

Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar

(Birrefringence in wave plates and optical activity of a sugar solution)

N. Carlin¹, E.M. Szanto, W.A. Seale, F.O. Jorge, F.A. Souza,
I.H. Bechtold e L.R. Gasques

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 23/9/2004; Revisado em 3/2/2005; Aceito em 11/5/2005

Neste artigo apresentamos um experimento simples desenvolvido para estudar as principais características de birrefringência. Placas de onda são construídas com lâminas de microscópio e fita durex (Scotch) e a birrefringência é determinada e comparada com uma medida realizada com um microscópio óptico de luz polarizada. A atividade óptica de uma solução de açúcar também é estudada e a relação entre o ângulo de rotação do plano de polarização e o comprimento e concentração da solução é verificada. Todos os resultados são discutidos com base em modelos teóricos.

Palavras-chave: birrefringência, atividade óptica, placas de onda.

In this paper we present a simple experiment developed to study the principal characteristics of birefringence. Wave plates are built with microscope slides and scotch tape and the birefringence is determined and compared to a measurement performed with a polarized light optical microscope. The optical activity of a sugar solution is also studied and the relationship between the rotation angle of the polarization plane and the length and concentration of the solution is verified. All the results are discussed according to theoretical models.

Keywords: birefringence, optical activity, wave plates.

1. Introdução

Com os estudos de Maxwell (1831-1879), constatou-se que a luz é uma onda eletromagnética composta por campos elétricos e magnéticos oscilantes, perpendiculares entre si e transversais à direção de propagação da onda [1]. Os efeitos de polarização da luz associam-se, por convenção, com a vibração do campo elétrico da onda eletromagnética. Deste modo, quando o campo elétrico de uma onda oscila ao longo de uma única direção fixa no espaço, diz-se que ela está *linearmente polarizada*. Por outro lado, quando o campo elétrico (e conseqüentemente o magnético) apresenta uma amplitude constante, mas gira ao redor da direção de propagação de maneira que o extremo do vetor campo elétrico descreve um círculo, diz-se que a onda está *circularmente polarizada*. A polarização elíptica é um caso mais geral entre as duas anteriores, onde o vetor campo elétrico descreve uma elipse ao longo da direção de propagação da onda. Além disso, a luz também

pode ser não-polarizada, que é o caso da luz do sol e de lâmpadas comuns, onde o vetor campo elétrico varia tanto em módulo como em direções de vibração igualmente prováveis.

Quando a luz se propaga em um meio opticamente isotrópico, as propriedades ópticas são as mesmas em todas as direções, isto é, existe um único índice de refração. Entretanto, quando uma frente de onda de luz incide em um meio anisotrópico, independente do estado inicial de polarização, a direção de oscilação do seu campo elétrico pode ser decomposta em duas componentes conhecidas como raio extraordinário (paralelo à direção do eixo óptico do meio) e raio ordinário (perpendicular à direção do eixo óptico do meio), os quais viajam com velocidades de propagação diferentes. Isso significa que existem dois índices de refração distintos: n_e e n_o relacionados com os raios extraordinário e ordinário, respectivamente (ver Fig. 1); e o meio é chamado de birrefringente.

¹E-mail: nelson.carlin@dfn.if.usp.br.

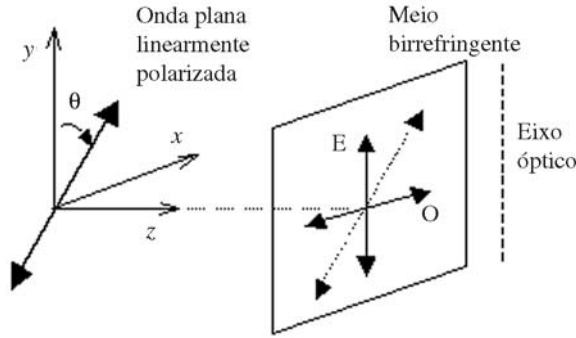


Figura 1 - Esquema ilustrativo de uma frente de onda plana linearmente polarizada incidindo em um meio birrefringente com ângulo θ em relação ao eixo óptico do meio (na direção y), onde as componentes extraordinária (E) e ordinária (O) estão indicadas.

