

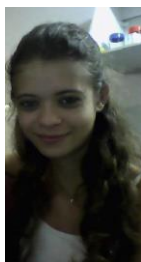


F530 – INSTRUMENTAÇÃO

Relatório

1º semestre de 2013

Medição de índices de refração



Paloma E. S. Pellegrini RA:108233
palomap arroba ifi.unicamp.br

Orientador: Cristiano M. B. Cordeiro
cmbc arroba ifi.unicamp.br
Coordenador: José Joaquim Lunazzi

Resumo

Neste projeto, índices de refração de amostras de sílica, polímeros e seda serão encontrados.

Duas técnicas foram estudadas para medir os índices de refração, ângulo de Brewster, juntamente com o método de Abelès e interferometria.

Para a medição com o ângulo de Brewster o mesmo LASER foi utilizado, o feixe incide na amostra que é rodada por um motor e o feixe refletido é coletado por um fotodetector. Essa montagem foi automatizada em um programa em LabView, no qual o ângulo varrido pela amostra é coletado e é possível ver o sinal refletido em tempo real em um gráfico de intensidade em função do ângulo. O índice de refração é o arco tangente do ângulo cuja intensidade é mínima.

O alinhamento inicial foi realizado com uma amostra de sílica.

Filmes de náfilon e seda foram medidos na mesma montagem e seus índices de refração, desta vez, é a intersecção da curva de intensidade do filme com a do substrato.

Um interferômetro de Michelson foi montado utilizando um laser He-Ne, em 633nm, como fonte de luz. O espelho móvel foi ajustado com um motor de passo até que os a distância dos braços do interferômetro ficassem aproximadamente iguais. Nesta situação, um padrão de interferência foi observado. Com essa montagem, a técnica de interferometria é aplicada.

O laser foi, então, substituído por um LED branco de 5W e o caminho óptico foi encontrado. Essa medida é a referência para as demais e, as franjas de interferência aparecem em um intervalo de, no máximo, 5 μ m de diferença de comprimento entre os braços. Este fato torna o caminho óptico nulo difícil de ser encontrado.

Índice

Introdução	4
Ângulo de Brewster e Método de Abelès – Teoria	5
Ângulo de Brewster e Método de Abelès – Resultados Experimentais	6
Índices de refração de filmes	10
Interferômetro de Michelson	15
Conclusão	
1. Parecer do Orientador	20
2. Conclusão	21
Referência	21
Agradecimentos	21

Introdução

O índice de refração é uma propriedade óptica dada pela razão da velocidade da luz no vácuo pela mesma em outro meio. Há diversas técnicas para medir o valor do índice.

Um aparelho portátil chamado refratômetro comumente utiliza a escala Brix de índices de refração. Ao colocar uma gota da substância a ser medida, o desvio que a luz sofre para atravessá-la é comparado com o da água destilada. Este aparelho é utilizado na indústria alimentícia para determinar a quantidade de compostos solúveis em sacarose.

Um prisma oco pode ser usado para armazenar substâncias líquidas translúcidas. Com uma montagem simples é possível medir o índice dessa substância. Um feixe de LASER com baixa divergência atravessa o prisma e é projetado. Se a substância sofrer algum processo que altere seu índice, como variação de temperatura, o feixe se deslocará. Esse deslocamento permite que a diferença de índice de refração seja calculado. O processo pode ser automatizado com uma CCD e o deslocamento é visto em tempo real.

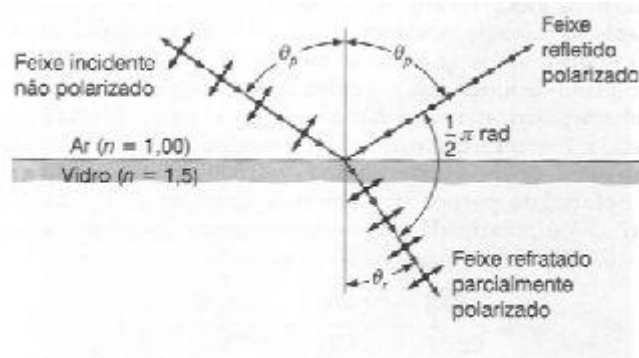
A elipsometria consiste em avaliar mudanças no estado de polarização da luz causada pela reflexão em uma superfície. Com esta técnica o índice de refração de substratos e filmes podem ser medidos, assim como sua espessura. A luz incidente tem polarização elíptica, ou seja, pode ser decomposta em componentes paralela e perpendicular ao plano de incidência, quando há uma defasagem entre essas duas componentes, a polarização é elíptica. Este feixe de luz é refletido na amostra e se a defasagem causada pela reflexão for diferente para as duas componentes a forma da elipse muda e a partir dessa mudança, os parâmetros ópticos são calculados.

Neste trabalho, inicialmente, um interferômetro de Michelson foi montado e uma luz incoerente foi usada como fonte de luz. A partir das franjas de interferência é possível obter o índice de refração da amostra. As franjas de interferência indicam que o comprimento de ambos os braços do interferômetro são iguais, no entanto, ao inserir a amostra a ser medida, o comprimento de um dos braços muda e é preciso encontrar as franjas novamente. Alinhar os braços para que estejam aproximadamente iguais (precisão de $2\mu\text{m}$) é um trabalho longo e árduo e os resultados ainda não foram obtidos.

Como alternativa, os índices de refração foram obtidos pelo ângulo de Brewster, que se mostrou uma técnica simples, mas muito eficaz. A sílica foi usada para o alinhamento inicial e filmes de seda e náfilon também foram medidos. Esta técnica será discutida com detalhes ao longo deste trabalho.

Ângulo de Brewster e Método de Abelès – Teoria

A polarização por reflexão ocorre na situação na qual uma onda incidente com componentes normais e paralelas à superfície atinge um certo meio e apenas a componente paralela é refletida. No caso de um feixe de luz polarizado, em certo ângulo de incidência não haverá reflexão, este é o chamado ângulo de Brewster e esta situação será estudada neste trabalho.



Podemos analisar essa situação com a lei de Snell, onde n_i é o índice de refração do meio incidente (ar) e n_t é o índice do meio refletor (vidro).

$$n_i \sin \theta_p = n_t \sin \theta_t$$

O ângulo de Brewster é aquele onde $\theta_p + \theta_r = 90^\circ$. Logo,

$$n_i \sin \theta_p = n_t \cos \theta_p$$

$$\tan \theta_p = \frac{n_t}{n_i} \quad (4)$$

Onde $\theta_p = \theta_b$, que é o ângulo de Brewster.

