

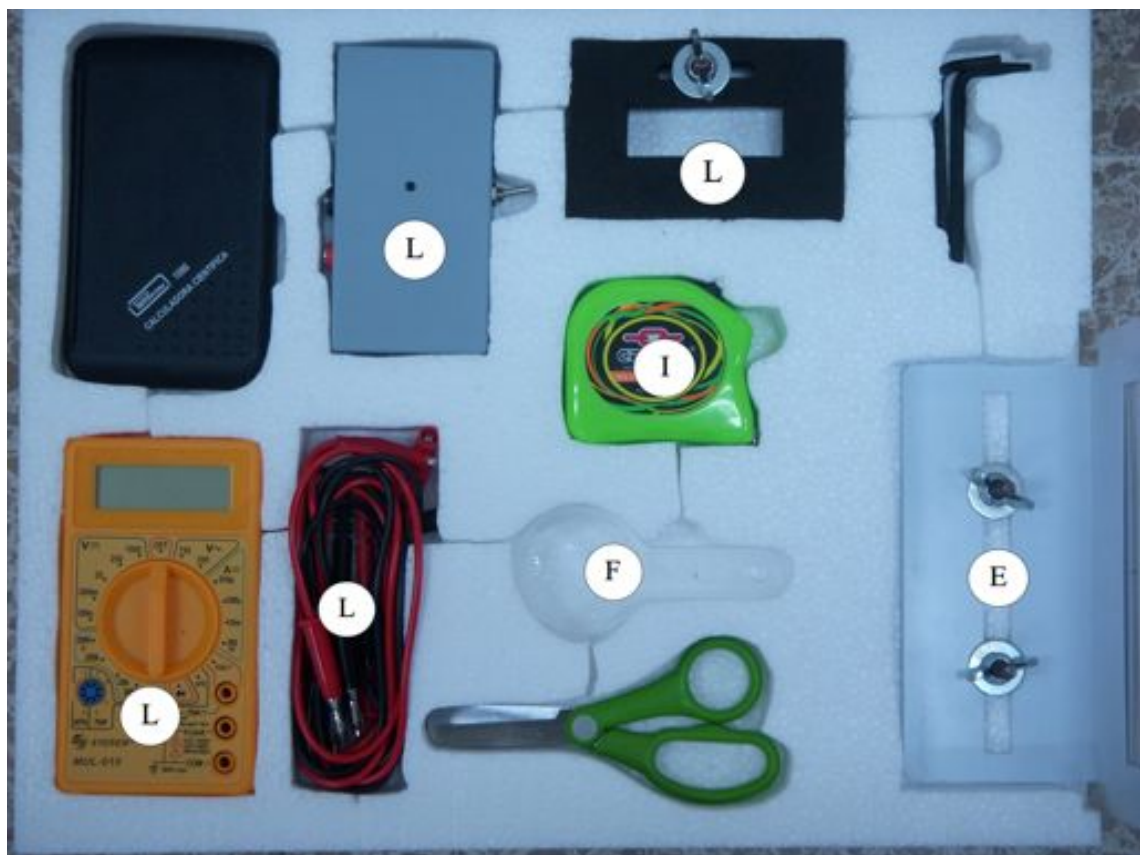
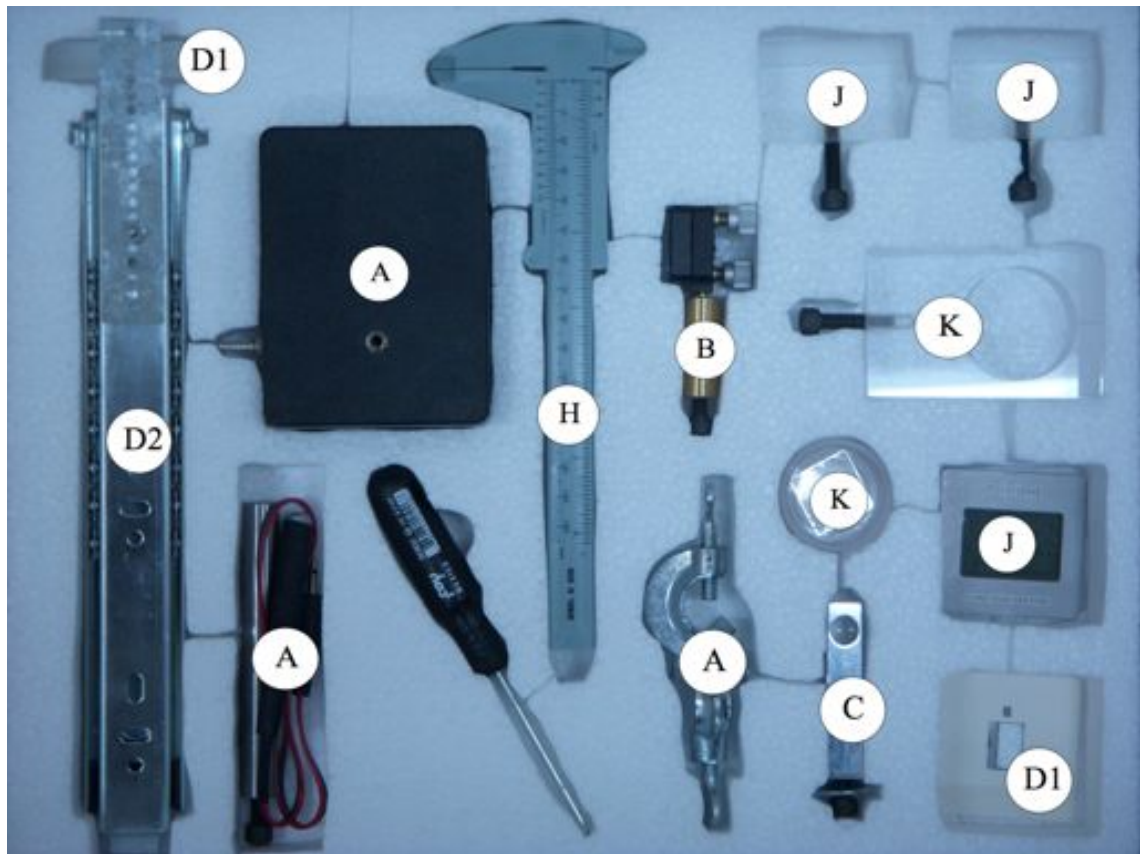
IPhO2009

Prova Experimental *Quarta-feira, 15 de Julho de 2009*

A prova experimental desta Olimpíada consiste em dois problemas. O objectivo do Problema 1 é medir o comprimento de onda de um díodo LASER e o do Problema 2 é estudar a birrefringência da mica.