Os dispositivos utilizados para obter uma polarização desejada a partir de luz não-polarizada são chamados de *polarizadores*, e são bastante comuns em laboratórios de pesquisa e didáticos. Existe uma outra classe de elementos ópticos conhecidos como *retardadores*, os quais servem para alterar o estado de polarização da luz incidente. Estes últimos, possuem seus átomos organizados de tal forma que podem introduzir uma diferença de fase ($\Delta\varphi$) na propagação dos feixes extraordinário e ordinário, alterando portanto o estado de polarização da luz. Um exemplo disso são as placas de onda, que podem ser construídas de quartzo, mica ou polímeros orgânicos.

Neste experimento, estudamos as propriedades ópticas de elementos retardadores como as placas de um quarto ($\frac{1}{4}$) de onda e meia ($\frac{1}{2}$) onda, construídas com lâminas de microscópio e fita durex (Scotch); experimentos similares foram previamente realizados utilizando fita celofane [2]. Além disso, investigamos a atividade óptica de uma solução de açúcar e como parâmetros como a concentração e a distância atravessada pela luz polarizada alteram a direção de polarização da luz incidente. Todos os resultados são discutidos de acordo com modelos teóricos existentes para explicar estes fenômenos.

2. Base teórica

Na seqüência, apresentaremos os conceitos básicos necessários para compreensão deste experimento, maiores detalhes podem ser encontrados em vários livros de fenômenos ópticos, em particular na Ref. [3].

No caso das placas de onda, é importante notar que enquanto as componentes da luz (eixos extraordinário e ordinário) atravessam o material retardador, $\Delta\varphi$ aumenta e o estado de polarização gradualmente se altera de um ponto a outro da placa, ou seja, a polarização de saída depende da espessura da placa. Veja a expressão a seguir:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d(|n_e - n_o|), \quad (1)$$

onde d é a espessura da placa e λ_0 é o comprimento de onda no vácuo da luz incidente.

A placa de $\frac{1}{4}$ de onda é conhecida por introduzir $\Delta\varphi = \pi/2$ entre as duas componentes ortogonais do feixe de luz incidente. Uma diferença de fase de 90° pode converter luz linearmente polarizada em elipticamente ou circularmente polarizada e vice-versa, dependendo da direção de polarização da luz incidente em relação ao eixo óptico do material. É conveniente mencionar que se uma luz linearmente polarizada incidir com a direção de polarização paralela a um dos eixos principais do material, seu estado de polarização não é afetado. Se uma luz linearmente polarizada incide numa placa de $\frac{1}{4}$ de onda com a direção de polarização a 45° de cada um dos eixos principais, as duas componentes terão a mesma amplitude de entrada, resultando em luz circularmente polarizada na saída da placa. Da mesma forma, a incidência de luz circularmente polarizada gera luz linearmente polarizada na saída, com o eixo de polarização a 45° de ambos os eixos principais. Para uma placa funcionar como $\frac{1}{4}$ de onda a espessura do material birrefringente deve obedecer à seguinte expressão:

$$d(|n_e - n_o|) = (4m + 1) \frac{\lambda_0}{4}, \quad (2)$$

para $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, onde $|n_e - n_o|$ é o módulo da birrefringência do material ($\Delta n = n_e - n_o$) que pode ser positiva ou negativa, neste caso, $\Delta\varphi = \pi/2, 5\pi/2, 9\pi/2, \dots$

A placa de $\frac{1}{2}$ onda é um retardador que introduz $\Delta\varphi = \pi$, ou seja, uma defasagem de 180° entre as componentes ortogonais de uma luz linearmente polarizada incidente. Dessa forma, quando os raios extraordinário e ordinário emergem da placa existirá uma diferença de caminho óptico de $\lambda_0/2$ entre eles, e a direção de polarização da luz vai ser girada de 2θ , sendo θ o ângulo entre a direção de polarização e o eixo óptico da placa. Neste caso, a espessura da placa deve obedecer à seguinte expressão:

$$d(|n_e - n_o|) = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad (3)$$

para $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, neste caso, $\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$. É importante enfatizar que uma placa de onda deve funcionar adequadamente apenas no comprimento de onda para o qual ela foi construída, como pode ser visto pelas Eqs. (2) e (3).