As equações de Fresnel tiveram um papel essencial neste experimento, pois elas relacionam a amplitude dos campos refletidos e transmitidos com a incidente através dos ângulos de incidência e transmissão, θ_i e θ_t , respectivamente. Tal que $\theta_i = \theta_p$.

Para um feixe de luz com polarização paralela ao plano de incidência, onde E_{0r} e E_{0i} são as amplitudes dos campos refletido e incidente, definimos o coeficiente de reflexão, r , como:

$$r_{||} = \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \quad (5)$$

De maneira análoga, quando o campo elétrico é perpendicular ao plano incidente, temos:

$$r_{\perp} = \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \quad (6)$$

A refletância é o quadrado do coeficiente de reflexão. Tendo em mente as equações de Fresnel:

$$R_{TM} = \frac{\tan \left[\theta - \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{n} \right) \right]^2}{\tan \left[\theta + \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{n} \right) \right]^2} \quad (7)$$

$$R_{TE} = \frac{\sin \left[\theta - \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{n} \right) \right]^2}{\sin \left[\theta + \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{n} \right) \right]^2} \quad (8)$$

Onde R_{TM} e R_{TE} correspondem, respectivamente, às componentes paralela e perpendicular ao plano de incidência.

Para um feixe polarizado paralelamente, ou seja apenas com componente R_{TM} , no ângulo de Brewster essa reflexão vale zero.

Para medir o índice de refração de filmes, o método de Abelès foi aplicado; o ângulo de incidência do feixe para o qual a intensidade da reflexão do filme é igual à do substrato é encontrado e, pela equação 4, o índice de refração do filme é obtido. Uma dedução detalhada do método ainda está em estudo.

Ângulo de Brewster – Resultados Experimentais

A figura abaixo esquematiza uma montagem onde o feixe de luz atravessa um *chopper*. Este instrumento dá uma referência da intensidade, que é medida através de um detector conectado a um amplificador.

A lâmina de meia onda e o polarizador foram utilizados para garantir que apenas a componente paralela ao plano de incidência incida na amostra. Ou seja, apenas a componente do campo magnético da onda que será denotada por R_{TM} .

O feixe atingirá a amostra que está presa em um motor que rotacional e a reflexão será coletada por um detector. A montagem funciona de tal forma que quando o ângulo da amostra é θ , o ângulo de detector é 2θ . Inicialmente, um laser He-Ne em 633nm foi usado.

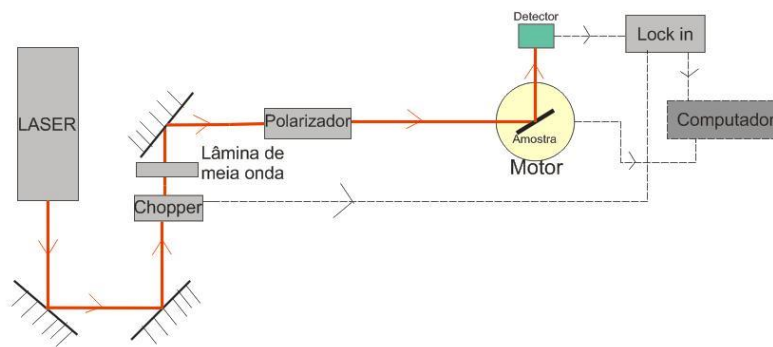


Figura 9 – Montagem com o sistema $\theta \times 2\theta$

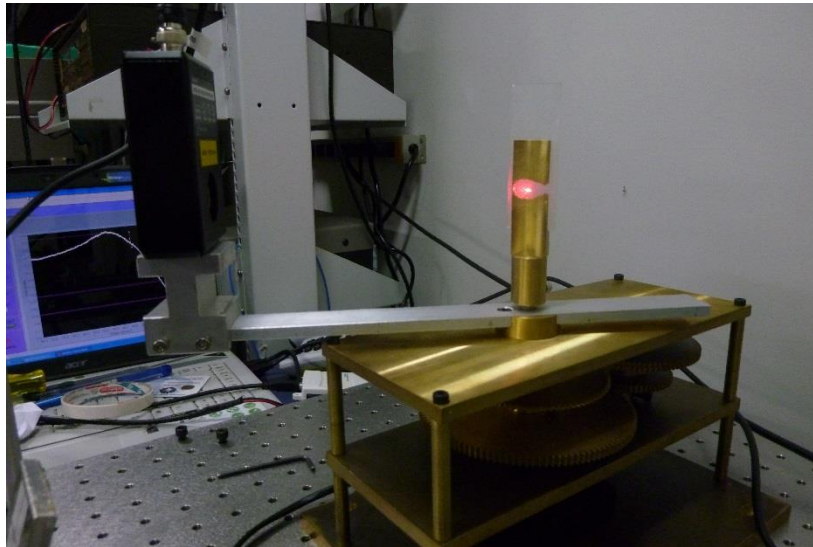


Figura 10 – Amostra e detector

Sabendo que as componentes magnética R_{TM} e elétrica R_{TE} são dadas pelas expressões 7 e 8, , uma simulação foi feita no programa Mathematica para obter as curvas características de cada uma.

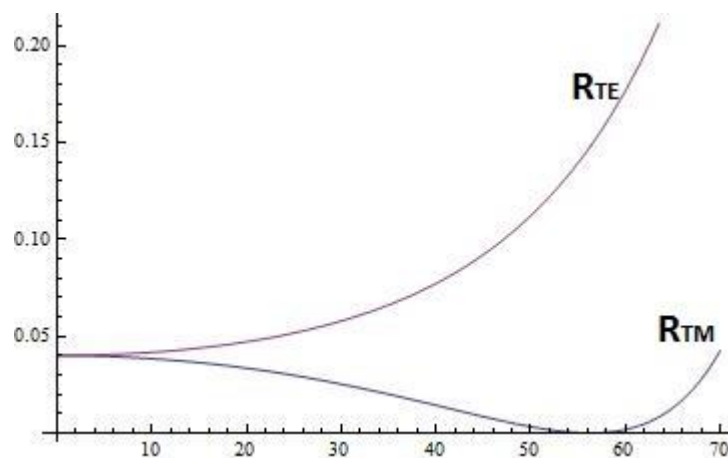


Gráfico 1 – Curvas características das componentes magnética e elétrica

Apenas a componente paralela ao plano de incidência apresenta um mínimo na curva de refletância, este mínimo ocorre no ângulo de Brewster. Para garantir que a polarização do LASER fosse paralela ao plano de incidência os seguintes passos foram realizados:

1. Com a lâmina de meia onda ausente da montagem, o polarizador foi ajustado paralelamente ao plano de incidência e fixado nessa posição. Um detector foi posto na saída do polarizador e ligado a um osciloscópio.
2. O LASER foi rodado de maneira que o sinal visto no osciloscópio fosse máximo.
3. A lâmina de meia onda foi posta na montagem e o sinal no osciloscópio diminuiu.
4. A lâmina foi rodada até que a intensidade máxima do sinal fosse novamente atingida.

