

Discutindo a natureza ondulatória da luz e o modelo da óptica geométrica através de uma atividade experimental de baixo custo

(*Discussing the wave nature of light and the geometrical optics model through a low cost experimental activity*)

L.A. Souza¹, L. da Silva², J.A.O. Huguenin^{2,3}, W.F. Balthazar^{1,3}

¹*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio de Janeiro, Volta Redonda, RJ, Brazil*

²*Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, J, Brazil*

³*Programa de Pós-Graduação em Física, Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brazil*

Recebido em 10/6/2015; Aceito em 5/7/2015; Publicado em 12/12/2015

Em geral, o ensino de óptica no nível médio está concentrado na óptica geométrica. Apesar de ser um modelo de sucesso para explicar fenômenos como reflexão e refração da luz, ele não aborda satisfatoriamente a discussão sobre a natureza ondulatória da luz, além de não explicar fenômenos como difração e interferência. Neste trabalho propomos um experimento simples e de baixo custo para discutir a natureza ondulatória da luz e o limite em que a óptica geométrica é válida. A proposta constitui também um dispositivo para realização de medidas de objetos cuja dimensão seja da ordem do comprimento de onda da luz.

Palavras-chave: natureza ondulatória da luz, experimento de baixo custo.

In general, optics teaching at high school level focus on geometric optics. This is a successful model to explain reflection and refraction of light. However, it is not appropriate to discuss the wave nature of light, and to explain diffraction and interference, for example. In this work, we propose a simple experiment, of low cost, to discuss the wave nature of light and the limit in which the geometric optics is valid. Our proposal also provides a device to perform measurements of objects whose dimension is of the order of the wavelength of light.

Keywords: wave nature of light, low cost experiment.

1. Introdução

Nos últimos anos vários trabalhos referentes ao ensino de óptica vem sendo produzidos. Um dos temas presentes é a natureza da luz, como aponta a Ref. [1]. Apesar da natureza da luz ser discutida na maioria dos livros didáticos de física do ensino médio, principalmente no que refere à dualidade onda-partícula, este não é um tema de destaque quando o assunto é o ensino de óptica neste segmento. Em sua maioria, as atividades se concentram na óptica geométrica, um modelo de sucesso para explicar fenômenos ópticos como reflexão, refração da luz e formação de imagens em espelhos e lentes. As ilustrações de raios luminosos como retas paralelas são aproximações válidas num regime onde a frente de onda é plana. Neste regime a luz pode ser tratada como um feixe de raios paraxiais, criando uma imagem muito forte sobre a concepção da natureza da luz. Desta forma, comumente, torna-se difícil o aluno abandonar o conceito da aproximação geométrica face às evidências e explicações sobre sua natureza ondu-

latória. Ressaltamos que a teoria ondulatória da luz explica fenômenos como difração e interferência, que não são explicados pela óptica geométrica. Além disso, todos os fenômenos abordados pela óptica geométrica podem ser tratados utilizando a teoria ondulatória.

Diante desse cenário buscamos discutir duas questões. Por que não utilizamos a abordagem da luz como onda de forma mais ostensiva nas aulas de óptica do ensino médio? Como podemos dialogar com nossos alunos sobre a natureza ondulatória da luz e o regime onde a óptica geométrica tem validade? Entendemos que essa é uma discussão de grande importância para contribuir no cenário do ensino de óptica. Além de colaborar para melhorar a qualidade da aprendizagem do tema nas aulas de física, entender a luz como uma onda é fundamental para compreendê-la como a faixa visível do espectro eletromagnético, bem como a relação entre o eletromagnetismo e óptica, além das consequências desse conhecimento para o entendimento do nosso mundo e suas aplicações tecnológicas.