Por favor, ler estas instruções antes de iniciar a prova:

1. O tempo disponível para a prova experimental é de 5 horas.
2. Utilizar apenas as canetas fornecidas.
3. Utilizar apenas o lado da frente das folhas.
4. Cada problema é apresentada numa **Folha de Questões**, assinalada com um **Q** no canto superior esquerdo.
5. Transcrever *sempre* para a **Folha de Respostas** o sumário dos resultados que obteve. Esta folha está indicada com um **A** no canto superior esquerdo.
6. Serão também fornecidas **folhas de papel em branco**, identificadas com um **W** no canto superior esquerdo.
7. Indicar sempre, no topo das **Folhas de Respostas** e das **folhas em branco**, o problema que está a resolver: **Problem Number 1** (ou 2).
8. Escrever nas folhas em branco tudo o que considerar relevante para a resolução da questão. Por favor, utilizar o *mínimo de texto*; deverá procurar exprimir-se sobretudo com equações, números, figuras e gráficos.
9. Para cada problema, preencher as caixas no topo de cada folha de papel que utilizar (Q, A e W) com o seu número de estudante (**Student Number**), o número de página (**Page No.**) e ainda o número total de folhas usadas (**Total No. of pages**). Se usar folhas de rascunho que não deseje que sejam corrigidas, não as destrua: marque-as com uma grande cruz sobre a folha e **não** as inclua na sua numeração.
10. No final da prova, ordenar as folhas de cada problema *pela seguinte ordem*: folha de respostas (incluindo o papel milimétrico utilizado), folhas utilizadas (ordenadas), folhas de rascunho, folhas não utilizadas e enunciado da prova. Colocar depois os conjuntos de folhas de cada problema no envelope respectivo e deixar tudo sobre a mesa. **Não é permitido retirar da sala quaisquer folhas de papel nem qualquer peça do equipamento.**
11. O material necessário para as experiências está empacotado em **duas** camadas (**dois** blocos de esferovite), uma sobre a outra. As fotografias das duas camadas encontram-se na próxima página, estando algumas das peças etiquetadas. Verificar se todo o material necessário se encontra na caixa. **Se, durante a prova, algum dos dispositivos deixar de funcionar correctamente, por favor peça a sua substituição.**



DÍODO LASER E ESPELHO MÓVEL

Em ambas as provas será necessário um díodo LASER, o seu suporte e fonte de alimentação, e um espelho montado numa plataforma ajustável mecanicamente.

Recomenda-se que o LASER e o espelho sejam montados como se indica na Figura 0 antes de seleccionar o problema que resolverá primeiro. Utilizar o seguinte material:

- 1) Mesa óptica em madeira
- 2) Díodo LASER, incluindo o díodo propriamente dito, um pé de suporte, uma garra em “S” e a fonte de alimentação **(A)**. A primeira fotografia da página seguinte elucida a sua montagem. **NÃO OLHAR DIRECTAMENTE PARA O FEIXE LASER.**
- 3) Um espelho montado numa plataforma mecânica com dois parafusos de ajuste e um pé de suporte **(B)**. A sua montagem está explicada na segunda fotografia da página seguinte. **CUIDADO: montar o pé de suporte na mesa sem tocar no espelho. Remover a protecção de papel do espelho apenas após a sua montagem na mesa.**

Montar os dispositivos como está indicado na Figura 0. O alinhamento do LASER será feito mais tarde. NOTA: embora sejam fornecidas chaves Allen (em forma de L) para apertar os parafusos, todas as peças ficam suficientemente bem apertadas apenas com a mão.

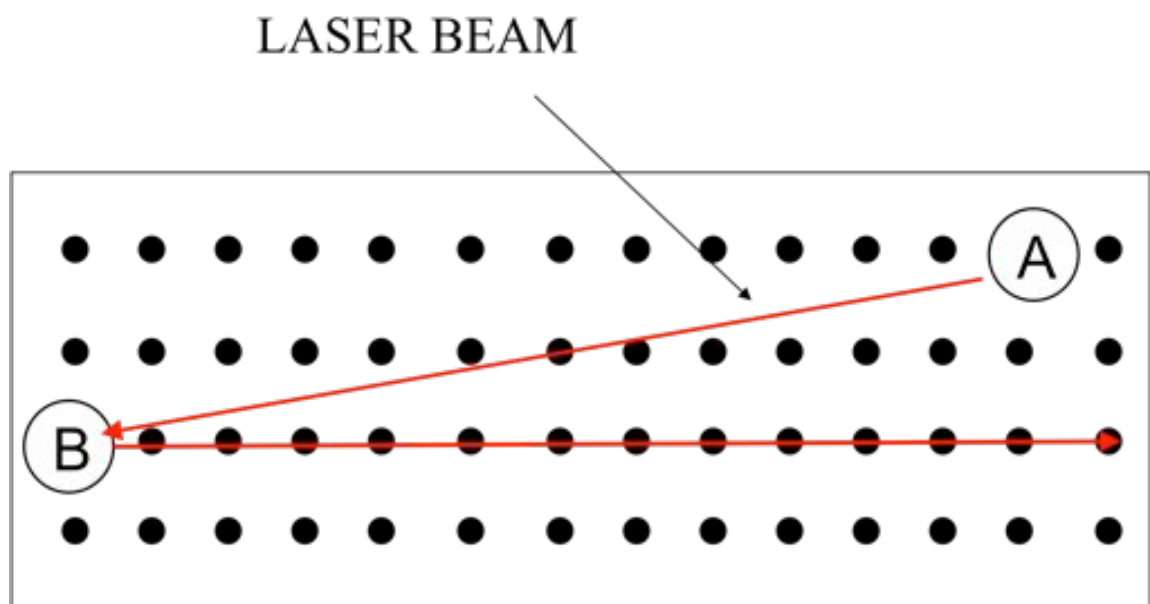
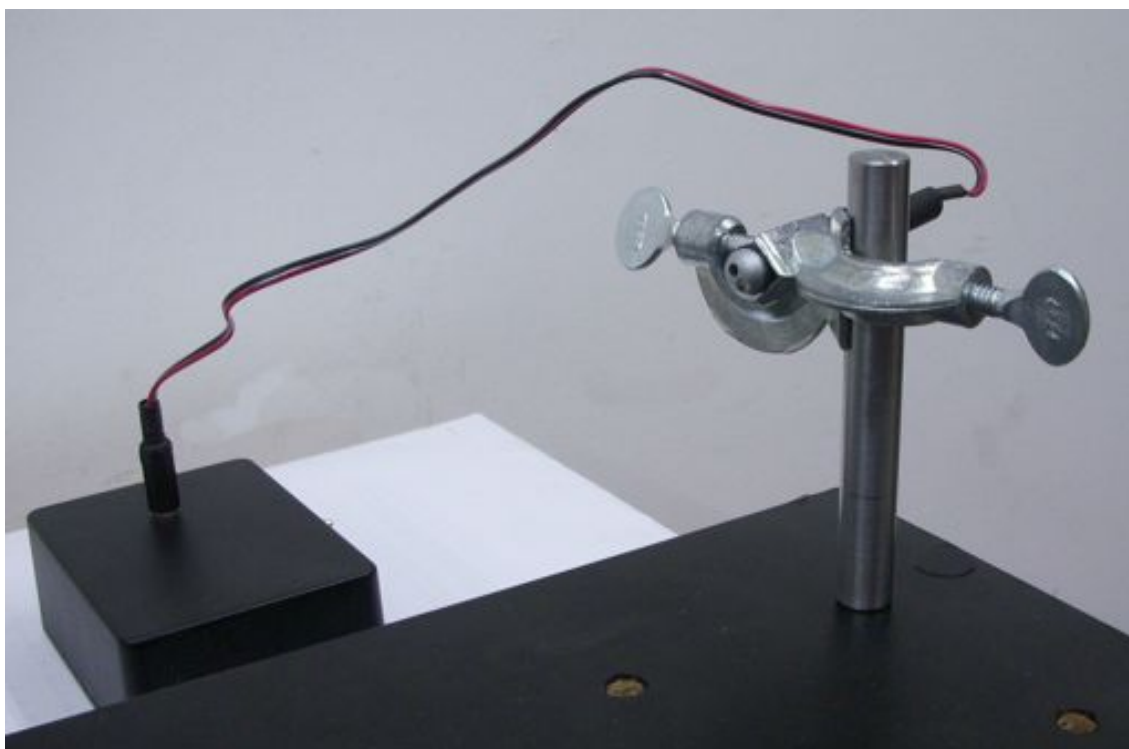


Figura 0. Montagem do LASER e do espelho.