5. Utilizando uma amostra de sílica, com o feixe de luz incidindo nela o sinal refletido foi coletado pelo detector.
6. Como o índice da sílica em 633nm é bem conhecido, 1,45701. É fácil saber que o ângulo de Brewster é 55,54°. A amostra foi girada até tal valor.
7. Neste momento, o sinal visto no osciloscópio deve ser mínimo. Senão, o polarizador e a lâmina de meia onda devem ser girados juntos até atingir a intensidade mínima. A lâmina de meia onda deve rodar sempre metade do ângulo varrido pelo polarizador.

É importante ressaltar que o ângulo de referência para rodar a amostra é aquela cuja reflexão percorre o mesmo caminho que o feixe incidente. Uma íris foi utilizada para facilitar esse passo. E, todas as amostras a serem medidas nesta montagem têm uma face polida e outra fosca, para evitar reflexões internas.

O próximo ponto estudado foi a estabilidade do LASER. Com o feixe incidindo em um polarizador e então no detector, a intensidade em função do tempo foi medida conforme mostra o gráfico a seguir.

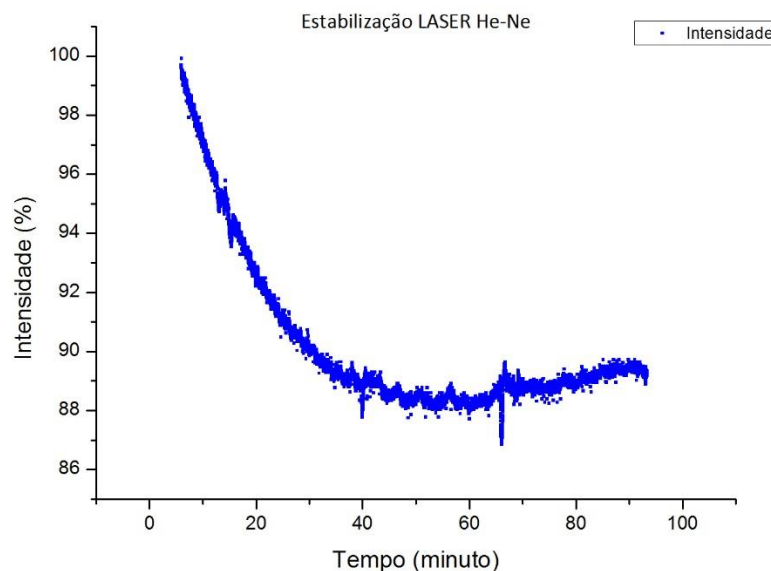


Gráfico 2 – Estabilização do laser

A conclusão é que nos primeiros 40 minutos de medida, a intensidade do LASER variou 10%, logo, antes de todas as medidas, ele foi deixado ligado por, no mínimo, uma hora.

Foram feitas 10 medidas com a amostra de sílica para garantir a confiabilidade do sistema e os valores do índice de refração obtidos foram comparados com o valor de acordo com Sellmeier.

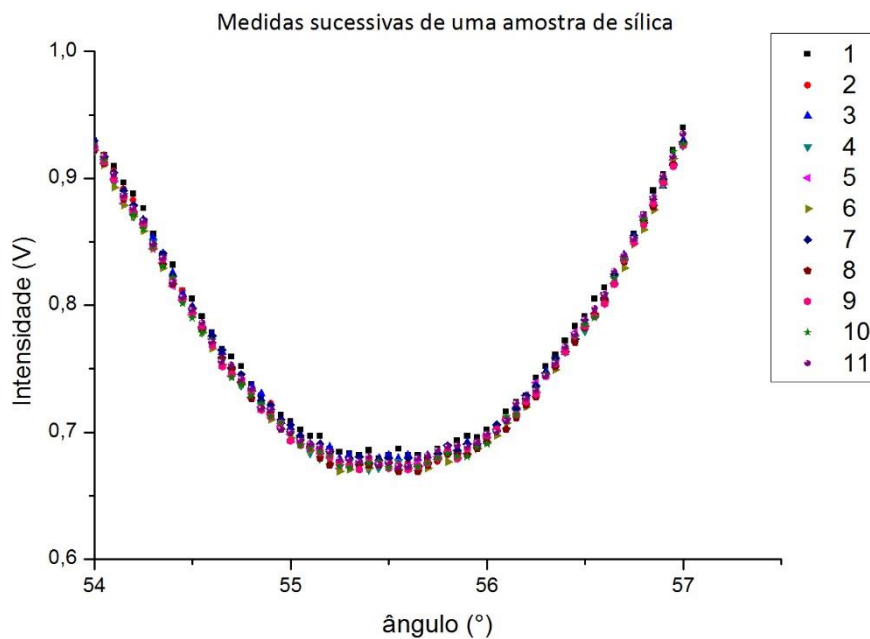


Gráfico 3 – Medidas sucessivas da amostra de sílica

O gráfico abaixo mostra a dispersão dos valores obtidos. O desvio padrão foi de aproximadamente 0,0006 e o valor médio das medidas dista de 0,0001 do esperado.

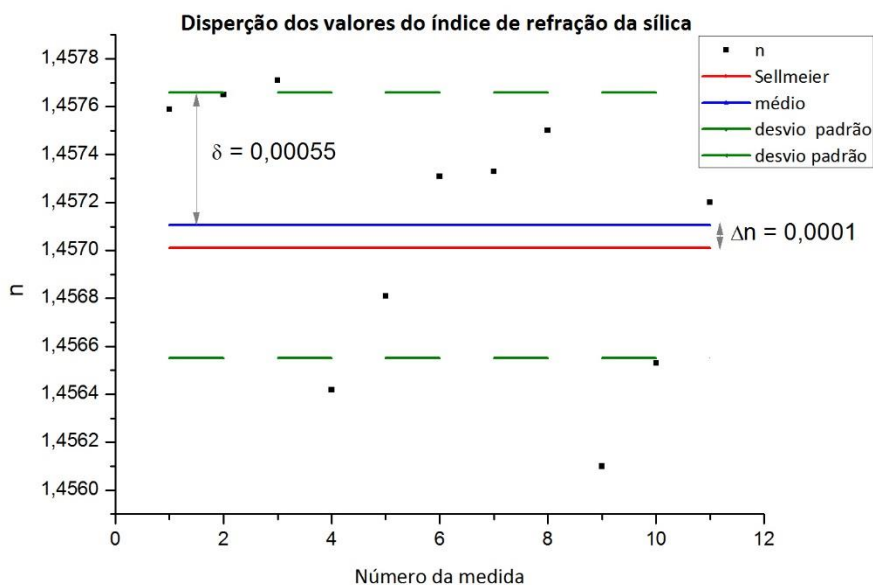


Gráfico 4 – Dispersão dos valores de índice de refração da sílica

A posição do polarizador é muito importante pois, se o seu ângulo estiver errado, ele pode fazer a curva de intensidade se deslocar. A posição dele foi variada até 10° e é possível observar o deslocamento das curvas.