Os materiais com propriedades capazes de girar o plano de vibração do campo elétrico de uma luz incidente linearmente polarizada são chamados de *opticamente ativos*. Se o plano de vibração parece ter girado no sentido horário a substância é dita *dextro-rotatória* e se for no sentido anti-horário é dita *levo-rotatória*. Se

a substância é um cristal, como o quartzo por exemplo, esse comportamento pode ser tanto dos átomos em si como de seu arranjo dentro do cristal. Em substâncias líquidas, por exemplo uma solução de açúcar, esse comportamento é um atributo das próprias moléculas.

Na literatura, existe uma descrição fenomenológica bastante simples do efeito de atividade óptica proposta por Fresnel [3], onde uma onda linearmente polarizada incidente pode ser representada por uma superposição de duas ondas circulares, sendo uma com polarização circular para a direita e outra com polarização circular para a esquerda. Fresnel sugeriu que estas duas formas de luz circular se propagam com velocidades diferentes dentro do material opticamente ativo, ou seja, consideram-se dois índices de refração distintos: n_D (quando a polarização é circular para a direita) e n_E (quando a polarização é circular para a esquerda).

O ângulo β de rotação do campo elétrico é definido como positivo quando ocorre no sentido horário e negativo quando ocorre no sentido anti-horário. β também depende da distância L atravessada pela luz dentro do material através da expressão:

$$\beta = \frac{\pi L}{\lambda_0}(n_E - n_D), \quad (4)$$

logo, se $n_E > n_D$ a substância é dextro-rotatória e se $n_E < n_D$ a substância é levo-rotatória.

A atividade óptica de líquidos é relativamente baixa comparada com cristais e não depende apenas de L , mas também da concentração ($C = m/V$). Portanto, no caso de uma solução a Eq. (4) deve ser reescrita da seguinte maneira:

$$\beta = [\alpha]_{\lambda}^T (m/V)L, \quad (5)$$

onde m é a massa do soluto, V é o volume da solução e $[\alpha]_{\lambda}^T$ é a constante característica do soluto, que depende da temperatura T e do comprimento de onda da luz incidente λ .

3. Procedimento experimental

O aparato experimental utiliza um laser de He-Ne ($\lambda_0 = 632,8$ nm), dois polarizadores com escalas angulares, a placa de onda de estudo, um fotodetector Si PIN, pedaços de tecido escuros para evitar a incidência de luz externa no sensor e uma lente convergente (distância focal de 5,0 cm) para focalizar a luz no fotodetector. O fotodetector está conectado ao computador por meio da interface de aquisição (Pasco), que através do programa *Data Studio* permite a visualização da tensão de saída do detetor em função do tempo ou qualquer outra variável a ser definida. Uma foto do arranjo experimental pode ser vista na Fig. 2.

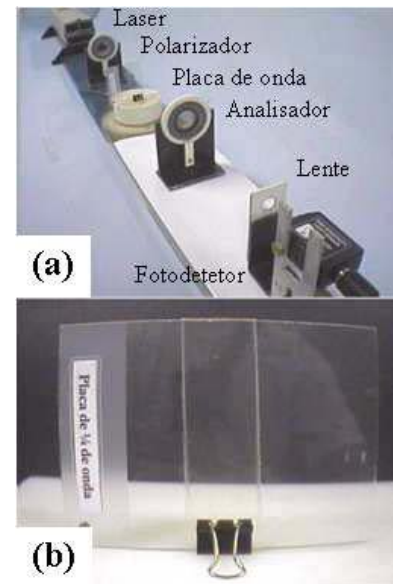


Figura 2 - Foto do arranjo experimental para estudo das placas de onda. (a) Vista geral mostrando o laser, polarizadores, fotodetector e placa e (b) vista aproximada de uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda feita com lâmina de vidro e camadas de fita durex.

