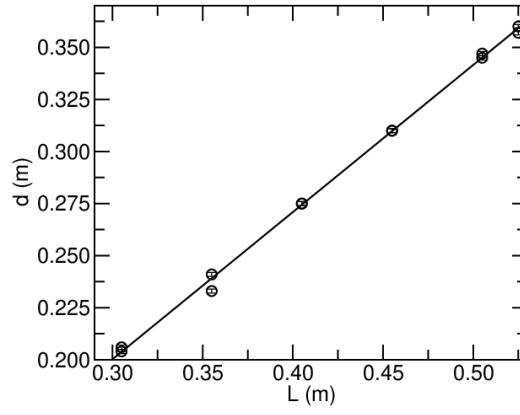


Figura 10: Distâncias dos máximos de ordem  $n=3$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm.

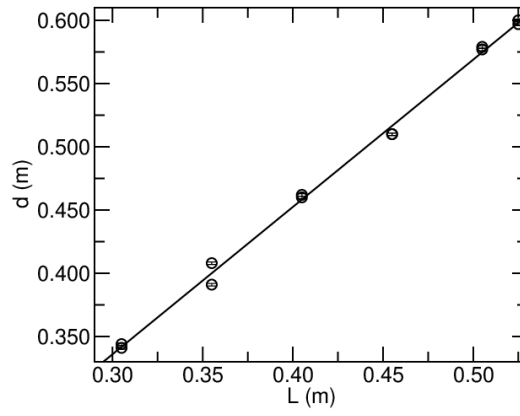


Figura 11: Distâncias dos máximos de ordem  $n=4$  ao centro do padrão de difração em função de  $L$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm.

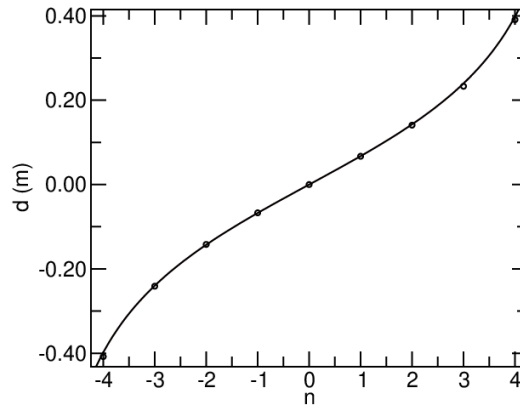


Figura 12: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm e  $L = (35.5 \pm 0.01)$  cm.

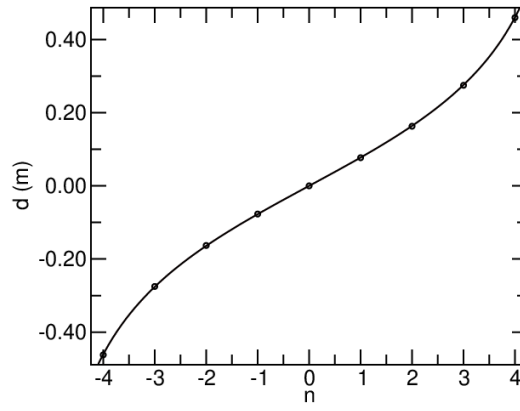


Figura 13: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm e  $L = (40.5 \pm 0.01)$  cm.

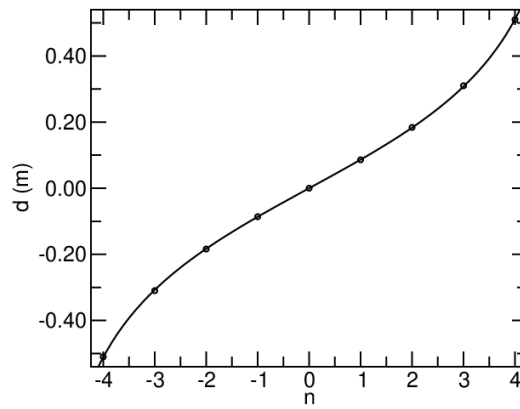


Figura 14: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm e  $L = (45.5 \pm 0.01)$  cm.

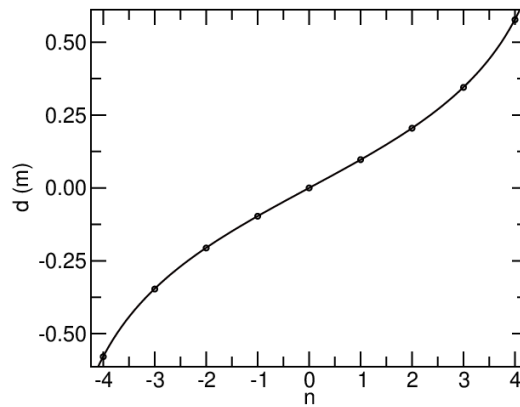


Figura 15: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm e  $L = (50.5 \pm 0.01)$  cm.

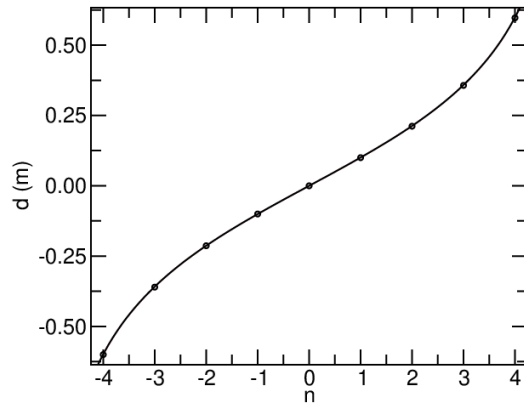


Figura 16: Distâncias dos máximos ao centro do padrão de difração em função de  $n$ , para a rede de difração de 300 linhas/mm e  $L = (52.5 \pm 0.01)$  cm.

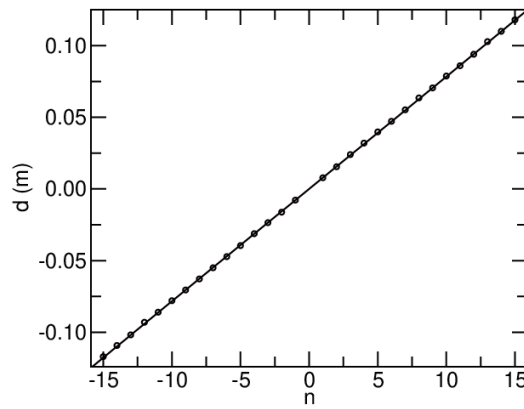


Figura 17: Gráfico das distâncias dos máximos ao centro do referencial em função de  $n$ , para a fenda dupla D e para  $L = (159.0 \pm 0.2)$  cm.