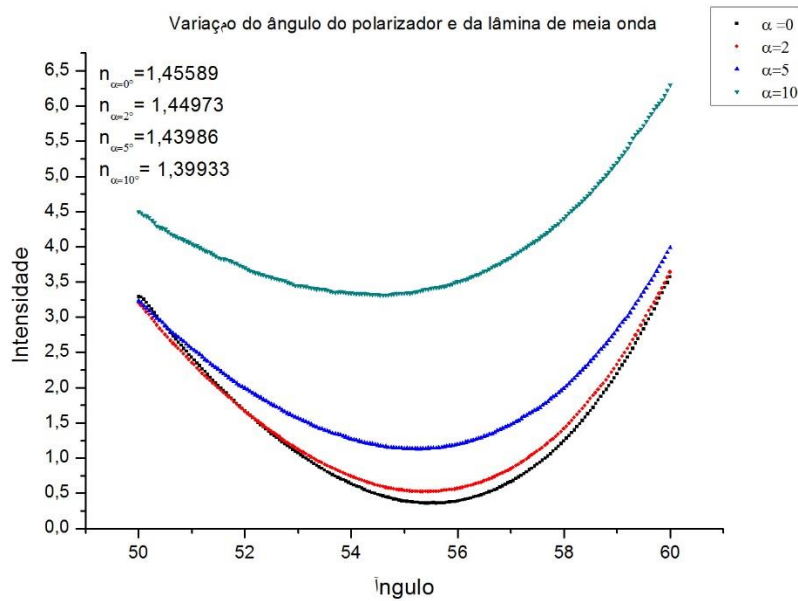


Gráfico 5 – Variação do ângulo do polarizador

Resultados iniciais indicam que a variação de 10° do ângulo do polarizador acrescenta um erro de 0,05768 no índice de refração.

Índice de refração de filmes

Filmes podem ser feitos através de uma técnica chamada de *spin coating*. O substrato é preso por vácuo em um cilindro. A substância é posta no substrato e o cilindro gira com uma frequência determinada pelo usuário.

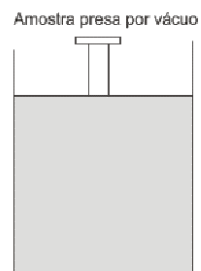


Figura 11 – Spin coating

Filmes de seda foram feitos e colocados na montagem $\theta \times 2\theta$ para seu índice de refração ser medido. Para um substrato típico com índice de refração de 1,5 as seguintes medidas foram obtidas.

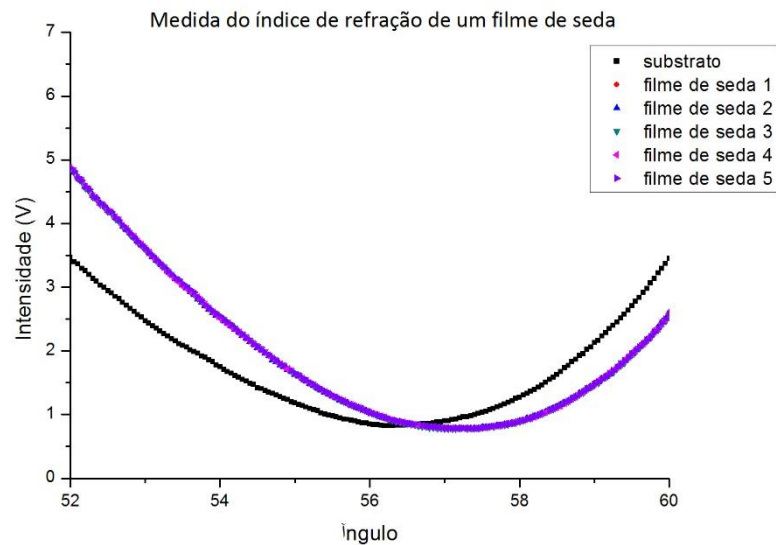


Gráfico 6 – filme de seda.

O índice de refração do filme de seda é calculado pela tangente do ângulo de intersecção da curva de filme com a de substrato. Para as 5 medidas realizadas, temos os valores abaixo com um desvio padrão de 0,00176:

n seda
1,5398
1,54291
1,544
1,54291
1,54419

O próximo passo a ser desenvolvido é trocar a fonte de luz por um laser supercontínuo ou luz branca, dessa forma, será possível obter o índice de refração da seda em função do comprimento de onda.

Outro filme investigado é o filme de náfion. Este apresenta mudanças no índice de refração em função da umidade.

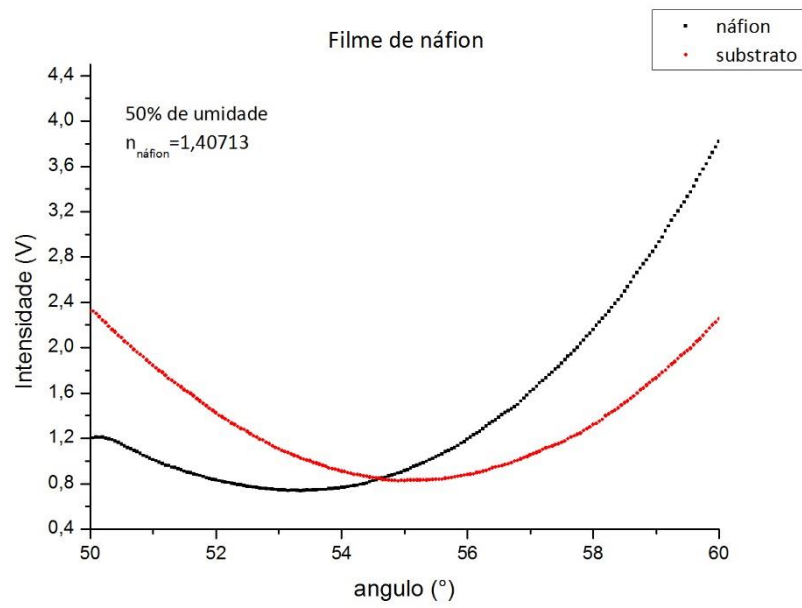


Gráfico 7 - Filme de náfion

Uma medida interessante realizada foi a de observar a refletividade de uma folha. A folha foi colocada na montagem e sua intensidade foi medida em função do ângulo. O detector foi aproximado da amostra devido ao espalhamento de luz.