Para investigar a atividade óptica de uma solução de açúcar utilizamos o procedimento usual com o método estático [4], onde inicialmente os polarizadores encontram-se posicionados para que a luz que atinge o fotodetector apresente um mínimo de intensidade e após a inserção da solução a ser estudada, o analisador é girado para voltar a condição de mínimo de intensidade, determinando dessa forma o ângulo de rotação β . Este aparato experimental para demonstração de atividade óptica foi apresentado pela primeira vez por G. Freier e B.G. Eaton [5], recebendo em 1975 o segundo lugar numa competição de aparatos experimentais para demonstração. Na literatura, encontram-se trabalhos de métodos dinâmicos onde o analisador é posto para girar à uma frequência definida com o auxílio de um motor [6].

É importante enfatizar que a automação das medidas, bem como a utilização de um laser de He-Ne não são imprescindíveis neste experimento. O mesmo pode ser realizado com o fotodetector conectado a um multímetro e com o uso de apontadores de laser (*laser pointers*, que são lasers de diodo de baixo custo e que já têm sido utilizados em experimentos ópticos [7, 8].

3.1. Placa de $\frac{1}{4}$ de onda

Experimentalmente, a posição angular do primeiro polarizador colocado entre o laser e a placa de onda é ajustada de tal forma que o plano de vibração da luz polarizada incidente esteja a 45° com relação ao eixo óptico da placa. O segundo polarizador (chamado de analisador) é colocado após a placa e pode ser girado livremente. Lembrando que se uma luz linearmente polarizada incide a 45° de ambos os eixos principais

de uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda o resultado é a conversão de luz linearmente polarizada em circularmente polarizada. Dessa forma, a intensidade de luz captada no fotodetector deve ser constante para variações angulares do analisador.

Inicialmente, esta propriedade foi testada com uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda existente no laboratório, depois foi construída uma placa deste tipo através da superposição de camadas de fita durex (Scotch) sobre lâminas de vidro para microscópio. No processo de fabricação as moléculas da fita são alinhadas por estiramento ao longo do seu comprimento deixando-a birrefringente, ou seja, com índices de refração diferentes ao longo da fita (n_e) e perpendicular a ela (n_o). Após cada camada de fita adicionada sobre a lâmina de vidro repete-se o procedimento experimental realizado com a placa de $\frac{1}{4}$ de onda conhecida até que o comportamento da placa construída seja o mesmo, ou seja, até que a intensidade de luz transmitida ao fotodetector não varie mais com o ângulo do analisador (ϕ) em relação ao primeiro polarizador. Concluiu-se que uma boa placa de $\frac{1}{4}$ de onda é obtida para 10–11 camadas de fita durex, como mostrado na Fig. 3. $\phi = 0^\circ$ representa os dois polarizadores paralelos entre si, e portanto, para 3 e 6 camadas observam-se máximos de intensidade em $\phi = 0^\circ$ e 180° e um mínimo em $\phi = 90^\circ$. Para 11 camadas a intensidade é constante em relação a ϕ o que condiz com uma luz circularmente polarizada.

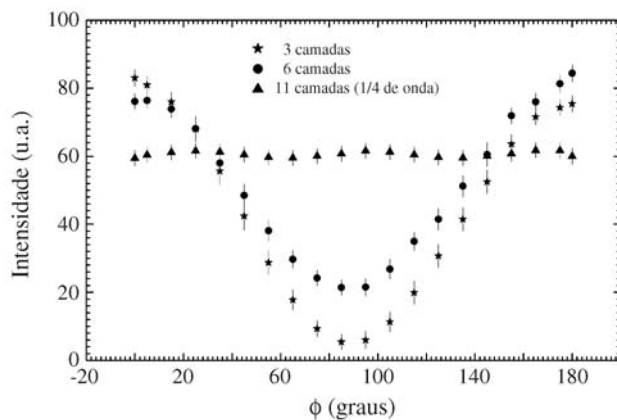


Figura 3 - Intensidade de luz em função do ângulo entre os dois polarizadores (ϕ) para 3, 6 e 11 camadas de fita durex. Para 11 camadas a intensidade transmitida é constante, indicando que a luz é circularmente polarizada.