Díodo LASER, pé de suporte, garra em “S” e fonte de alimentação **(A)**.



Espelho montado na plataforma mecânica com dois parafusos de ajuste e pé de suporte **(B)**.

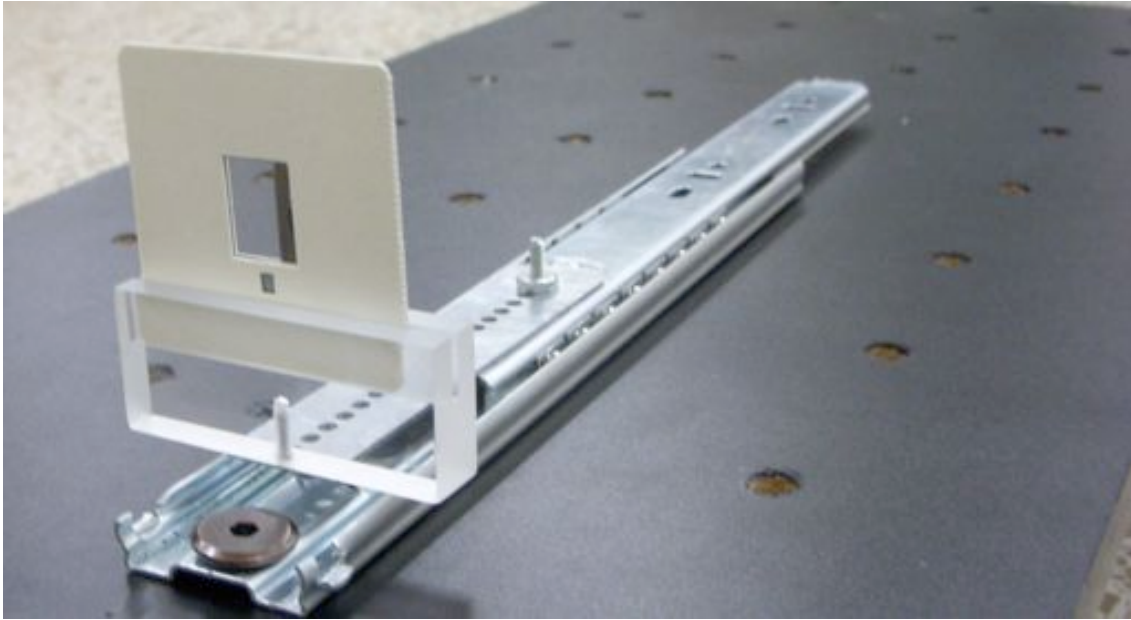
PROBLEMA EXPERIMENTAL 1

DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DE UM DÍODO LASER

MATERIAL

Para além dos itens 1), 2) e 3), utilizar:

- 4) Uma lente montada num suporte de base quadrada (**identificado com a letra C**).
- 5) Uma lâmina de barbear montada numa base de diapositivos (slides), a ser colocada num suporte de acrílico (**D1**), por sua vez montado num suporte deslizante (**D2**). Usar a chave de fendas para apertar o suporte, caso seja necessário. Ver fotografia para instruções de montagem.
- 6) Um écran de observação com uma escala semelhante à de uma craveira (nónio, 1/20 mm) (**E**).
- 7) Uma lupa (**F**).
- 8) Uma régua de 30 cm de comprimento (**G**).
- 9) Craveira (**H**).
- 10) Fita métrica (**I**).
- 11) Calculadora.
- 12) Cartões brancos, fita adesiva, autocolantes, tesoura, conjunto de esquadros.
- 13) Lápis, papel, papel milimétrico.



Lâmina de barbear montada numa base de diapositivos colocada num suporte de acrílico (D1) e montada num suporte deslizante (D2).

DESCRIÇÃO DA EXPERIÊNCIA

O objectivo é determinar o comprimento de onda de um díodo laser. A característica mais marcante desta medida consiste no facto de não se utilizarem escalas micrométricas (tais como redes de difracção pré-fabricadas). Os comprimentos mais pequenos que vão ser medidos são da ordem do milímetro. O comprimento de onda é determinado através da difracção da luz na extremidade aguçada de uma lâmina de barbear.

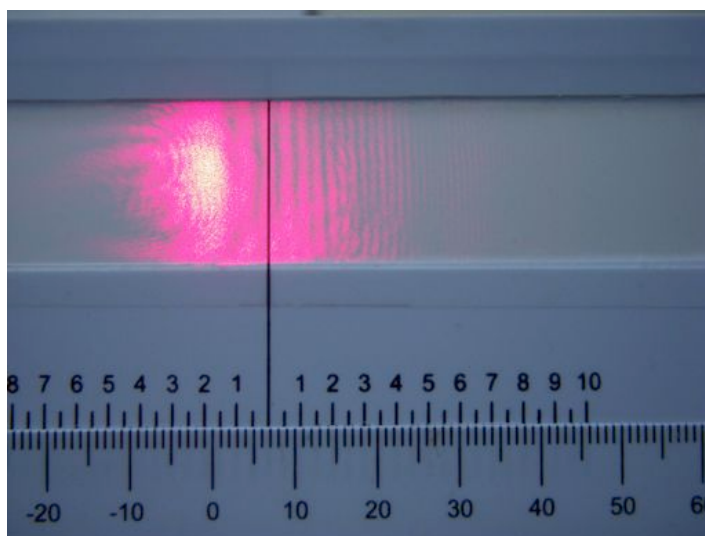


Figura 1.1 Padrão típico de franjas de interferência.

Após a reflexão do feixe laser (**A**) no espelho (**B**), o feixe tem que ser direccionado através de uma lente (**C**), que tem uma distância focal de *alguns centímetros*. É possível assumir que o foco actua como uma fonte pontual de luz, a partir da qual é emitida uma onda esférica. No percurso após atravessar a lente, o feixe laser encontra a extremidade aguçada de uma lâmina de barbear. Este obstáculo vai funcionar como uma fonte de luz que emite uma onda cilíndrica. Estas duas ondas interferem uma com a outra, no percurso subsequente, originando um padrão de difracção que pode ser observado num écran. Ver fotografia de uma padrão típico na Figura 1.1.

Devem ser considerados dois casos importantes, ver Figuras 1.2 e 1.3.

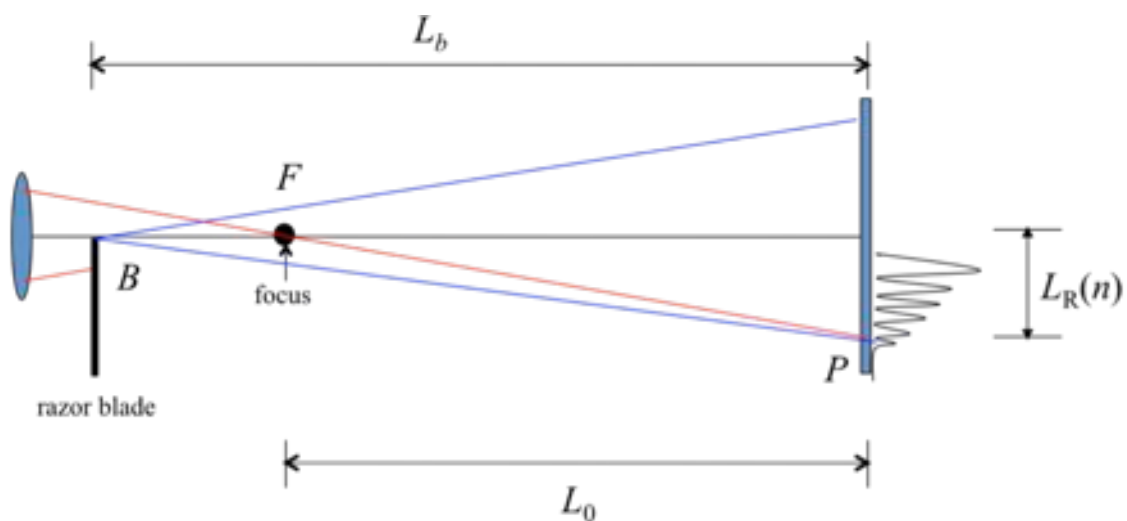


Figura 1.2. Caso (I). A lâmina de barbear (*razor blade*) está colocada *antes* do foco (*focus*) da lente. A figura não se encontra à escala. Nesta figura, B é a extremidade aguçada da lâmina de barbear e F é o foco da lente.