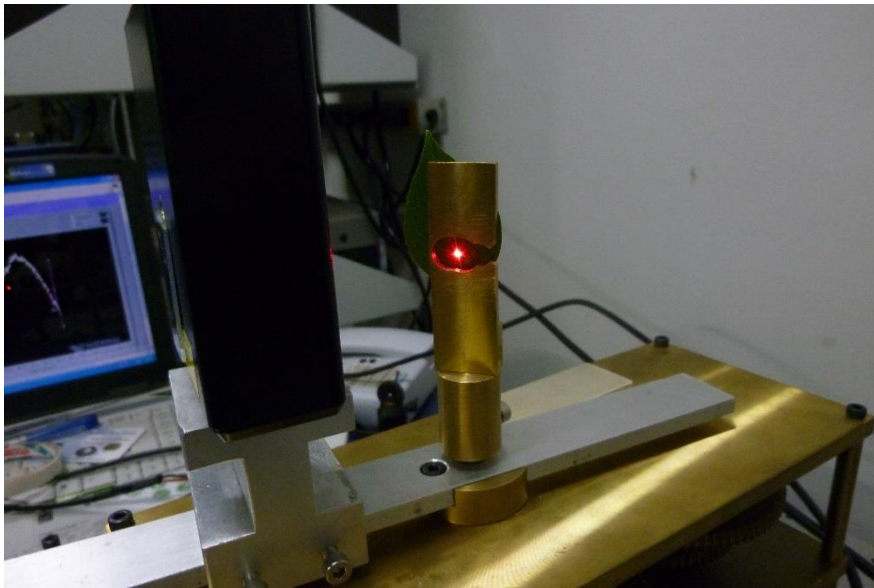


Figura 12 – Refletividade de uma folha

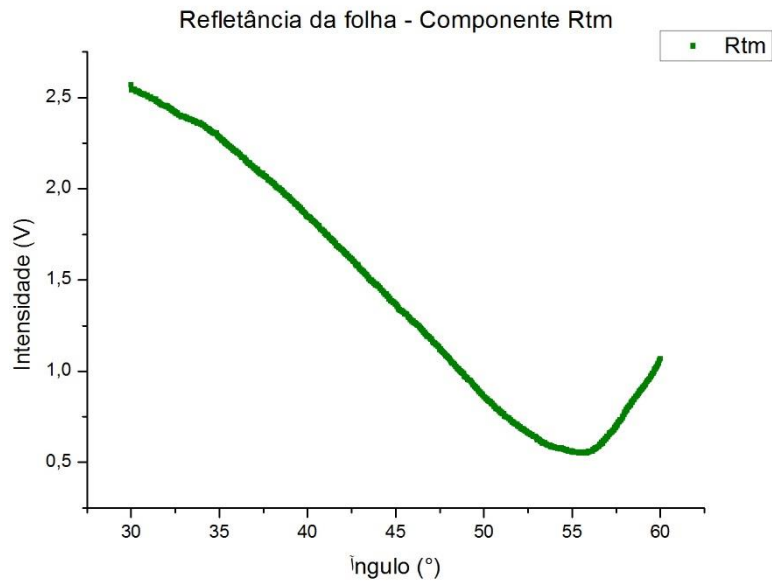


Gráfico 8 – Refletividade de uma folha, Rtm

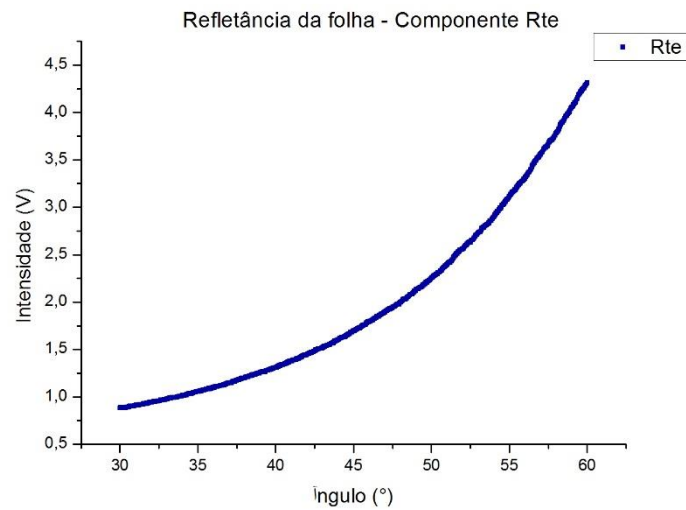


Gráfico 9 – Refletividade de uma folha, Rte

Os gráficos de refletividade da folha mostram que estão coerentes com as curvas características das componentes magnética e elétrica.

Interferômetro de Michelson

Um interferômetro de Michelson foi montado para estudar a medição de índices de refração. No entanto, algumas dificuldades práticas fizeram com que resultados concretos não fossem atingidos.

É necessário entender alguns conceitos antes de iniciar a montagem do interferômetro, como

Para estudar o conceito de interferência é necessário entender o Princípio de Superposição; essa propriedade diz que a perturbação resultante em qualquer meio é a soma algébrica das ondas constituintes separadas.

A diferença de fase pode aparecer por uma diferença de caminho óptico. Podemos ter duas perturbações da mesma fonte que viajaram distâncias distintas antes de chegar ao mesmo ponto de observação.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) \quad (1)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n (x_1 - x_2) \quad (2)$$

Onde n é o índice de refração, e x é a distância percorrida pelos feixes 1 e 2. A quantidade $n(x_1 - x_2)$ é a diferença de caminho óptico.

A irradiância I , é dada por:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3)$$

Quando $\delta = 0, \pm 2\pi, \dots$ temos interferência total construtiva e quando $\delta = \pi, \pm 3\pi, \dots$ temos interferência total destrutiva.