De acordo com a Eq. (1), conhecendo-se $\Delta\varphi$ (que é $\pi/2$ para a placa de $\frac{1}{4}$ de onda), $\lambda_0 = 632,8$ nm e d é possível calcular a birrefringência do material ($\Delta n = n_e - n_o$). A espessura das camadas de fita durex foi medida com um micrômetro e é igual a 500 ± 10 μm e 550 ± 10 μm para 10 e 11 camadas, respectivamente. Considerando-se que os estudantes obtiveram boas placas de $\frac{1}{4}$ de onda para um número de 10–11 camadas de fita, se supormos que a espessura ideal seria equivalente a 10,5 camadas o que equivaleria a $d = 525 \pm 10$ μm , o

valor de Δn calculado seria igual a $(3,01 \pm 0,07) \times 10^{-4}$. A incerteza no valor da espessura medida deve-se aos diferentes valores encontrados pelos grupos de estudantes.

Com um microscópio óptico de luz polarizada, inserindo-se um compensador de Berek entre a objetiva e o analisador (ver Fig. 4) é possível medir a birrefringência da fita durex (Δn) e comparar com o valor calculado anteriormente. Neste sistema, o compensador introduz uma diferença de caminho óptico conhecida (δ_C) entre os eixos extraordinário e ordinário. Se a diferença de caminho óptico total ($\delta_T = \delta_C + \delta$, compensador mais a fita) for igual a $\lambda/2$ existirá uma interferência destrutiva entre os dois raios, caracterizada por uma franja escura vista na ocular do microscópio. Esta franja é encontrada variando-se a inclinação do compensador em relação ao feixe de luz e com isso determina-se δ_C . Dessa forma, $\delta = \lambda/2 - \delta_C$ e como $\delta = d\Delta n$, tem-se que $\Delta n = (\lambda/2 - \delta_C)/d$. Esta medida foi realizada no laboratório do Grupo de Fluidos Complexos do IF/USP onde obteve-se que $\Delta n = (3,00 \pm 0,05) \times 10^{-4}$. Percebe-se que o valor de Δn da fita durex encontrado pelos dois métodos é consistente.

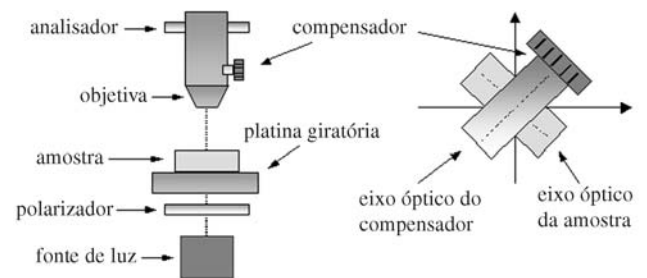


Figura 4 - Esquema experimental para medida da birrefringência da fita durex com um microscópio óptico de luz polarizada e um compensador de Berek.

3.2. Placa de $\frac{1}{2}$ onda

Para as medidas com a placa de $\frac{1}{2}$ onda é utilizado o mesmo aparato experimental. Neste caso, a diferença de fase entre as duas componentes ortogonais da luz é de 180° , gerando uma diferença de caminho óptico de $\lambda_0/2$ entre elas. Como dito anteriormente, o efeito é que o plano de vibração do campo elétrico que emerge da placa vai estar girado de 2θ , sendo θ o ângulo entre a direção de polarização incidente e o eixo óptico da placa.

A placa de $\frac{1}{2}$ onda utilizada no experimento foi obtida sobrepondo a placa de $\frac{1}{4}$ de onda construída com a placa de $\frac{1}{4}$ de onda existente no laboratório. O experimento foi realizado para dois ângulos distintos de incidência da luz polarizada $\theta = (30 \pm 1)^\circ$ e $(45 \pm 1)^\circ$, como resultado espera-se observar no detetor máximos de intensidade em torno de $\phi = 60^\circ$ e 90° , respectivamente, lembrando que ϕ é o ângulo de giro do anali-