Com relação à primeira questão, alguns currículos

¹E-mail: wagner.balthazar@ifrj.edu.br.

têm mudado a direção do ensino de física, como é o caso do currículo mínimo da Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro [2]. Em sua versão de 2012, a parte do currículo dedicada à óptica, intitulada Fenômenos Ondulatórios - natureza da luz - efeito fotoelétrico, tem foco na natureza ondulatória e corpuscular da luz. Essa abordagem nos parece fundamental para uma visão ampla do comportamento da luz na natureza, ampliando as possibilidades de discussão sobre o tema. Além disso, essa é uma abordagem que aproxima o ensino de óptica dos Parâmetros Curriculares Nacionais [3], uma vez que permite ao aluno uma abordagem mais concreta da natureza e, conseqüentemente, uma melhor compreensão do mundo em que vive. Alguns trabalhos em ensino trazem à tona a abordagem ondulatória [4–9]. No entanto, frente às reformas curriculares, a apresentação da natureza da luz é um ponto central, porém, consiste em um grande desafio, uma vez que não dispomos, ainda, de um bom repositório de materiais didáticos que supram, de forma satisfatória, esta questão.

No intuito de responder à segunda questão e colaborar para as discussões sobre a natureza ondulatória da luz no ensino de física no ensino médio, propomos uma atividade experimental de baixo custo, cujo objetivo é trazer a natureza ondulatória da luz para o papel de protagonista no ensino de óptica, em especial nesse ano em que comemoramos o Ano Internacional da Luz. Buscamos para tal, uma atividade experimental porque entendemos que tais atividades são fundamentais para o processo ensino-aprendizagem em física em vários contextos, como discutido nas Refs. [10, 11]. Sem o experimento apropriadamente mediado pelo professor, ensinar que a luz é um feixe de raios paralelos ou uma onda que se propaga no espaço pode ser indiferente para o aluno, pois não há o que ele possa observar para iniciar uma discussão em torno do novo conhecimento apresentado. Neste sentido, ele simplesmente pode acreditar sem questionar o que lhe foi exposto, construindo imagens muito pictóricas sobre a luz. Nossa proposta experimental visa iniciar a discussão a partir da natureza ondulatória da luz e explorar cenários em que o modelo geométrico tem validade, apesar da luz continuar sendo uma onda. Num segundo momento, como uma atividade experimental adicional, propomos algumas atividades de medida da espessura de alguns objetos utilizando o fenômeno da difração da luz.

Na próxima seção faremos uma discussão teórica associada à natureza ondulatória da luz e a aproximação para a óptica geométrica. Na seção seguinte, apresentaremos o experimento e os resultados obtidos.

2. Da óptica geométrica à óptica ondulatória

A aproximação de onda plana para propagação da luz, tão abstrata quanto a de raios luminosos, pode ser um

instrumento poderoso na apresentação dos conceitos ondulatórios e evidencia a aproximação de raios luminosos [12]. Para ilustrar tal aproximação, devemos discutir a emissão de luz por uma fonte luminosa muito pequena, que chamamos de *fonte pontual*. A Fig. 1 ilustra a emissão de uma fonte pontual. De fato, ela emite luz em todas as direções e temos uma onda esférica. De modo geral representamos essa ideia em duas dimensões, conforme ilustra a Fig. 1. Os arcos representam seções das frentes de onda esféricas projetadas no plano da figura. Estas frentes de onda propagam-se, por exemplo, como se fossem “cascas” esféricas se expandindo, se pensarmos em três dimensões. Neste modelo, a separação entre as “cascas” representa o comprimento de onda λ . Este tipo de ilustração da propagação é mais realista. O sol, por exemplo, observado a distâncias astronômicas se comporta, aproximadamente, como uma fonte pontual. Este modelo permite discutir melhor a emissão de uma lâmpada incandescente. Podemos observar que as direções de propagação são indicadas pelo vetor de onda \mathbf{k} , perpendicular às superfícies esféricas da frente de onda.

Para distâncias muito grandes em relação à fonte, a superfície compreendida em um pequeno ângulo sólido será aproximadamente plana. Tomando a luz do Sol novamente, ao chegar à terra, a frente de onda é praticamente plana, comparada a dimensões de objetos quotidianos. Desta forma, a grandes distâncias da fonte, podemos considerar as frentes de ondas como contidas em planos com uma dada intensidade luminosa definida (estão a uma distância definida da fonte) se propagando com os vetores de onda perpendiculares a eles. A separação entre os planos ilustra o comprimento de onda λ .