A explicação de interferência construtiva e destrutiva pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$(x_1 - x_2) = 2\pi m / k = m\lambda \quad (\text{irradiância máxima})$$

$$(x_1 - x_2) = 2\pi(2m + 1) / k = 1/2(2m + 1)\lambda \quad (\text{irradiância mínima})$$

Nas franjas de interferência, temos as regiões claras que correspondem à interferência construtiva e irradiância máxima e as regiões escuras que correspondem à interferência destrutiva e irradiância mínima.

Interferômetro de Michelson

O interferômetro de Michelson consiste em uma fonte de luz que incide em uma superfície semiespelhada que separa o feixe em dois, este instrumento é comumente chamado de *beam splitter* (separador de feixe, em inglês). O ângulo entre os dois feixes é de 90° e cada um reflete em um espelho, sendo que um dos espelhos é móvel. Os feixes refletidos pelos espelhos retornam ao beam splitter e são projetados em um anteparo. Se os braços do interferômetro estiverem, aproximadamente, com o mesmo comprimento é possível observar franjas de interferência. Este anteparo será substituído por um detector.

O esquema da figura 1 ilustra o interferômetro de Michelson, onde a fonte de luz utilizada foi um laser He-Ne.

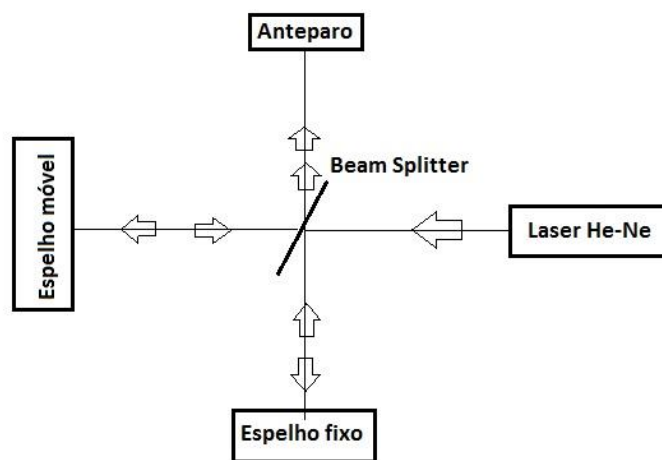


Figura 1 - Esquema

Na montagem do interferômetro, um espelho móvel de passo da marca Newport (modelo *MFA series*) foi utilizado. Ele foi escolhido pois pode dar passos da ordem de $0,1\mu\text{m}$ com precisão. Os espelhos e o separador de feixe também são da marca Newport. O laser foi alinhado a 75mm da mesa óptica e os espelhos foram alinhados com ajustes finos.

Uma lente objetiva foi posta na saída do laser para que o padrão de interferência fosse circular. A figura 2 mostra o interferômetro que foi montado.

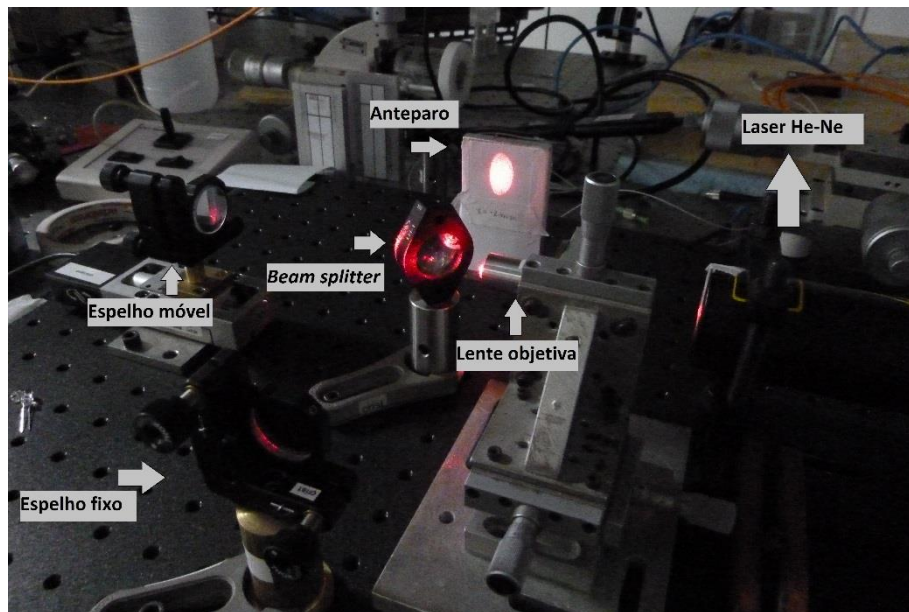


Figura 2 – Interferômetro de Michelson

Os braços do interferômetro foram ajustados para que as franjas de interferência fossem encontradas (figura 3).

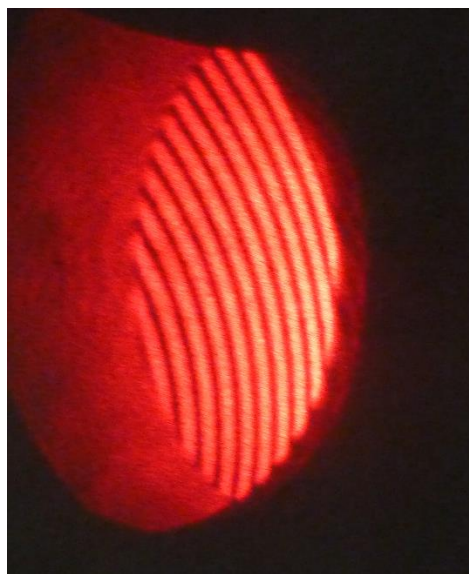
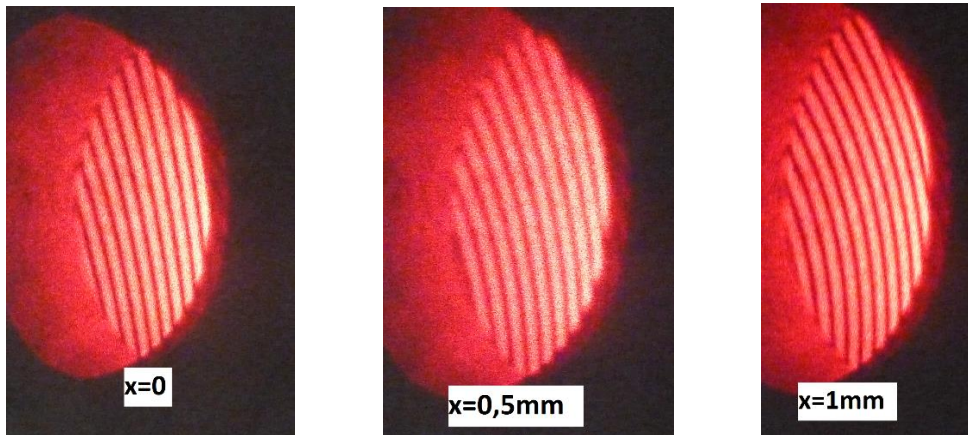