sador em relação ao primeiro polarizador. O resultado está apresentado na Fig. 5, onde as linhas representam os ajustes dos dados experimentais com uma expressão tipo da Lei de Malus ($A \cos^2 \phi_M$, A é uma constante de normalização) resultando em $\phi = (65,7 \pm 0,5)^\circ$ [o que equivale a $\theta = (32,8 \pm 0,3)^\circ$] e $\phi = (88,1 \pm 0,5)^\circ$ [o que equivale a $\theta = (44,1 \pm 0,3)^\circ$]. Aqui é preciso deixar claro que o erro experimental certamente é maior que o erro apresentado pelo ajuste, pois podem existir erros sistemáticos associados com o processo de leitura na escala do analisador (a menor escala é de 2°). Além disso, considerando-se que a placa de $\frac{1}{2}$ onda foi obtida pela junção de duas lâminas de $\frac{1}{4}$ de onda, se os eixos ópticos das duas lâminas não estiverem perfeitamente alinhados, variações podem ocorrer. Neste sentido, os resultados obtidos são bastante satisfatórios.

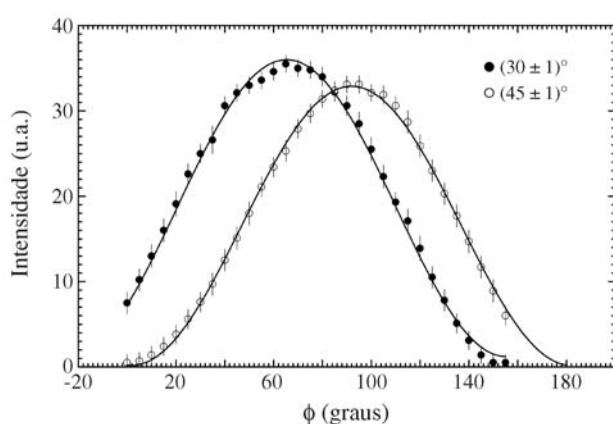


Figura 5 - Intensidade de luz em função do ângulo entre os dois polarizadores (ϕ) para casos em que a polarização de entrada está a 30° e 45° do eixo óptico da placa. A linhas correspondem a ajustes dos dados experimentais com uma função do tipo ($A \cos^2 \phi_M$) para determinar os pontos de máximo.

Foram feitos testes de construção de uma placa de $\frac{1}{2}$ onda através da colagem de 21 camadas de fita durex, o que equivaleria a duas vezes a quantidade de camadas encontradas no estudo da placa de $\frac{1}{4}$ onda. No entanto, a superposição de uma quantidade muito grande de camadas de fita cria defeitos, por exemplo, pelo acúmulo de partículas e bolhas, prejudicando a propagação da luz. Dessa forma, o método mais eficiente para obtenção de uma placa de $\frac{1}{2}$ onda é a junção de duas placas de $\frac{1}{4}$ de onda construídas separadamente.

3.3. Atividade óptica

A segunda parte do experimento está relacionada ao estudo de atividade óptica de uma solução de açúcar. O açúcar granulado estudado consiste de 99,9% de sacarose, conhecido como açúcar de mesa. De acordo com a equação (5), o ângulo de rotação β introduzido na direção de polarização da luz incidente pela coluna da solução de açúcar é diretamente proporcional à concen-

tração ($C = m/V$) e ao comprimento da coluna (L). A constante de proporcionalidade $[\alpha]_\lambda^T$ é geralmente expressa com m em gramas (g), V em mililitros (mL), L em decímetros (dm) e β em graus.

A constante $[\alpha]_\lambda^T$ reflete as características de cada material e é utilizada para identificar o nível de pureza da sacarose produzida pelas indústrias de açúcar. Neste experimento foi proposta a determinação desta constante para uma marca de açúcar de mesa comercial para comparar o resultado com o valor tabelado. No experimento foram utilizados cilindros graduados, água, açúcar branco, uma balança eletrônica de precisão e celas feitas de PVC com janelas de vidro para colocar a solução. As celas com a solução são colocadas na bancada óptica na posição que antes era ocupada pelas placas de onda. Na Fig. 6 observam-se as celas no centro entre dois polarizadores, com o laser Ne-Ne à esquerda e o fotodetector no lado direito.



