

VISUALIZANDO A DIFRATOMETRIA

Leonardo F. Valadares^{a,*} e Napoleão F. Valadares^b^aEmbrapa Agroenergia, 70770-901 Brasília – DF, Brasil^bDepartamento de Biologia Celular, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília – DF, Brasil

Recebido: 19/06/2025; aceito: 17/11/2025; publicado online: 27/11/2025

VISUALIZING THE DIFFRACTOMETRY. This classroom-oriented study goes beyond simple visualization by directly comparing laser diffractometry and light microscopy measurements to quantify micron-scale spacings in commercial CDs/DVDs (compact disc/digital versatile disc) and electron-microscopy grids. Diffraction angles from reflection (CD/DVD) and transmission (grids) patterns were captured using a digital camera. We systematically validate the diffractometry results with microscopy, teaching the scientific principle of cross-validation. Furthermore, by employing grids with square, rectangular, and hexagonal symmetries, we provide a tangible introduction to symmetry and reciprocal space, demonstrating the inverse relationship between grating spacing and diffraction pattern scale. Designed for educational settings, these experiments use affordable materials to teach core principles of diffraction with applications in material science and chemistry.

Keywords: laser; diffractometry; diffraction patterns; microscopy; classrooms demonstrations.

INTRODUÇÃO

A difratometria é uma importante técnica de caracterização baseada em princípios físicos, que fornece informações sobre a estrutura de sólidos. Entre suas aplicações, destacam-se a obtenção de informações sobre o espaçamento entre estruturas, o grau de cristalinidade, o tamanho, a simetria e a organização de átomos, moléculas e macromoléculas, que são de fundamental importância para a química e a física. Por exemplo, a difração de raios X é rotineiramente empregada para determinar o arranjo tridimensional dos átomos de uma grande variedade de moléculas, desde pequenos compostos, como a aspirina,¹ até complexos macromoleculares, como o ribossomo.² Entretanto, devido à necessidade da utilização de raios X como fonte de radiação, a visualização direta do princípio de funcionamento dessa técnica não é possível, o que dificulta seu estudo e o ensino.

No ensino médio ou em um laboratório de graduação, existe uma deficiência na abordagem didática do ensino da difratometria, que pode ser suprida pelo emprego de lasers, pois experimentos utilizando luz visível são versáteis, possuem facilidade de realização e visualização.³ Hoje, os estudantes conhecem diversas aplicações dos lasers, como leitores de códigos de barra, apontadores (*pointers*) de apresentações, espetáculos de luzes, cirurgias, sensores a laser e leitores de dados de CDs (disco compacto) e DVDs (disco digital versátil). Como consequência, esses alunos nutrem uma curiosidade por essa forma da luz e apresentam um conhecimento sobre algumas de suas propriedades. Por exemplo, sabem que um feixe de laser não se espalha muito e, em geral, é visto na forma de um ponto. Partindo desse conhecimento, é fácil entender que um feixe de laser é colimado, o que significa que suas ondas se propagam de forma paralela. Em razão da cor, também é simples entender que se trata de uma luz monocromática.

Embora a difração de raios X seja uma técnica complexa, o princípio físico por trás dela é exatamente o mesmo que será demonstrado neste artigo com lasers e objetos do cotidiano. Assim

como a luz visível é difratada pelas trilhas microscópicas de um CD, os raios X são difratados pelos átomos organizados em um material sólido, isto é, em um cristal. O padrão de pontos de difração gerado, seja com laser ou com raios X, funciona como uma “impressão digital” única da estrutura que o produziu. A partir da medição dos ângulos e da intensidade desses pontos, torna-se possível deduzir a organização dos átomos ou moléculas no material, as distâncias entre eles e a simetria dessa organização.

Na química, a interpretação dessa “impressão digital” é fundamental, pois permite determinar a distância entre átomos e a forma de moléculas complexas. Além disso, a análise dos padrões de difração possibilita identificar materiais desconhecidos, como minerais em amostras geológicas ou componentes presentes em catalisadores industriais. Dessa forma, ao aprender a medir o espaçamento das trilhas de um CD por meio da difração de laser, o estudante não apenas compreende um fenômeno físico acessível, mas também se apropria de um conceito fundamental que serviu de base para descobertas químicas revolucionárias.