Figura 3 – Franjas de interferência

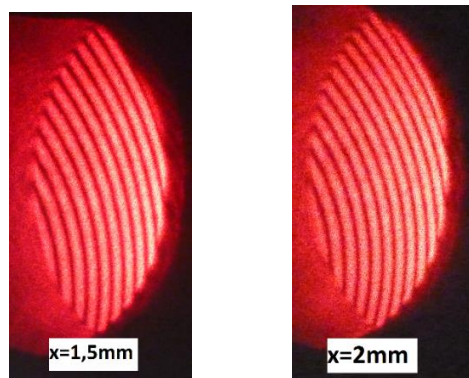
O laser por ser uma fonte de luz altamente coerente permite que as franjas de interferência sejam encontradas mesmo quando os braços do interferômetro estão com alguns centímetros de diferença.

Quando o padrão circular de interferência apresenta-se retilíneo, usando o laser He-Ne, significa que o raio das circunferências estão tendendo ao infinito e a diferença de caminho óptico está muito próxima de ser nula.

As imagens a seguir mostram como este padrão retilíneo torna-se circular com diferenças de 0,5 até 2 mm. Essa diferença será indicada pela letra x .



Figuras 4, 5 e 6, respectivamente – Padrão retilíneo se tornando circular



Figuras 7 e 8 – Padrão retilíneo se tornando circular

Nota-se que a mudança para o padrão circular é bem sutil, este fato dificulta encontrar as franjas com fontes de luz menos coerentes como o LED.

Interferômetro com LED

LEDs são fontes de luz não coerentes e não colimadas, então, encontrar as franjas de interferência é um exercício trabalhoso, mesmo quando os braços do interferômetro já estão com comprimentos próximos. O LED fluorescente de alto brilho utilizado é de 5W e sua fonte é de 6V. A imagem abaixo mostra que um tubo foi colocado ao redor dele para minimizar o espalhamento da luz.

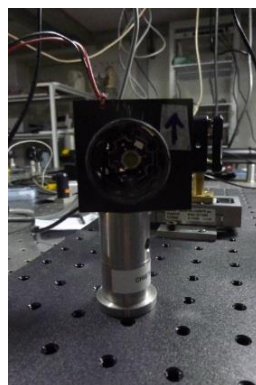


Figura 9 – LED de alto brilho

Um filtro interferométrico deixa a luz do laser um pouco mais coerente, então, ele é colocado na saída do LED. Como o LED utilizado é branco, o filtro usado é em 560nm. Em um primeiro momento, uma placa compensadora de sílica foi utilizada para compensar o caminho óptico que um feixe percorre dentro do separador de feixe (3,5mm).

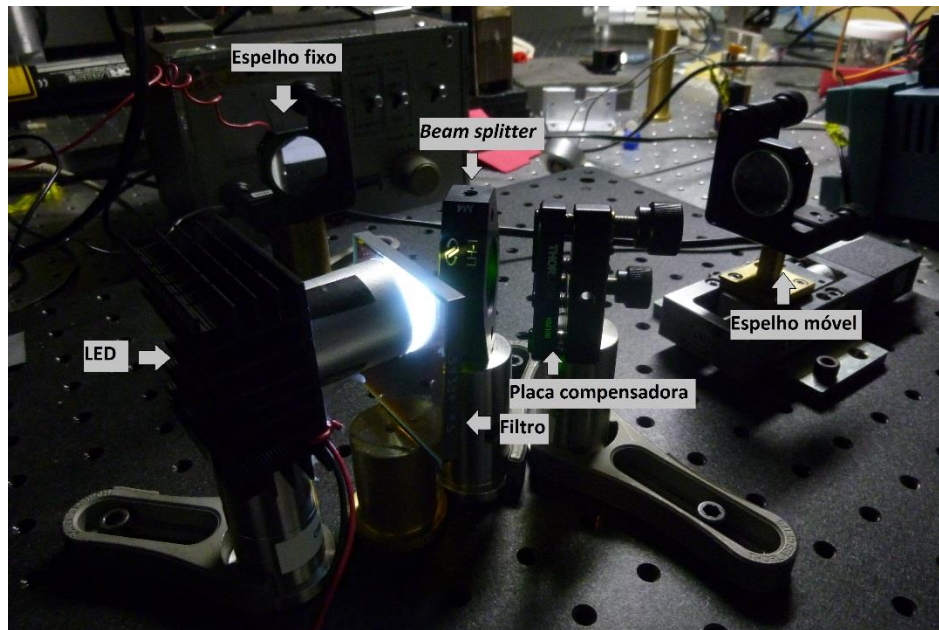


Figura 10 – LED como fonte de luz no interferômetro

As franjas de interferência foram encontradas. Isso significa que o caminho óptico nulo foi encontrado, assim como a referência para todas as futuras medidas. O erro do caminho óptico nulo é de $2,5\mu\text{m}$, ou seja, as franjas podem ser encontradas quando a diferença de comprimento entre os braços do interferômetro é, no máximo, $5\mu\text{m}$. Para as medições, o filtro é retirado para que a fonte seja a luz branca.

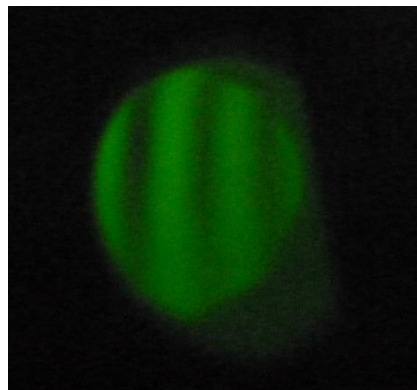


Figura 11 – Franjas de interferência com o LED + filtro

Assim, a montagem do interferômetro está pronta para medir as amostras.

Índice de refração de amostras de sílica e polímeros

Uma vez que o caminho óptico nulo foi encontrado as amostras podem ser inseridas na montagem. As amostras sugeridas para medição são: discos polidos de sílica e polímeros como o PMMA e Zeonex. Estes polímeros são utilizados para a fabricação de fibras ópticas.