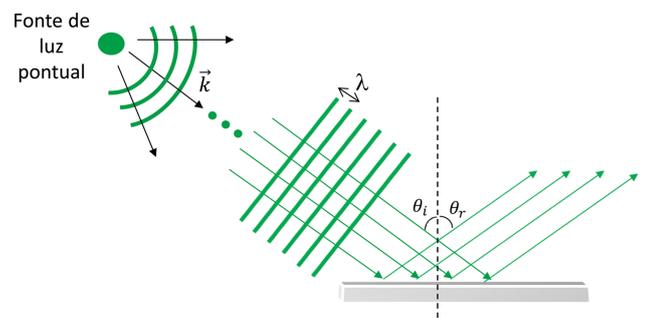


Figura 1 - Representação da reflexão de ondas planas em uma superfície refletora. Os arcos representam seções das frentes de onda esféricas emitidas por uma fonte pontual projetadas no plano da figura. Os vetores \mathbf{k} representam as direções de propagação. Ao incidir na superfície, as frentes de onda são aproximadamente planas. Nesta aproximação, a direção de propagação \mathbf{k} tem a mesma direção dos raios luminosos, representados pelas setas.

Também na Fig. 1 temos representado a reflexão de uma onda plana em um espelho plano. A direção de propagação, dada por \mathbf{k} , é utilizada para medirmos os ângulos de incidência θ_i e de reflexão θ_r . Esta ilustração será a chave para transitarmos da aproximação

geométrica para o limite ondulatório. Note que sem representar as frentes de onda plana, os vetores de onda da Fig. 1 são justamente o modelo apresentado para um raio luminoso na discussão da lei de reflexão. Desta forma, vemos que a representação de onda plana contém em si a aproximação geométrica. Nessa aproximação, a propagação retilínea da luz proporciona uma explicação muito intuitiva da formação de sombras, por exemplo. A sombra da luz solar que observamos no cotidiano evidencia esta intuição. Os raios propagantes na direção de um corpo opaco são bloqueados, fazendo com que a luz não chegue a um anteparo de observação, por exemplo, delineando o contorno deste corpo opaco. A Fig. 2(a) ilustra esta discussão na aproximação de ondas planas. Neste caso, representamos um laser colimado, ou seja, um feixe com propagação paraxial com comprimento de Rayleigh muito grande [13]. A luz incide sobre corpo opaco que tem uma fenda retangular de largura $a \gg \lambda$. Observa-se uma região iluminada no formato da fenda, justificando o modelo geométrico da luz. De fato, observando imediatamente após a fenda temos o contorno dela bem delineado. Porém, quando fazemos observações a distâncias maiores este contorno vai perdendo nitidez devido a efeitos de bordas da fenda. Este efeito pode ser observado, também, em sombras produzidas pela luz do Sol. Isto já é uma evidência da natureza ondulatória, pois significa haver luz em regiões proibidas pela explicação da propagação de raios. Esse efeito se deve ao desvio da frente de onda nas bordas da fenda, ou seja, a difração da luz nas bordas. Porém, se a fenda é muito grande comparado à λ , este efeito é pouco observado.

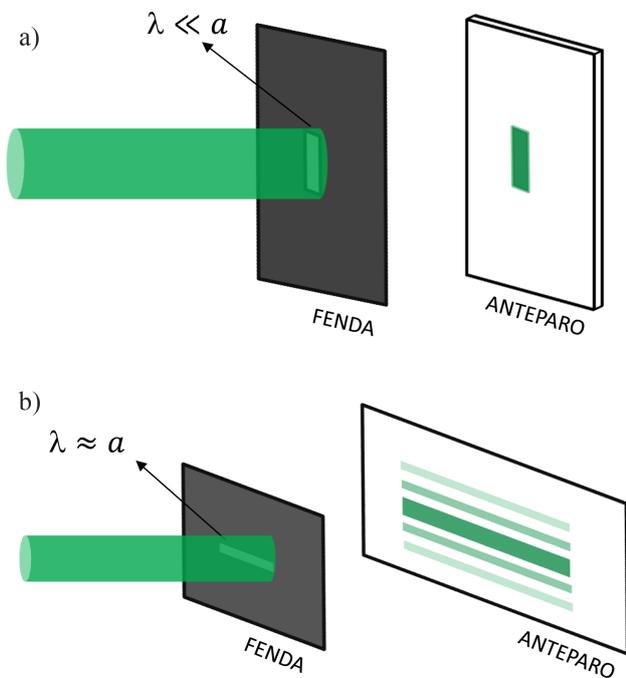


Figura 2 - (a) Quando a fenda tem largura a , tal que $\lambda \ll a$, vemos que não há padrão de interferência. (b) Quando a fenda tem largura a , tal que $\lambda \approx a$, vemos padrão de interferência.