Figura 6 - Foto do arranjo experimental para estudo da atividade óptica em uma solução de açúcar.

Inicialmente, o laser é alinhado com os polarizadores e o fotodetector de tal modo que a intensidade de luz transmitida seja mínima, ou seja, com os eixos de polarização do polarizador e do analisador cruzados (90°). Este processo é acompanhado pela interface de aquisição com o programa “Data Studio”. Em seguida, as celas com a solução são postas entre os polarizadores, e dessa forma, a intensidade de luz captada no fotodetector aumenta. Com o programa “Data Studio” é graficada a intensidade de luz captada em função do ângulo do analisador (β^*) que é girado até que a condição de mínimo de luz transmitida seja recuperada, onde este novo mínimo ($\beta_{mín.}^*$) equivale ao ângulo de rotação β .

O experimento é proposto para três comprimentos de solução utilizando uma, duas ou três celas sequencialmente; e com sugestão de duas concentrações aproximadas de açúcar: 0,200 g/mL e 0,400 g/mL. Na Fig. 7(a) apresentamos duas curvas obtidas por um grupo de estudantes para $L = 0,695 \pm 0,002$ dm (este valor é medido com um paquímetro) e duas concentrações: $C_1 = 0,182 \pm 0,002$ g/mL e $C_2 = 0,331 \pm 0,003$ g/mL. Os valores de $\beta_{mín.}^*$ também foram obtidos através do ajuste dos dados experimentais com uma expressão tipo da Lei de Malus, onde se obteve

$\beta_{\min}^* = (7,6 \pm 1,3)^\circ$ para C_1 e $\beta_{\min}^* = (12,5 \pm 1,2)^\circ$ para C_2 .

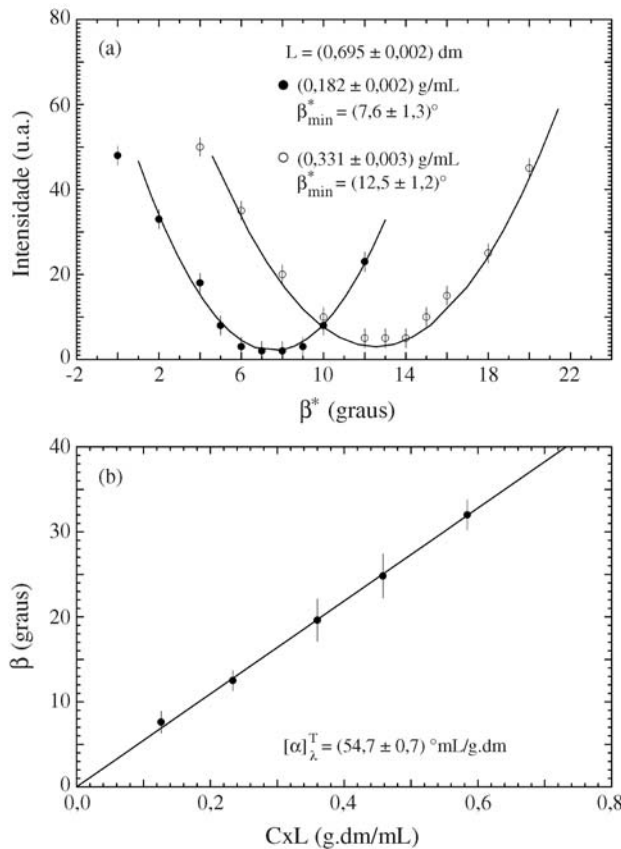


Figura 7 - (a) Resultados experimentais para determinação do ângulo de rotação β introduzido na direção de polarização da luz incidente. As linhas representam um ajuste com uma função do tipo $(A \cos^2 \phi_M)$ para determinar $\beta_{\min}^* = \beta$. (b) Gráfico de β em função do produto CxL , sendo que o coeficiente angular ajustado oferece diretamente o valor da constante característica do açúcar $[\alpha]_{\lambda}^T$.