A relevância desse conceito para a química é atestada pelo fato de a difratometria de raios X ter sido fundamental para descobertas laureadas com o Prêmio Nobel de Química.⁴ Entre esses laureados, destacam-se: Peter Debye (1936), que contribuiu para a compreensão da estrutura molecular; Max Perutz e John Kendrew (1962), que determinaram as estruturas da hemoglobina e da mioglobina, desvendando como proteínas transportam oxigênio; Dorothy Hodgkin (1964), que elucidou as estruturas da penicilina, da vitamina B₁₂ e da insulina, revolucionando a bioquímica estrutural; William N. Lipscomb (1976), que investigou a estrutura dos boranos; Herbert Hauptman e Jerome Karle (1985), que desenvolveram métodos matemáticos diretos para a resolução de estruturas cristalinas; Venkatraman Ramakrishnan, Thomas Steitz e Ada Yonath (2009), que utilizaram cristalografia de raios X para desvendar a estrutura do ribossomo, peça-chave na síntese de proteínas; e Dan Shechtman (2011) que descobriu os quasicristais, redefinindo o conceito de cristal. Esses exemplos ilustram como a difratometria, embora fundamentada na física, foi essencial para avanços fundamentais da química – muitos dos quais com profundas aplicações na área biomédica.

*e-mail: leonardo.valadares@embrapa.br

Editora Associada responsável pelo artigo: Lucia Mascaro



Canetas laser e laser *pointers* são dispositivos de ampla disponibilidade e baixo custo que podem ser utilizados em demonstrações. A possibilidade de visualizar os fenômenos estudados em tempo real é outra característica dos lasers que desperta o interesse dos alunos. Além disso, a segurança no uso desses utensílios e a fácil caracterização de suas propriedades, como comprimento de onda, potência e tamanho do feixe, tornam o laser uma ferramenta com características ideais para uso em sala de aula e na pesquisa científica.

Neste estudo, aproveitamos essa oportunidade pedagógica no preparo de experimentos que tornam as aulas interessantes, tirando proveito da curiosidade e dos conhecimentos prévios dos estudantes. Utilizando lasers, este artigo apresenta experimentos simples que ilustram propriedades da luz, como a difração e a interferência, conceitos posteriormente necessários para estudo de técnicas complexas, como a difratometria e a microscopia. Contudo, a proposta vai além da simples visualização: combinamos a difratometria a laser e a microscopia de luz em uma abordagem didática que permite não apenas ilustrar esses fenômenos, mas também realizar uma validação cruzada e quantitativa das medições. Além disso, exploramos de forma sistemática como a simetria de diferentes grades de difração – quadrada, retangular e hexagonal – se reflete em seus padrões característicos, introduzindo de maneira tangível o conceito de espaço recíproco, fundamental para técnicas avançadas como a difração de raios X. Esses experimentos didáticos, ao mesmo tempo acessíveis e rigorosos, propiciam a observação direta dos resultados, ensinam princípios de metrologia científica e podem ser reproduzidos em sala de aula de forma rápida e de baixo custo.

Para tanto, apresentamos imagens obtidas por microscopia de luz de objetos capazes de difratar lasers, como CDs, DVDs e grades de difração com diferentes simetrias (telas de microscopia eletrônica de transmissão ou *grids*). Em paralelo, são mostradas imagens fotográficas dos padrões de difração projetados em anteparos, produzidos por lasers vermelho e verde que são refletidos ou atravessam esses objetos. Os valores obtidos por microscopia e por difratometria são comparados de forma direta e quantitativa, validando o método difratométrico. A análise dos padrões de difração permite ainda extrair informações sobre a simetria das amostras, demonstrando diferentes abordagens para medição de distâncias em estruturas periódicas.

Em conjunto, este estudo apresenta uma série de experimentos de fácil execução em sala de aula ou no laboratório que vão além da mera demonstração fenomenológica. Propomos um método para validação experimental de resultados aliado a um recurso visual intuitivo para o ensino de conceitos de simetria e de sua relação com técnicas de difração. Essa abordagem fornece o embasamento teórico necessário à compreensão desses fenômenos e esclarece aspectos centrais da difratometria aplicados ao ensino de química e física.