Quando diminuimos a largura da fenda para dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz ($a \sim \lambda$), os efeitos da difração se acentuam e evidenciamos fenômenos que só podem ser explicados pela natureza ondulatória da luz. A Fig. 2(b) ilustra a incidência de uma onda plana em uma fenda retangular com estas características. Neste caso, ao observarmos um anteparo a uma distância D suficientemente grande, observaremos franjas com máximos e mínimos de intensidade luminosas, formando o conhecido padrão de difração. Teremos o máximo central na direção da fenda (ordem $m = 0$), mais intenso, na região onde teríamos a sombra, seguidos de ordens mais altas de difração ($m = \pm 1, \pm 2$), a direita e à esquerda, que vão perdendo intensidade. Na Fig. 2 estão ilustradas até a segunda ordem. Este regime $D \gg 1$ é conhecido como limite de Fraunhofer e a separação entre o máximo central e a m -ésima ordem de difração y_m pode ser escrita neste limite como

$$y_m = \frac{mD\lambda}{a}, \tag{1}$$

onde m é a ordem de difração observada, D a distância da fenda ao anteparo, λ o comprimento de onda da luz e a a largura da fenda [12].

Este efeito ondulatório pode ser explicado pelo princípio de Huygens [12], que diz que cada ponto da frente de onda é uma fonte secundária que também emite ondas esféricas. A frente de onda é recuperada tomando a envoltória de todas as frentes de onda secundárias. A obstrução de fontes secundárias em uma frente de onda pela parte opaca da fenda faz com que ocorra mínimos de intensidade em algumas regiões uma vez que as fontes secundárias remanescentes na frente de onda que sai da fenda irão apresentar interferência destrutiva nesta região.

Vale destacar que este efeito de difração também é observado quando, ao invés de uma fenda muito estreita, temos um corpo opaco de dimensões comparadas ao comprimento de onda. Por exemplo, se iluminarmos um retângulo opaco de mesma dimensão da fenda da Fig. 2 (b)- isto equivale a tomarmos o negativo da fenda - esse “retângulo” de largura $a \sim \lambda$ fornecerá o mesmo padrão de difração da fenda retangular. Este princípio é conhecido como princípio de Babinet [12] e o utilizaremos em nossa proposta experimental.

3. Experimento e resultados

Nossa proposta de atividade experimental explora a difração da luz, que apesar de ser um experimento amplamente conhecido, será abordado aqui de uma forma diferente. Acreditamos que com esse experimento podemos colaborar com uma nova possibilidade para abordar a natureza ondulatória da luz nas aulas do ensino médio. Esse é o principal objetivo desse trabalho. Apresentaremos duas propostas. A primeira é qualitativa e visa discutir a natureza ondulatória da luz e o

limite onde o modelo geométrico é válido. A segunda é quantitativa e tem caráter adicional à primeira, cujo objetivo é medir a espessura de diferentes objetos.

Para realizar tais atividades, utilizamos material de baixo custo e de simples confecção. O experimento pode ser realizado com um laser facilmente encontrado em estabelecimentos comerciais populares. Neste trabalho, o experimento foi realizado com um laser didático verde de comprimento de onda $\lambda = 532$ nm, grafites de espessuras nominais de $300 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $700 \mu\text{m}$, $900 \mu\text{m}$ e $2000 \mu\text{m}$ (comercialmente chamados de grafites 0,3 mm, 0,5 mm, 0,7 mm, 0,9 mm e n. 2), fio de cabelo, caixa e anteparo de papelão e trena. Para registro dos padrões de difração utilizamos uma câmera fotográfica digital. Para realização do experimento em sala de aula não é necessário o registro das imagens, pois o processamento de dados durante o experimento não depende necessariamente da câmera.