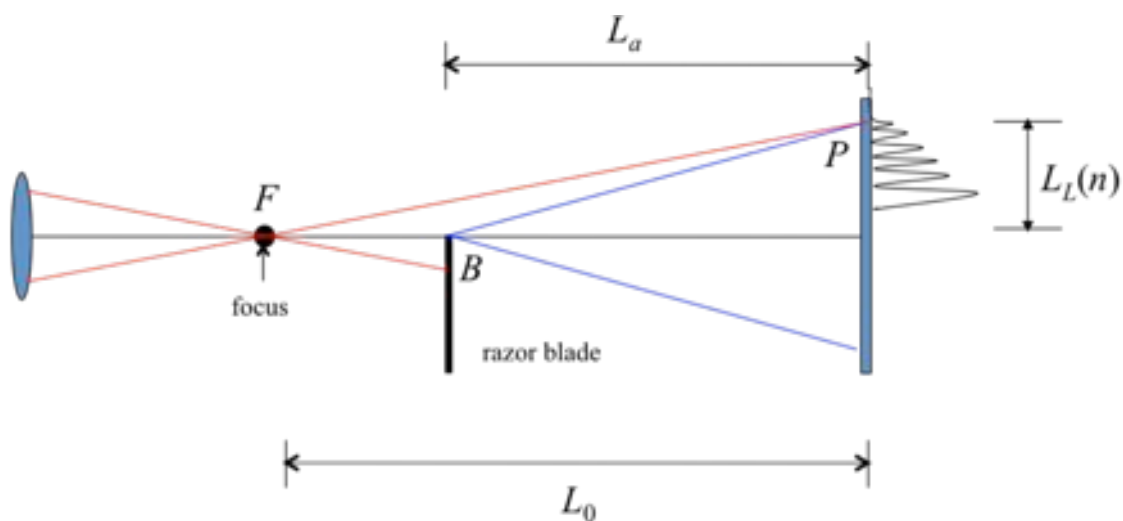


Figura 1.3. Caso (II). A lâmina de barbear está colocada *após* o foco da lente. A figura não se encontra à escala. Nesta figura, B é a extremidade aguçada da lâmina de barbear e F é o foco da lente.

MONTAGEM EXPERIMENTAL

Tarefa 1.1 Montagem experimental (1.0 pontos)

Conceber uma montagem experimental adequada para a obtenção dos padrões de interferência descritos anteriormente. A distância L_0 do foco ao écran deve ser muito maior do que a distância focal.

- Esboçar um diagrama da montagem experimental adoptada no desenho da mesa óptica fornecido. Para tal, escrever a LETRA DE IDENTIFICAÇÃO dos diferentes objectos no desenho da mesa óptica. Podem-se acrescentar desenhos adicionais simples que ajudem a clarificar a montagem.
- O alinhamento do feixe laser pode ser feito utilizando um dos cartões brancos para seguir o percurso do feixe.
- Esboçar o percurso do feixe laser no desenho da mesa óptica e escrever a altura h do feixe, medida a partir da mesa óptica.

ATENÇÃO: Ignorar o padrão circular de maiores dimensões que possa eventualmente aparecer. Trata-se de um efeito devido ao díodo laser.

Perder algum tempo para familiarização com a montagem. Deve ser possível observar cerca de 10 ou mais franjas verticais no écran. As medidas são feitas utilizando as posições das franjas **escuras**. Utilizar a lupa para observar mais claramente a posição das franjas. **A melhor forma de observar as franjas consiste em observar a parte traseira do écran iluminado (E).** Assim, a escala do écran deve ser colocada virada para o exterior da mesa óptica. Com um alinhamento correcto dos instrumentos ópticos, deve ser possível observar ambos os padrões (relativos aos casos I e II) simplesmente fazendo deslizar a lâmina **(D1)** através do suporte deslizante **(D2)**.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Considerar as Figuras 1.2 e 1.3 apresentadas anteriormente. Existem cinco comprimentos básicos a ter em conta:

L_0 : distância do foco ao écran.

L_b : distância da lâmina ao écran, Caso I.

L_a : distância da lâmina ao écran, Caso II.

$L_R(n)$: posição da n -ésima franja **escura**, para o caso I.

$L_L(n)$: posição da n -ésima franja **escura**, para o caso II.

A primeira franja escura, para ambos os casos I e II, é a franja mais larga e corresponde a $n = 0$.

A montagem experimental deve ser tal que $L_R(n) \ll L_0, L_b$ para o caso I, e $L_L(n) \ll L_0, L_a$ para o caso II.

O fenómeno de interferência entre duas ondas deve-se a diferentes percursos ópticos de uma onda originada num ponto comum. Dependendo da diferença de fase, as ondas podem cancelar-se mutuamente (interferência destrutiva), originando franjas escuras; ou as ondas podem reforçar-se (interferência construtiva), originando franjas brilhantes.

Através de uma análise detalhada da interferência das duas ondas, é possível deduzir a seguinte condição para a obtenção de uma franja **escura**, para o caso I:

$$\Delta_I(n) = \left(n + \frac{5}{8}\right)\lambda \quad \text{com } n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

e, para o caso II:

$$\Delta_{II}(n) = \left(n + \frac{7}{8}\right)\lambda \quad \text{com } n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2)$$

onde λ é o comprimento de onda do feixe LASER e Δ_I e Δ_{II} são as diferenças de percurso óptico para cada caso.

A diferença de percursos ópticos para o caso I é

$$\Delta_I(n) = (BF + FP) - BP \quad \text{para cada } n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3)$$

enquanto para o caso II é

$$\Delta_{II}(n) = (FB + BP) - FP \quad \text{para cada } n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.4)$$

Tarefa 1.2 Expressões para as diferenças de percurso óptico (0.5 pontos)

Assumindo $L_R(n) \ll L_0, L_b$ para o caso I e $L_L(n) \ll L_0, L_a$ para o caso II nas equações (1.3) e (1.4) (assegurar que a montagem satisfaz estas condições), escrever expressões aproximadas para $\Delta_I(n)$ e $\Delta_{II}(n)$ em função de $L_0, L_b, L_a, L_R(n)$ e $L_L(n)$. Utilizar a aproximação $(1+x)^r \approx 1+rx$, se $x \ll 1$.

A dificuldade experimental destas expressões reside no facto de $L_0, L_R(n)$ e $L_L(n)$ não poderem ser medidos com precisão: L_0 por não ser fácil determinar a posição do foco da

lente, e $L_R(n)$ e $L_L(n)$ pois a origem a partir do qual são medidos é bastante difícil de determinar devido aos desalinhamentos dos aparelhos ópticos.