Difração e lasers

Antes da execução de experimentos, é importante estabelecer conceitos importantes relacionados à luz laser. O primeiro é o conceito de onda, que pode ser entendido como uma oscilação que se propaga através do espaço ou da matéria. As ondas apresentam duas características principais, a frequência, que corresponde a quantas vezes a onda oscila em determinado intervalo de tempo, e a amplitude, que pode ser entendida como a intensidade da onda. Quando duas ou mais ondas se encontram, ocorre sua sobreposição, um fenômeno chamado de interferência, que pode ser construtiva, caso as ondas estejam em fase, ou interferência destrutiva, caso as ondas se encontrem fora de fase. De forma simplificada, ondas em fase apresentam amplitude positiva em um mesmo local ao mesmo

tempo. Já na interferência destrutiva, temos uma onda com amplitude positiva e outra com amplitude negativa em um mesmo local ao mesmo tempo, anulando-se.

O termo laser é um acrônimo do inglês que significa “amplificação da luz pela emissão estimulada de radiação” (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Um feixe de luz laser apresenta três características importantes: é monocromático, pois todas as ondas que o compõe apresentam a mesma frequência; é coerente, o que significa que todas as suas ondas apresentam a mesma fase; e é colimado, pois suas ondas se propagam de forma paralela em relação umas às outras.⁵ Essas propriedades fazem um feixe laser ser observado como um ponto de alta intensidade ao atingir um anteparo. Neste texto, utilizaremos os termos “luz laser”, “feixe laser” ou simplesmente “laser”, para se referir à radiação eletromagnética que apresente essas características.

Difração é um fenômeno comum a todas as ondas, e ocorre quando elas encontram um obstáculo e mudam sua trajetória.⁶ O efeito observado pode ser descrito como a curvatura ou o espalhamento da luz após atravessar um obstáculo, sendo o efeito mais notável quando o obstáculo possui dimensões comparáveis ao comprimento da onda.⁷ No caso da luz, a ocorrência de interferência construtiva e destrutiva entre as ondas do feixe difratado produz um padrão de variação de intensidade luminosa, chamado de padrão de difração. O padrão de difração, por sua vez, apresenta informações sobre o obstáculo, como suas dimensões e sua simetria.

PARTE EXPERIMENTAL

Descrição teórica

De modo simples, quando um feixe de laser atravessa ou é refletido por estruturas com espaçamento regular – como grades de difração, telas, CDs ou DVDs – observa-se um padrão de difração característico. Esse padrão apresenta o feixe direto no centro, cercado por pontos de menor intensidade correspondentes aos feixes difratados que satisfazem a condição de interferência construtiva. Os pontos mais próximos ao feixe central estão defasados por exatamente um comprimento de onda ($n = 1$). O ponto seguinte fica defasado dois comprimentos de onda ($n = 2$) e assim por diante ($n = 3, 4, 5...$).

A Figura 1 mostra como a difratometria é utilizada para medir a distância entre orifícios de uma tela utilizando luz monocromática e as condições de interferência construtiva das ondas, como descrito pela Lei de Bragg (Equação 1).

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin\theta \quad (1)$$

O ângulo em que ocorre a interferência construtiva, θ , depende da distância entre os orifícios da tela e do comprimento de onda do laser. Isso ocorre porque os feixes de luz difratados por dois orifícios percorrem distâncias diferentes até o anteparo (Figura 1a). A distância entre a tela e o anteparo é grande o suficiente para que a luz oriunda de dois orifícios apresente um trajeto praticamente paralelo, como apresentado na Figura 1b, que também mostra que as ondas provenientes do orifício 2 percorrem uma distância $d \times \sin\theta$ maior que as do orifício 1 até o anteparo. Como implicação, temos que, se o comprimento de onda da luz utilizada for $d \times \sin\theta$, a luz proveniente dos dois orifícios estará em fase ao atingir o anteparo (Figura 1c), portanto interferência construtiva será observada nesse ponto. Como os espaçamentos entre os orifícios são iguais, a luz de todos os orifícios apresentará interferência construtiva nesse ponto do anteparo, e a interferência construtiva ocorrerá sempre que a Equação 1 for satisfeita, na qual d é a distância dos orifícios, λ é o comprimento de onda da luz e n é um número natural que indica que