O primeiro passo do procedimento experimental é a montagem do suporte através de uma abertura retangular onde fixamos em sequência o fio de cabelo, os grafites de $300 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $700 \mu\text{m}$, $900 \mu\text{m}$ e um grafite n. 2, nesta ordem. O laser deve ser colocado em um suporte de forma que possamos transladá-lo para que a luz incida nos diferentes obstáculos. O aparato experimental pode ser visto na Fig. 3. Um anteparo de papelão é montado a uma distância D dos obstáculos para que possamos observar o padrão resultante após a interação da luz com os obstáculos.

Com o experimento montado, podemos realizar as duas atividades experimentais propostas neste trabalho e discutidas anteriormente.

3.1. Transição para o modelo retilíneo da luz

Com base no esquema experimental mostrado na Fig. 3(a), iniciamos com o posicionamento do laser de forma que o feixe incida sobre o obstáculo de menor espessura (fio de cabelo), produzindo o padrão de difração no anteparo. A Fig. 3(b) mostra uma foto do aparato onde colocamos os obstáculos e o anteparo onde observamos a difração da luz. Após observação, mudamos a incidência da luz para o obstáculo subsequente (grafite 0.3 mm) para nova observação e, assim, sucessivamente até o grafite n. 2. Dessa forma, podemos observar o padrão de difração no anteparo gerados por diferentes obstáculos. Nesse experimento o anteparo foi fixado a uma distância fixa $D = 1,00$ m do obstáculo. Em alguns casos a distância deve ser ajustada de acordo com a qualidade do laser utilizado. Ao preparar a realização do experimento o professor deve buscar otimizar distância D de forma a obter um padrão de difração nítido, com franjas bem destacadas, para fácil visualização das mesmas pelos alunos.

As imagens mostradas na Fig. 4(a-f) exibem os padrões de interferência observados quando incidimos a luz laser em cada anteparo. A Fig. 4(a) mostra o padrão de difração para o fio de cabelo. Podemos observar franjas nítidas e bem separadas, em acordo com a

Eq. (1), já que a espessura a do fio de cabelo é a menor e produz a maior separação entre franjas. A Fig. 4(b) corresponde ao padrão de difração produzido pelo grafite de $300 \mu\text{m}$. Note que o padrão muda significativamente com relação ao padrão gerado pelo fio de cabelo. As franjas ficam mais próximas uma das outras, conforme previsto pela Eq. (1), ou seja, y_m diminui quando a aumenta. Esse comportamento se repete quando incidimos o laser sobre o grafite de $500 \mu\text{m}$ (Fig. 4(c)), $700 \mu\text{m}$ (Fig. 4(d)) e $900 \mu\text{m}$ (Fig. 4(e)). As franjas se tornam cada vez mais próximas até que o padrão de difração começa a desaparecer. Utilizando agora o último obstáculo, o grafite n. 2, podemos ver na Fig. 4(f) que o padrão de difração praticamente desapareceu. Isso acontece porque a espessura do obstáculo é bem maior que o comprimento de onda da luz incidente. Nesse regime, visualizamos um padrão de sombra do grafite n. 2. Isso nos leva a concluir que nesse regime o comportamento da luz pode ser explicado pelo modelo da óptica geométrica. É exatamente esse comportamento de transição que desejávamos observar ao longo do experimento.

É importante mencionar que devido às características do laser, principalmente sua divergência e coerência, pode ser necessário que o material, em nosso caso o grafite n. 2, seja trocado por outro de maior espessura, como, por exemplo, um palito de madeira utilizado para churrasco.