No sentido de resolver as dificuldades associadas a $L_R(n)$ e $L_L(n)$, começar por escolher o zero (0) da escala no ecrã (E) como origem de todas as medidas das franjas. Sejam l_{0R} e l_{0L} as posições (desconhecidas) a partir das quais são definidos $L_R(n)$ e $L_L(n)$. Sejam ainda $l_R(n)$ e $l_L(n)$ as posições das franjas medidas a partir da origem (0) adoptada. Temos então

$$L_R(n) = l_R(n) - l_{0R} \quad \text{e} \quad L_L(n) = l_L(n) - l_{0L} \quad (1.5)$$

REALIZAÇÃO DA EXPERIÊNCIA. ANÁLISE DE DADOS.

Tarefa 1.3 Medida das posições das franjas escuras e das posições da lâmina (3.25 pontos)

- Para ambos os casos I e II, medir as posições das franjas escuras $l_R(n)$ e $l_L(n)$ em função do índice da franja, n . Escrever os resultados das medidas na Tabela I; deve utilizar pelo menos 8 medidas para cada caso.
- Indicar também as posições L_b e L_a da lâmina, e indicar o instrumento utilizado na sua medida através da respectiva LETRA DE IDENTIFICAÇÃO.
- **SUGESTÃO IMPORTANTE:** para efeitos de simplificação da análise e no sentido de obter uma melhor precisão, medir *directamente* a distância $d = L_b - L_a$ com maior precisão do que a das medidas de L_b e de L_a ; isto é, não calcule d a partir das medidas de L_b e L_a . Indicar o instrumento utilizado nesta nova medida através da respectiva LETRA DE IDENTIFICAÇÃO.

Incluir as incertezas associadas às medidas.

Tarefa 1.4 Análise dos dados (3.25 pontos)

A partir da informação obtida até agora, é possível determinar l_{0R} e l_{0L} bem como, obviamente, o comprimento de onda λ .

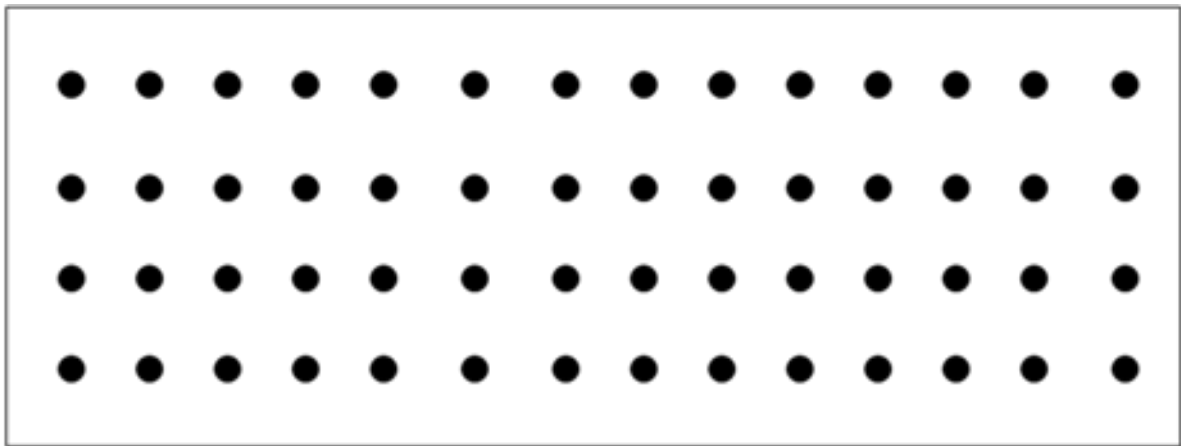
- Estabelecer um procedimento para a obtenção destes valores. Escrever as expressões e/ou equações necessárias.
- Incluir a análise dos erros. Utilizar a Tabela I ou uma outra tabela para indicar os valores determinados; indicar claramente o conteúdo de cada coluna das tabelas.
- Representar graficamente as variáveis em questão. Utilizar o papel milimétrico que é fornecido.
- Escrever os valores calculados para l_{0R} e l_{0L} , com as respectivas incertezas.

Tarefa 1.5 Cálculo de λ (2.0 pontos)

Escrever o valor calculado para λ . Incluir a incerteza e os cálculos efectuados para a sua obtenção. **SUGESTÃO:** Na expressão obtida para λ , onde se encontra $(L_b - L_a)$, substituir por d e utilizar o valor medido directamente.

Folha de Respostas
Problema Experimental No. 1
Determinação do comprimento de onda de um díodo LASER

Tarefa 1.1 Montagem experimental



1.1	Esboçar o percurso do LASER no desenho e anotar a altura h do feixe, medida a partir da mesa $h =$	1.0
-----	---	-----

Tarefa 1.2 Expressões para as diferenças de percurso óptico

1.2		0.5
-----	--	-----

Tarefa 1.3 Medida das posições das franjas escuras e das posições da lâmina.

Utilizar folhas adicionais se necessário.

TABELA I

[illegible]

1.3	<p>Anotar posições da lâmina e letra de identificação dos instrumentos de medida usados:</p> <p>$L_b =$</p> <p>$L_a =$</p> <p>$d = L_b - L_a =$</p>	<p>3.25</p> <p>LETRA:</p> <p>LETRA:</p> <p>LETRA:</p>
-----	---	--

Tarefa 1.4 Análise dos dados

1.4		3.25
-----	--	------

--	--	--

1.4		
-----	--	--

Tarefa 1.5 Cálculo de λ .

1.5	<p>Escrever o valor de λ.</p> <p>$\lambda =$</p>	2
-----	--	---

PROBLEMA EXPERIMENTAL 2

BIRREFRINGÊNCIA DA MICA

Nesta experiência proceder-se-á à medição da birrefringência da mica (um cristal usado frequentemente em polarizadores ópticos).

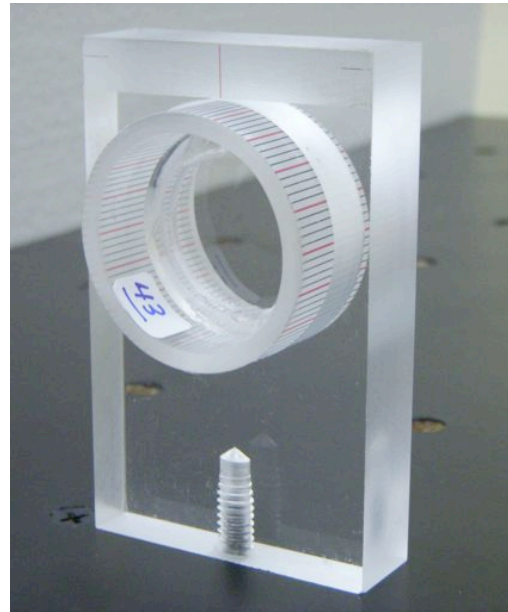
MATERIAL

Para além dos itens 1), 2) e 3), utilizar:

- 14) Dois filmes polarizadores montados em suportes de diapositivos (slides), cada um munido de uma base de acrílico adicional (**J**). Ver a fotografia para instruções de montagem.
- 15) Uma fina placa de mica montada num cilindro de plástico munido de uma escala sem números, bem como de um suporte cilíndrico (**K**). Ver a fotografia para instruções de montagem.
- 16) Dispositivo fotodetector, consistindo de um fotodetector numa caixa de plástico, de fios de ligação e de uma esponja de suporte. Multímetro para medir a tensão do fotodetector (**L**). Ver a fotografia para instruções de montagem e de ligação.
- 17) Calculadora.
- 18) Cartões brancos, fita adesiva, autocolantes, tesoura, esquadros.
- 19) Lápis, papel, papel milimétrico.



Filme polarizador montado num suporte de diapositivos (slides), munido de uma base de acrílico (**J**).