Os valores de β_{\min}^* obtidos para as diferentes configurações de concentrações e celas foram então graficados em função de CxL , sendo que o coeficiente angular fornece diretamente o valor de $[\alpha]_{\lambda}^T$. Este procedimento está apresentado na Fig. 7(b), onde foi obtido $[\alpha]_{\lambda}^T = (54,7 \pm 0,7)^\circ \text{mL/dm.g}$, sendo que o valor tabelado é $[\alpha]_{\lambda}^T = 66,4^\circ \text{mL/dm.g}$ [9]. A discrepância entre os dois valores deve estar relacionada à diferença entre o comprimento de onda da luz utilizada e temperatura da medida. Em geral, os valores tabelados de β são tomados para $T = 20^\circ \text{C}$ e $\lambda = 589 \text{ nm}$, correspondente à linha D da lâmpada de sódio.

4. Aplicação do experimento

O presente experimento foi proposto como parte de um curso laboratorial básico de eletricidade e óptica para estudantes de graduação de segundo e terceiro anos do curso de bacharelado no Instituto de Física e Instituto

de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, ambos situados na Universidade de São Paulo. O experimento é realizado em duas aulas de quatro horas cada, onde para cada grupo de três estudantes existe disponibilidade de um computador com acesso a internet e programas de análise de dados. Acoplados a cada computador também existem uma interface de aquisição de dados (Pasco) e uma câmera CCD. O objetivo desta informatização é diminuir o tempo de aquisição de dados permitindo a análise direta com a supervisão de um professor. Acreditamos que a visualização gráfica imediata dos resultados facilita o aprendizado dos fenômenos.

Para facilitar a compreensão dos conceitos de polarização da luz foi instalado em todos os computadores o programa *Wave Optics on the Computer (WOC)* [10]. Com este programa é possível simular os efeitos de polarização de placas de onda, variando parâmetros como a espessura da placa, a direção da polarização incidente e o comprimento de onda da luz, permitindo a visualização dos efeitos de polarização e simulação das atividades experimentais propostas. Este programa é apenas um acessório didático auxiliar, não sendo imprescindível para a realização do experimento.

5. Comentários finais

O objetivo do experimento apresentado é o estudo das propriedades de polarização de placas de onda ($\frac{1}{4}$ de onda e $\frac{1}{2}$ de onda) e atividade óptica presente em uma solução de açúcar. Os resultados experimentais obtidos com as placas de onda concordam muito bem com as simulações e com as previsões teóricas. Com relação à atividade óptica da solução de açúcar, o valor encontrado para a constante característica $[\alpha]_{\lambda}^T$ é um pouco diferente do valor tabelado, mas é preciso considerar que este parâmetro depende do comprimento de onda utilizado e da temperatura. Seria interessante realizar este experimento para as mesmas condições do valor tabelado, ou seja, $\lambda = 589 \text{ nm}$ e $T = 20^\circ \text{C}$.

A filosofia descrita é aplicada em experimentos para estudantes de segundo e terceiro anos do Instituto de Física e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Os experimentos são relacionados à eletricidade, magnetismo e óptica. O contato dos estudantes com equipamentos e técnicas experimentais modernas e o aprendizado de variáveis e fenômenos das atividades do cotidiano aumenta significativamente seu conhecimento, motivação e criatividade.

Referências

- [1] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1997), v. 3.
- [2] K. Kriebel and J.L. Powlette, *Phys. Teach.* **41**, 537 (2003).

- [3] E. Hecht, *Optics* (Addison Wesley Longman, Inc., Reading, MA, 1998), 3rd ed.
- [4] R. Erlich, *Turning the World Inside Out* (Princeton University Press, New Jersey, 1990), p. 172-173.
- [5] G. Freier e B.G. Eaton, *Am. J. Phys.* **43**, 939 (1975).
- [6] G. Colicchia, *Phys. Teach.* **42**, 478 (2004).
- [7] J. O'Connell, *Phys. Teach.* **37**, 445 (1999).
- [8] R.E. Benenson, *Phys. Teach.* **38**, 44 (2000).
- [9] H.D. Belitz and W. Grosch, *Food Chemistry* (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- [10] Programa *Wave Optics on the Computer* (Moscow Institute of Physics and Technology, Russian Physical Society, Russia).