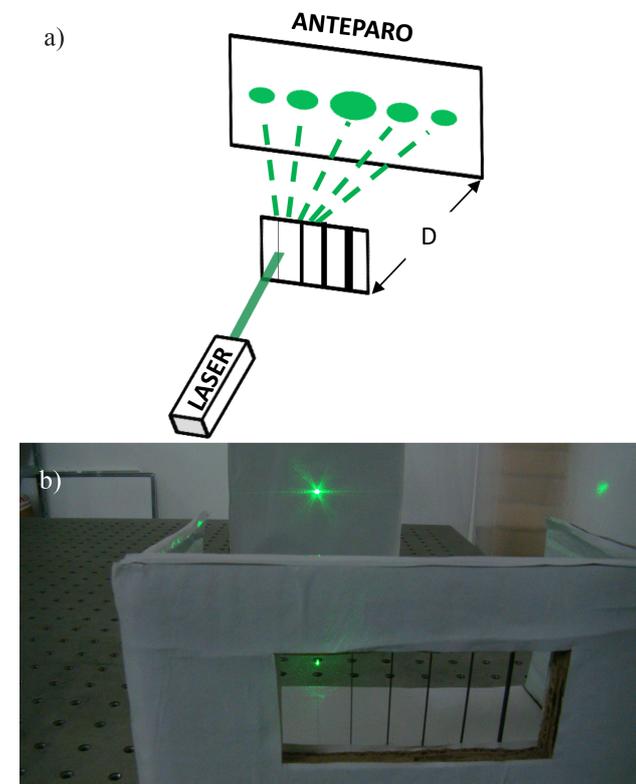


Figura 3 - (a) Figura do aparato experimental de baixo custo. (b) Experimento com material de baixo custo. Obstáculos colocados em ordem crescente de espessura. Feixe laser incidindo sobre o fio de cabelo.

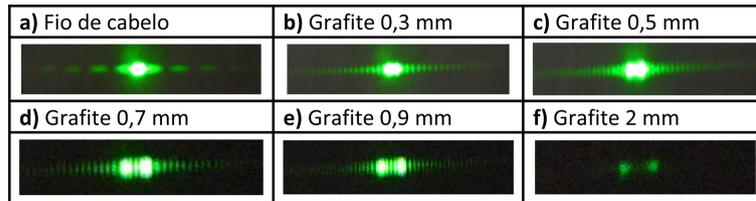


Figura 4 - Padrão de difração: a) o fio de cabelo, b) grafites 300 μm , c) 500 μm , d) 700 μm , e) 900 μm e f) grafite n. 2.

3.2. Medida da espessura de obstáculos através da interferência da luz

O aparato experimental também permite que façamos medidas da espessura de obstáculos usando a interferência da luz difratada pelo obstáculo, conforme descrito na Eq. (1). Apesar de entendermos que nosso material é somente para fins didáticos, realizar medidas das espessuras dos materiais utilizando difração pode ser uma experiência instigante, por isso exploramos essa atividade experimental. Utilizando a Eq. (1), podemos obter a espessura a , conhecendo o comprimento de onda λ do laser, em geral dado pelo fabricante, medindo a distância y_m da m -ésima franja ao máximo central e a distância D do obstáculo ao anteparo. A título de comparação, além da medida indireta das espessuras através do padrão de difração, realizamos também estas medidas com um micrômetro (Mitutoyo M110-25). No caso da medida da espessura do fio de cabelo, um problema já explorado na Ref. [9], buscando maior precisão, realizamos esta medida também utilizando um microscópio confocal interferométrico (Leica DCM3D). Com esta técnica, a topografia do fio de cabelo é levantada e sua espessura pode ser medida. A Fig. 5(a) apresenta a imagem do fio de cabelo, obtida com o microscópio confocal. Na Fig. 5(b) apresentamos imagem da região de interesse. A Fig. 5(c) apresenta o levantamento topográfico que nos permitiu obter a espessura.

Fizemos medidas de três fios de cabelo, denominados A , B e C . As medidas para a espessura destes três fios de cabelo com as três técnicas utilizadas são mostradas na Tabela 1. Os resultados obtidos pelo nosso dispositivo estão na coluna “difração”. O procedimento experimental é extremamente simples. Fixando a distância entre o anteparo e o obstáculo em $D = 1,00$ m, medimos com uma régua a distância entre o máximo central e a primeira franja clara. Com esses dados utilizamos a Eq. (1) para determinar a espessura a dos fios de cabelo.