Placa de mica montada num cilindro de plástico munido de uma escala sem números, bem como de um suporte cilíndrico (**K**).



Fotodetector numa caixa de plástico, fios de ligação e esponja de suporte. Multímetro para medir a tensão do fotodetector (L). Estabelecer as ligações conforme indicado.

DESCRIÇÃO DO FENÓMENO

A luz é uma onda electromagnética transversal, em que o campo eléctrico associado oscila no tempo numa direcção perpendicular à direcção de propagação.

Se a direcção de oscilação do campo eléctrico com o tempo permanecer no *mesmo plano*, a luz diz-se linearmente polarizada (por vezes diz-se apenas polarizada). Ver Figura 2.1.

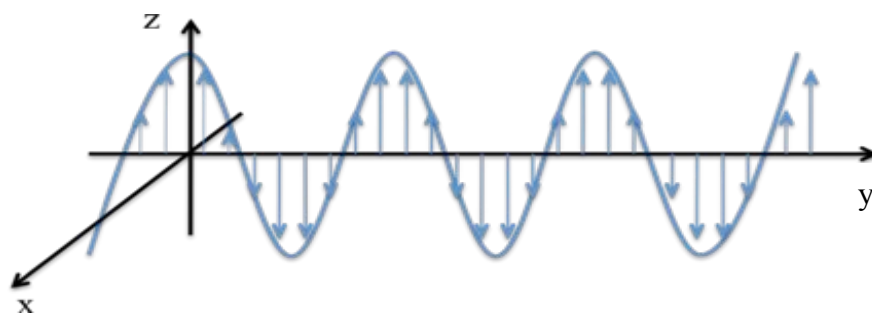


Figura 2.1 Onda propagando-se na direcção y e polarizada na direcção z.

Um filme polarizador (ou, simplesmente, um polarizador) é um material que possui um eixo privilegiado paralelo à superfície, de forma que a luz transmitida pelo filme emerge polarizada paralelamente ao eixo do polarizador. Designar o eixo privilegiado por (+) e o eixo que lhe é perpendicular por (-).

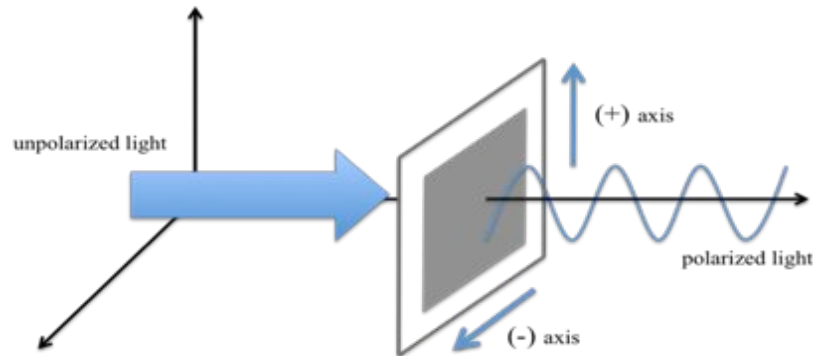


Figura 2.2 Luz não polarizada incidindo perpendicularmente ao polarizador. A luz transmitida está polarizada na direcção (+) do polarizador.

Os materiais transparentes vulgares (como por exemplo o vidro) transmitem a luz mantendo a polarização da luz incidente, uma vez que o seu índice de refração não depende da direcção e/ou da polarização da onda incidente. Contudo, muitos cristais, entre os quais se encontra a mica, são sensíveis à direcção do campo eléctrico da onda. No caso de propagação perpendicular à superfície, o filme de mica apresenta dois eixos ortogonais característicos, que designaremos por Eixo 1 e Eixo 2. Tal conduz ao fenómeno designado birrefringência.

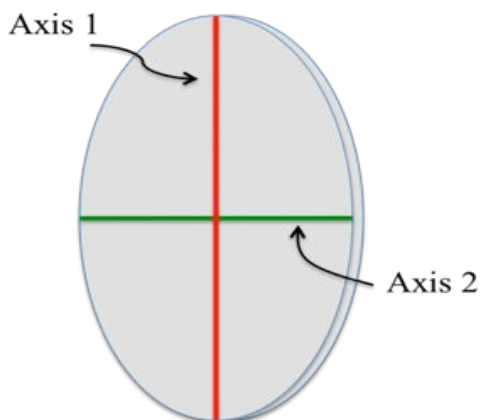


Figura 2.3 Filme fino de mica com dois eixos, Eixo 1 (*Axis 1*, a vermelho) e Eixo 2 (*Axis 2*, a verde).

Consideremos dois casos simples para ilustrar a birrefringência. Assumir que uma onda **polarizada verticalmente** incide perpendicularmente a uma das superfícies do filme de mica.

Caso 1) Um dos eixos (Eixo 1 ou Eixo 2) é paralelo à polarização da onda incidente. A onda transmitida atravessa o filme sem que a sua polarização seja alterada, mas a sua propagação é caracterizada por um índice de refração diferente (n_1 ou n_2) consoante o eixo. Ver Figuras 2.4 e 2.5.

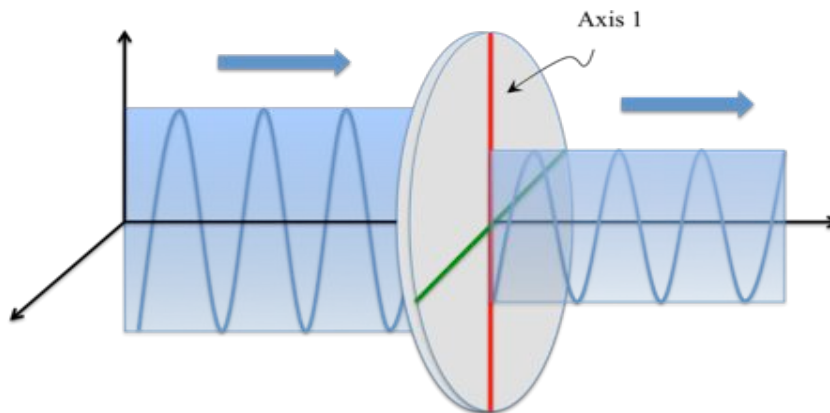


Figura 2.4 Eixo 1 paralelo à polarização da onda incidente. O índice de refração é n_1 .

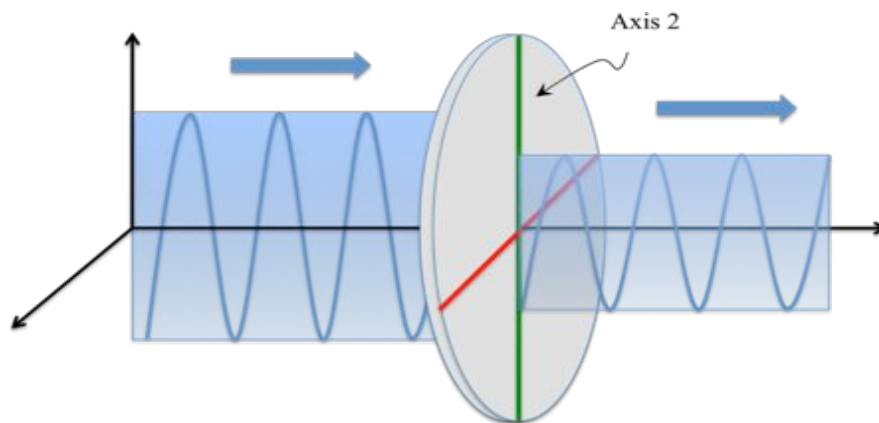


Figura 2.5 Eixo 2 paralelo à polarização da onda incidente. O índice de refração é n_2 .