Figura 12 – Amostras de PMMA e Zeonex

Cilindros de PMMA são comprados pelo laboratório. A amostra é um disco desse cilindro.

No caso do Zeonex, grãos do polímero são comprados (*pellets*) e por um processo de extrusão forma-se um cilindro.



Figura 13 – Pellets (grãos) de Zeonex

Quando a amostra é inserida na montagem, os braços do interferômetro não tem mais o mesmo comprimento e o padrão de interferência não existe mais. A amostra inicial escolhida foi o disco de sílica com 3,5mm de espessura.

O espelho móvel deve ser transladado até encontrar o caminho óptico nulo novamente. No entanto, este passo do projeto mostrou ser o mais trabalhoso pois o padrão de interferência é muito difícil de ser encontrado. Fatores como a vibração do motor de passo fazem com que a visualização das franjas seja muito ruim.

Novas fontes de luz foram investigadas como luz branca colimada e laser super contínuo. O problema da luz branca foi que sua intensidade era muito baixa e não era possível observar uma imagem do feixe no anteparo. O laser super contínuo foi estudado e inserido na montagem, mas ainda assim as franjas de interferência não foram encontradas novamente.

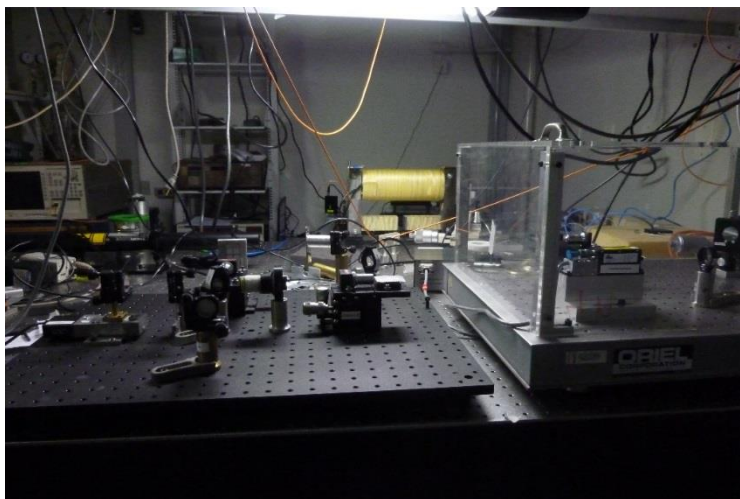


Figura 8 – Montagem com o supercontínuo

O passo posterior a este é substituir o anteparo usado para projetar as franjas por um detector que coletará a intensidade das franjas quando o motor de passo está sendo movido, com este sinal, um programa em LabView gera um gráfico da intensidade em função do tempo. Com estes dados, o índice de refração da amostra será encontrado.

Este projeto ainda está em andamento, no entanto, como alternativas de técnica de medição de índices de refração, o ângulo de Brewster e técnica de Abelès foram estudados e serão tratados nas seções seguintes.

Conclusão

1. Opinião do orientador:

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

“Paloma desenvolveu e estudou montagem automatizada para medida de índice de refração de substratos e filmes dielétricos pelo método de Brewster-Abelès. O trabalho incluiu montagem de toda a parte mecânica que permite rotação do braço do detector do dobro do ângulo da amostra (sistema $\theta \times 2\theta$) e de toda parte óptica. Estudo envolveu: i) caracterizar as fontes de erro da medida da refletividade tais como tempo de estabilização do laser, erro na determinação do ângulo zero e erro devido ao estado de polarização do feixe incidente e, ii) medir diversos tipos de amostras.

Amostras de sílica foram caracterizadas com ótimos resultados - erro sistemático de 0.0001 e desvio padrão de 0,00055 (comparação com o valor dado pela equação de Sellmeier). Filmes de seda e de nafion foram caracterizados, resultados que serão utilizados em outros trabalhos sendo desenvolvidos por alunos e colaboradores do grupo.

Montagem realizada será completada (em direções além dos objetivos deste projeto) no decorrer do segundo semestre permitindo medidas do índice de refração em função do comprimento de onda.

Vale notar que a aluna iniciou com tema correlato (medida de índice por técnica interferométrica) e, devido a dificuldades práticas, mudou o foco principal no decorrer do projeto. Relatório na forma atual (28/06/13) ainda precisa ser melhorado para ficar mais coerente com os objetivos finais do projeto.

De maneira geral fiquei bastante satisfeito com o desenvolvimento. Aluna mostrou grande dedicação e montagem realizada será utilizada rotineiramente no meu grupo de pesquisa e colaboradores.”

Este projeto possibilitou que diversos métodos para medir índices de refração fossem estudados. A medida do índice através do interferômetro de Michelson é muito interessante e teria uma grande aplicação na área de fibras ópticas, uma vez que seria capaz de medir seus índices. No entanto, a dificuldade para encontrar as franjas de interferência inviabilizaram as medidas.

Como alternativa, com o ângulo de Brewster os resultados foram obtidos mais facilmente, apesar de também se tratar de um alinhamento fino. A restrição desse método é que as amostras devem ter uma face polida e a outra fosca para evitar reflexões internas. Uma vez que este critério é satisfeito discos de polímeros do mesmo material das fibras ópticas também podem ser medidos com essa montagem.

A medição de filmes abre outro ramo de aplicações, como a seda e o náfilon. Com essas amostras, expandiremos as medidas para diferentes comprimentos de onda e valores de umidade. Além da medida de refletividade da folha, cuja aplicação está sendo estudada em parceria com a FEAGRI.

O projeto foi de grande valor para mim, uma vez que coloquei em prática tudo o que eu estava estudando.

Referência

HECHT, Eugene. **Optics**. 4th ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 2002. 698p., il. (World student series). ISBN 0805385665 (enc.).

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos, c1994-. 4v., il. ISBN (Broch.).

CORDEIRO, C.M.B.; SOUZA, Donga Rodrigues de; Cescato Lucila. Sistema automatizado para medição do índice de refração de filmes dielétricos. Revista de Física Aplicada e Instrumentação, v.14, p.72-78, 1999.

HEAVENS, O. S. **Optical properties of thin solid films**. New York, NY: Dover Publications, 1991. 261p., il. ISBN 0486669246 : (broch.).

Agradecimentos

Desde já, agradeço ao engenheiro Antonio Costa, técnico do laboratório de ensino de óptica, pelo auxílio e pelo empréstimo de materiais, ao José Aparecido, técnico da oficina mecânica, ao Claudécir Biazoli, pesquisador do LaFE, ao meu orientador Cristiano Cordeiro e ao coordenador da disciplina José Lunazzi.