Como podemos ver, independente do aparelho utilizado para fazer a medida, os valores encontrados para a espessura dos fios de cabelo são bem próximos. Contudo, podemos notar que as medidas realizadas com dispositivo de baixo custo estão mais próximas das medidas realizadas com microscópio confocal, que é a técnica mais sensível deste conjunto. As medidas com o micrômetro ficaram em torno do mesmo valor, uma vez que a espessura do fio de cabelo está próxima ao limite de resolução deste instrumento.

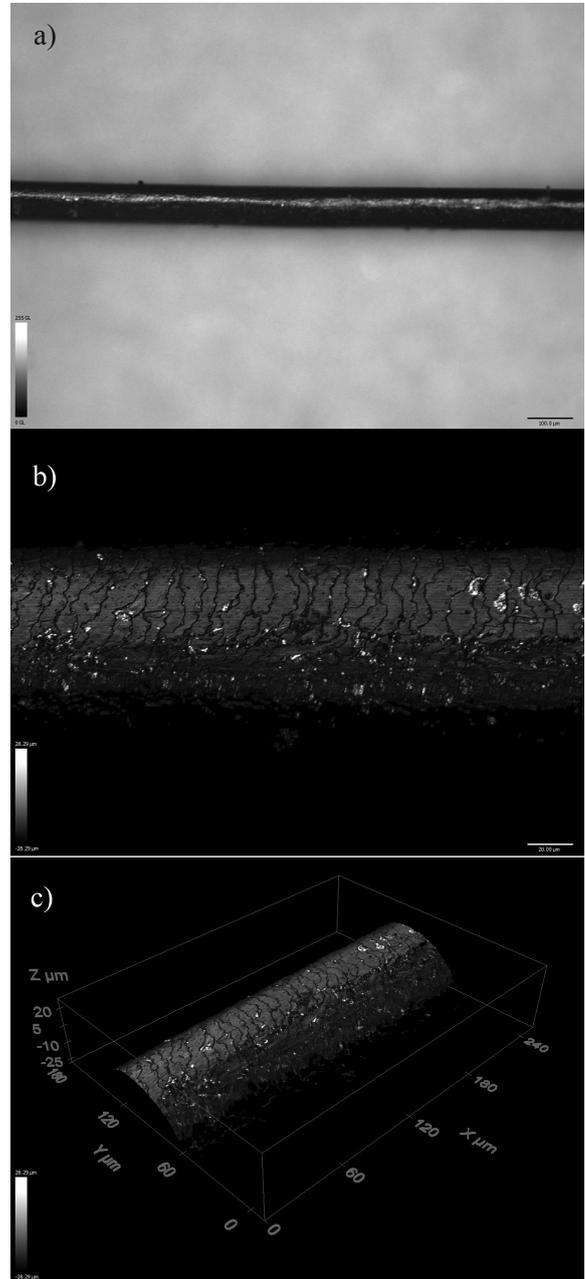


Figura 5 - (a) Imagem de seção do fio de cabelo A capturada pelo microscópio confocal no modo imagem usando a lente EPI 10X-L. A escala horizontal (100 μm) se encontra na borda inferior direita. (b) Imagem da seção de interesse obtida com a lente EPI 50X-L com informação topográfica e com escala horizontal (20 μm) na borda inferior direita. (c) Topografia da mesma região do fio de cabelo A mostrado em (b) obtida com a mesma lente. Os eixos apresentam as medidas em μm .

Tabela 1 - As três últimas colunas apresentam as medidas realizadas com as técnicas explicitadas na segunda linha. O último algarismo exibido é o algarismo duvidoso da medida. As medidas do confocal foram aproximadas para o μm .

| Fio de cabelo | Difração (mm) | Confocal (mm) | Micrômetro (mm) |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| A | 0,063 | 0,068 | 0,055 |
| B | 0,050 | 0,052 | 0,061 |
| C | 0,073 | 0,096 | 0,054 |

Assim, consideramos que nossa proposta é capaz de estimar dimensões de objetos cuja espessura seja menor do que a resolução de instrumentos de medida direta. Para reforçar a confiança nas medidas feitas pelo nosso dispositivo, fizemos a comparação da medida da espessura dos grafites feitas pelo dispositivo e pelo micrômetro. Estes resultados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Na primeira coluna exibimos as medida nominais dos grafites usados. Nas duas últimas apresentamos as medidas realizadas com a técnica de difração e com o micrômetro. O último algarismo exibido nestas duas últimas colunas é o algarismo duvidoso da medida.