Caso 2) O eixo 1 faz um ângulo θ com a polarização da onda incidente. A luz transmitida apresenta uma polarização mais complicada. Contudo, esta onda pode ser entendida como a *sobreposição* de duas ondas, uma com polarização **paralela** à polarização da onda incidente (i.e. “vertical”) e outra com polarização **perpendicular** à polarização da onda incidente (i.e. “horizontal”).

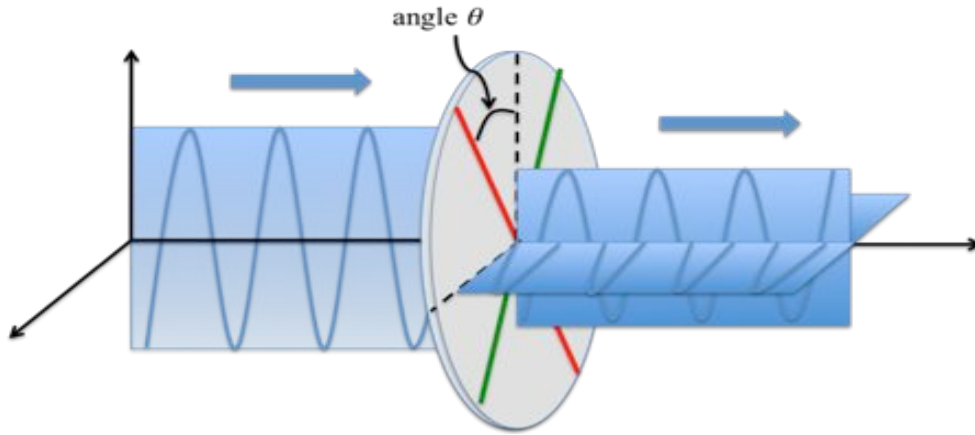


Figura 2.6 O eixo 1 faz um ângulo θ com a polarização da onda incidente.

Seja I_p a *intensidade* da onda transmitida com polarização *paralela* à da onda incidente e seja I_o a *intensidade* da onda transmitida com polarização *perpendicular* à da onda incidente. Estas intensidades dependem do ângulo θ , do comprimento de onda λ da fonte de luz, da espessura L do filme de mica, e do módulo da diferença entre os índices de refração característicos $|n_1 - n_2|$. Esta última quantidade designa-se a *birrefringência* do material. O objectivo desta experiência é a medida desta quantidade. Os materiais birrefringentes são úteis, em conjunto com polarizadores, para o controlo da polarização da luz.

Sublinhe-se que o fotodetector mede a intensidade da luz que nele incide, independentemente da respectiva polarização.

A dependência em θ de $I_p(\theta)$ e de $I_o(\theta)$ é complicada devido a outros efeitos que não serão considerados, tais como a absorção da radiação incidente pela mica. Contudo, é possível obter expressões aproximadas muito simples para as intensidades normalizadas $\bar{I}_p(\theta)$ e $\bar{I}_o(\theta)$, definidas como

$$\bar{I}_p(\theta) = \frac{I_p(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.1)$$

e

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{I_o(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.2)$$

É possível demonstrar que as intensidades normalizadas são dadas (aproximadamente) por:

$$\bar{I}_p(\theta) = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta) \quad (2.3)$$

e

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)\sin^2(2\theta) \quad (2.4)$$

em que $\Delta\phi$ é a diferença de fases entre as ondas transmitidas com polarização paralela e perpendicular. Esta quantidade é dada por

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}|n_1 - n_2| \quad (2.5)$$

onde L é a espessura do filme de mica, λ é o comprimento de onda da luz incidente e $|n_1 - n_2|$ é a birrefringência.

MONTAGEM EXPERIMENTAL

Tarefa 2.1 Montagem experimental para a medição das intensidades. Conceber uma montagem experimental para a medida das intensidade I_p e I_o da onda transmitida, em função do ângulo θ de qualquer um dos eixos ópticos com a polarização da onda incidente, conforme ilustra a Figura 2.6. *Para tal, escrever as LETRAS DE IDENTIFICAÇÃO dos diferentes aparelhos no desenho da mesa óptica.* Usar a convenção (+) e (-) para a direcção dos polarizadores. Se necessário, acrescentar desenhos simples que ajudem a clarificar a montagem.

Tarefa 2.1 a) Montagem para I_p **(0.5 pontos).**

Tarefa 2.1 b) Montagem para I_o **(0.5 pontos).**

Alinhamento do feixe laser. Alinhar o feixe laser de modo que fique paralelo à mesa e que incida no centro do cilindro que contém a mica. É possível realizar o alinhamento utilizando um dos cartões brancos para seguir o caminho do feixe. É possível efectuar pequenos ajustes através do espelho móvel.

Fotodetector e multímetro. O fotodetector produz uma tensão quando é atingido por luz. Medir esta tensão com o multímetro que é fornecido. A tensão produzida é linearmente proporcional à intensidade da luz. Apresentar pois as intensidades enquanto tensões produzidas pelo fotodetector. Quando não incide o laser no fotodetector, medir a intensidade luminosa de fundo do detector: deve ser inferior a 1 mV. *Não corrigir* os dados experimentais de intensidade com esta intensidade de fundo.

AVISO: O feixe laser é parcialmente polarizado numa direcção desconhecida. Assim, para obter bons valores de intensidade com luz polarizada, colocar um polarizador com o

respectivo (+) ou (-) na vertical de forma a obter intensidade transmitida máxima na ausência de qualquer outro instrumento óptico.

MEDIDA DE INTENSIDADES

Tarefa 2.2 Escala para as medidas de ângulos. O cilindro que suporta a mica dispõe de uma graduação regular que permite a medida de ângulos. Escrever o valor, em graus, do intervalo mais pequeno (i.e. entre duas linhas consecutivas). **(0.25 pontos)**

Determinação (aproximada) do zero de θ e/ou a posição do eixo da mica. De forma a facilitar a análise, é muito importante determinar o zero apropriado dos ângulos. Sugerimos que se comece por identificar a localização de um dos eixos ópticos, designando-o Eixo 1. É quase certo que esta posição não coincidirá com a linha graduada no cilindro. Considerar pois a linha mais próxima no cilindro que suporta a mica como origem provisória dos ângulos. Designar $\bar{\theta}$ os ângulos medidos a partir desta origem. Mais tarde, determinar-se-á uma localização mais precisa do zero de θ .

Tarefa 2.3 Medida de I_p e de I_o . Medir as intensidades I_p e I_o para tantos ângulos $\bar{\theta}$ quantos sejam considerados necessários. Apresentar as medidas na Tabela I. Tentar realizar as medidas de I_p e de I_o para a *mesma* posição angular do cilindro que suporta a mica, isto é, para um ângulo fixo $\bar{\theta}$. **(3.0 pontos)**

Tarefa 2.4 Determinação de um zero adequado para θ . A localização angular do Eixo 1 define o zero do ângulo θ . Tal como foi referido anteriormente, esta localização quase seguramente não coincide com nenhuma linha da graduação do cilindro que suporta a mica. De forma a determinar o zero dos ângulos, é possível proceder de uma forma gráfica ou de uma forma numérica. Ter em conta que nas proximidades de um máximo ou de um mínimo é possível escrever a relação entre a intensidade e o ângulo como sendo aproximadamente descrita por uma parábola:

$$I(\bar{\theta}) \approx a\bar{\theta}^2 + b\bar{\theta} + c$$

em que o mínimo ou máximo da parábola é dado por:

$$\bar{\theta}_m = -\frac{b}{2a}.$$

Seja qual for o método adoptado, é determinado um desvio $\delta\bar{\theta}$ de todos os valores de $\bar{\theta}$ apresentados na Tabela I da Tarefa 2.3, de forma que podem ser reescritos como ângulos θ medidos a partir do zero corrigido, $\theta = \bar{\theta} + \delta\bar{\theta}$. Escrever o valor do desvio $\delta\bar{\theta}$, em graus. **(1.0 pontos)**