| Grafite (mm) | Difração (mm) | Micrômetro (mm) |
|--------------|---------------|-----------------|
| 0,3 | 0,372 | 0,381 |
| 0,5 | 0,532 | 0,557 |
| 0,7 | 0,674 | 0,722 |
| 0,9 | 0,851 | 0,910 |
| 2 | - | 1,710 |

O procedimento experimental utilizado para medir a espessura dos grafites é o mesmo descrito anteriormente para o fio de cabelo. No entanto, em função das franjas estarem mais próximas umas das outras, é difícil medir a diferença entre o máximo central e a primeira ordem de difração. Por isso, medimos a distância entre o máximo central e a quarta ordem de difração ($m = 4$). Além disso, não observamos o padrão de difração para o grafite n. 2. Novamente, notamos um bom acordo entre os resultados experimentais medidos por difração e com o micrômetro. Dessa forma, apesar do experimento de difração ter sido realizado com materiais de baixo custo, entendemos que o resultado da medida é bem convincente, podendo ser utilizado para fins didáticos. A realização de medidas de espessuras permitem, ainda, que o aluno de ensino médio tenha uma vivência experimental e possa lidar com efeitos científicos de grande aplicação tecnológica.

4. Conclusões

A compreensão luz como uma onda, nos traz, no mínimo, uma visão mais abrangente acerca da natureza da luz. Isso nos permite compreender uma série de fenômenos que não são explicados através do modelo de geométrico. Nesse sentido, entendemos que as mudanças curriculares que buscam iniciar as discussões sobre a luz em torno de sua natureza ondulatória são de grande valia, pois colaboram para uma visão mais

próxima da realidade, permitindo que alunos compreendam fenômenos que não seriam explicados pela sua propagação retilínea. Com objetivo de contribuir para essa abordagem propomos um experimento, cujo objetivo é disparar as discussões acerca da natureza ondulatória da luz e o regime onde a óptica geométrica tem validade. Acreditamos que através das observações dos efeitos evidenciados por nossa proposta experimental os próprios estudantes podem fazer suas conjecturas para explicar a natureza da luz e, conseqüentemente, estabelecer conexões entre a óptica e o eletromagnetismo. Além disso, o experimento com difração é capaz de fazer medidas precisas de objetos cuja espessura seja menor do que a resolução de alguns instrumentos de medida direta, como o micrômetro, por exemplo, no caso do fio de cabelo. O experimento mostrou medidas bem confiáveis, possibilitando para o estudante o conhecimento de uma nova técnica de medida utilizando a luz, além das possíveis discussões acerca de tratamento de dados experimentais. Finalmente, acreditamos que esse experimento possa ser levado para a sala de aula, contribuindo para uma melhor compreensão do aluno acerca da luz e sua natureza ondulatória, bem como a percepção das implicações tecnológicas desse conhecimento.

Referências

- [1] J.L.P. Ribeiro e M.F.S. Verdaux, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **34**, 4403 (2012).
- [2] Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro, *Currículo Mínimo 2012 - Física* (SEEDUC, Rio de Janeiro, 2012).
- [3] Brasil, *Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio* (Ministério da Educação e Cultura, Brasília, 2000).
- [4] A.L. Scarinci e F. Marineli, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36** 1309 (2014).
- [5] B.A. Moura, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 4602 (2014).
- [6] H.J. Kalinowski e N.M.D. Garcia, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **7**, 64 (1990).
- [7] L.F.M. Braun e T. Braun, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **11**, 184 (1994).
- [8] M.A. Cavalcante, V. Jardim. e J.A.A. Barros, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 154 (1999).
- [9] E.M. Lopes e C.E. Laburú, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 258 (2004).
- [10] C.E.P. Villani e S.S. Nascimento, *Investigações em Ensino de Ciências* **8**, 187 (2003).
- [11] A.T. Borges, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 291 (2002).
- [12] H. Moisés Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2000), v. 2.
- [13] A.E. Seigman, *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, 1968).