ANÁLISE DOS DADOS

Tarefa 2.5 Escolha das variáveis apropriadas. Escolher $\bar{I}_p(\theta)$ ou $\bar{I}_o(\theta)$ de forma a realizar uma análise adequada para determinar a diferença de fases $\Delta\phi$. Identificar as variáveis utilizadas. **(0.5 pontos)**

Tarefa 2.6 Análise de dados e a diferença de fase

- Utilizar a Tabela II para escrever os valores das variáveis necessários para a respectiva análise. Utilizar os valores corrigidos de θ . Incluir as incertezas. Utilizar papel milimétrico para representar as variáveis adoptadas. **(1.0 ponto)**
- Realizar a análise dos dados necessária para obter a diferença de fase $\Delta\phi$. Apresentar os resultados incluindo as incertezas. Escrever as equações ou fórmulas utilizadas na análise. Representar graficamente os resultados. **(1.75 pontos)**
- Calcular o valor da diferença de fase $\Delta\phi$ em radianos, incluindo a respectiva incerteza. Determinar o valor da diferença de fase no intervalo $[0, \pi]$. **(0.5 pontos)**

Tarefa 2.7 Cálculo da birrefringência $|n_1 - n_2|$. Note-se que ao adicionar $2N\pi$ à diferença de fase $\Delta\phi$, com N inteiro, ou que ao trocar o sinal da fase, os valores das intensidades permanecem inalterados. Contudo, tal conduz a uma alteração do valor da birrefringência $|n_1 - n_2|$. Assim, para utilizar o valor $\Delta\phi$ determinado na Tarefa 2.6 para calcular correctamente a birrefringência, deve-se ter em conta o seguinte:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2| \quad \text{se} \quad L < 82 \times 10^{-6} \text{ m}$$

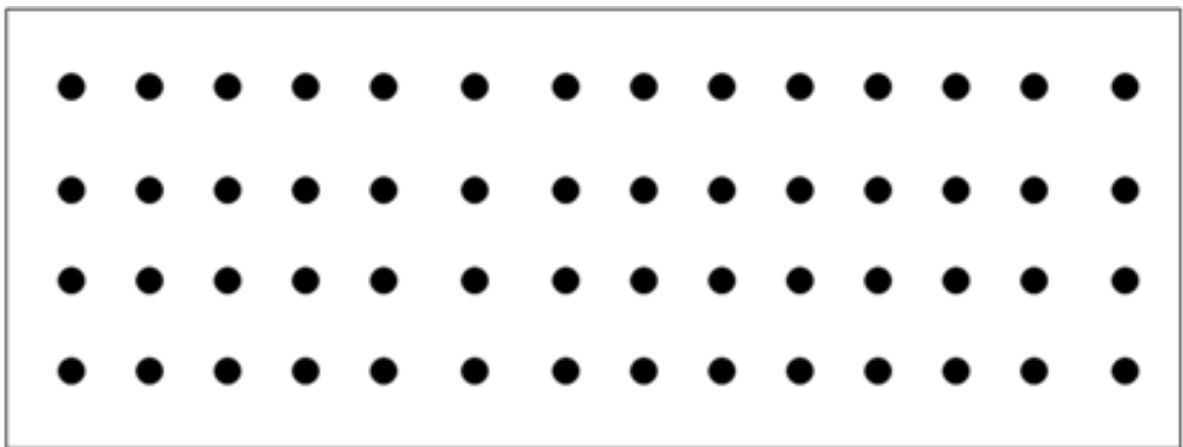
ou

$$2\pi - \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2| \quad \text{se} \quad L > 82 \times 10^{-6} \text{ m}$$

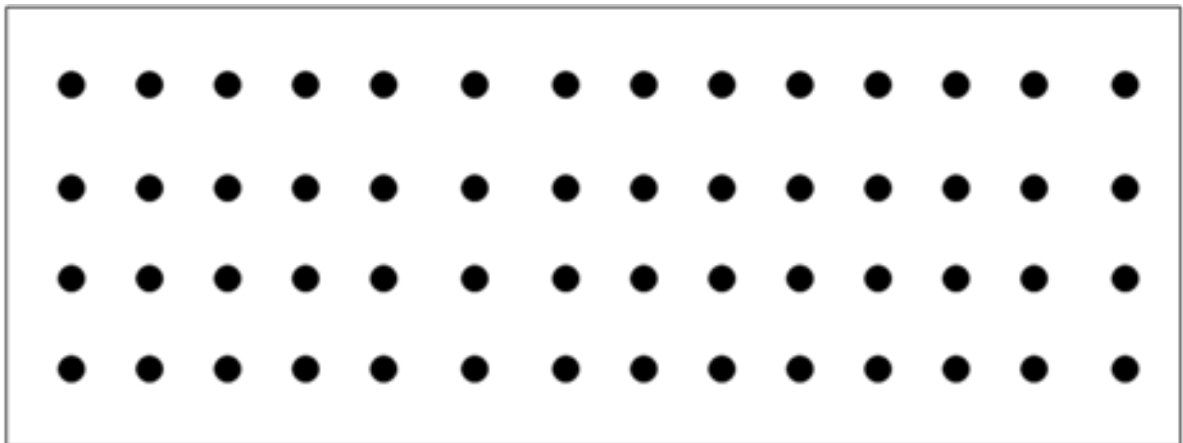
onde o valor L da espessura do filme de mica se encontra escrito no cilindro que suporta a mica. Este número é apresentado em micrómetros ($1 \text{ micrómetro} = 10^{-6} \text{ m}$). Tomar $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ como incerteza para L . Para o comprimento de onda do laser, utilizar o valor determinado no problema 1 ou o valor médio entre $620 \times 10^{-9} \text{ m}$ e $750 \times 10^{-9} \text{ m}$, os valores que balizam o vermelho no espectro visível. Escrever os valores de L e de λ bem como a birrefringência $|n_1 - n_2|$, com as respectivas incertezas. Incluir as fórmulas utilizadas para o cálculo das incertezas. **(1.0 pontos).**

Folha de Respostas
Problema Experimental No. 2
Birrefringência da mica

Tarefa 2.1 a) Montagem experimental para determinar I_p . (0.5 pontos)



Tarefa 2.1 b) Montagem experimental para determinar I_o . (0.5 pontos)



Tarefa 2.4 Determinação de um zero adequado para θ .

2.4		1.0
-----	--	-----

Tarefa 2.5 Escolha das variáveis apropriadas

2.5		0.5
-----	--	-----

Tarefa 2.6 Análise dos dados e a diferença de fase

2.6		3.25
-----	--	------

2.6		
-----	--	--

2.6		
-----	--	--

TABELA II
(Utilizar folhas adicionais se necessário)

[illegible]

Tarefa 2.7 Cálculo da birrefringência $|n_1 - n_2|$.

2.7	<p>Anotar a espessura do filme de mica utilizado,</p> <p>$L =$</p> <p>Escrever o comprimento de onda utilizado,</p> <p>$\lambda =$</p> <p>Calcular a birrefringência</p> <p>$n_1 - n_2 =$</p> <p>Escrever as fórmulas utilizadas no cálculo da incerteza da birrefringência.</p>	1.0
-----	---	-----