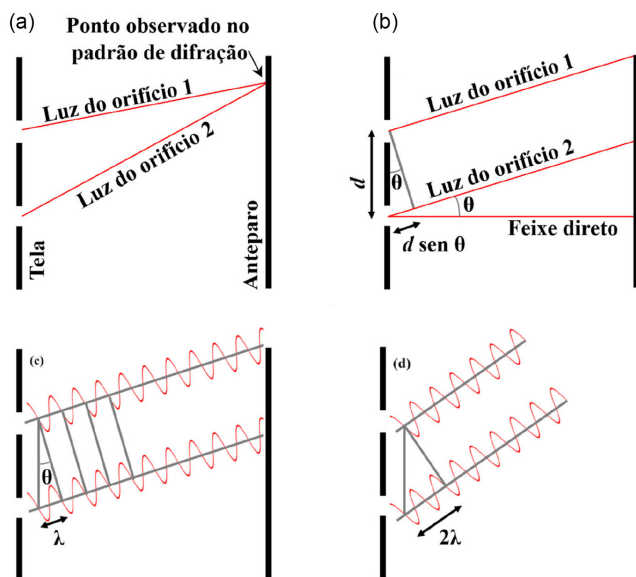


Figura 1. Esquema simplificado ilustrando a condição de interferência construtiva descrita na Equação 1. (a) Esquema onde a luz proveniente de dois orifícios adjacentes em uma tela incide sobre o mesmo ponto no anteparo. (b) A distância entre a tela e o anteparo é muito maior que a distância entre dois orifícios na tela, d , portanto, raios oriundos de orifícios adjacentes são praticamente paralelos. A luz proveniente do orifício 2 percorre uma distância $d \times \sin\theta$ maior que a luz do orifício 1. (c) Quando o comprimento de onda do laser utilizado, λ , é igual a $d \times \sin\theta$, a luz proveniente dos orifícios 1 e 2 estará em fase, e a interferência construtiva desses dois feixes será observada no anteparo, na forma de um ponto de alta intensidade. (d) No ângulo onde a luz espalhada pelos orifícios 1 e 2 está defasada por distância igual a dois comprimentos de onda, $2 \times \lambda$, também ocorre interferência construtiva. Assim, a condição para a interferência construtiva pode ser descrita pela Equação 1, em que d é a distância entre os orifícios na tela, λ é o comprimento de onda do laser utilizado, θ é o ângulo formado entre o feixe de luz em questão e o feixe direto, e n é um número natural (adaptada de Al-Azawi)⁸

essa condição será satisfeita, caso o comprimento de onda seja duas vezes $d \times \sin\theta$, três vezes $d \times \sin\theta$, e assim por diante.

Uma consequência fundamental desta equação é a relação de reciprocidade entre o espaçamento da rede (d) e o padrão de difração. Quanto menor o espaçamento d , maior o ângulo θ para uma dada ordem n , o que resulta em um padrão de difração mais expandido. Esse princípio corresponde ao conceito de espaço recíproco: estruturas mais compactas no espaço real produzem padrões mais amplos no espaço de difração, e vice-versa. Trata-se, contudo, de uma ideia frequentemente contraintuitiva, razão pela qual será explorada e visualizada experimentalmente ao longo deste trabalho.

Materiais

Nos experimentos de difração, foram utilizadas uma fonte de laser vermelho CIS Laser Pen, com comprimento de onda nominal de 630-650 nm e potência < 5 mW, e uma fonte de laser verde Green Laser Pointer, com comprimento de onda nominal de 532 ± 10 nm e potência < 200 mW (cuidado: a incidência do laser diretamente nos olhos pode ocasionar problemas de visão).

Em experimentos didáticos, é altamente recomendável o uso de lasers com potência em torno de 5 mW. Lasers dessa potência, classificados como Classe 3R, permitem a realização de demonstrações eficazes de fenômenos ópticos, pois oferecem um equilíbrio ideal entre visibilidade do feixe e segurança, com risco mínimo, desde que usados com os devidos cuidados – especialmente

evitando o contato direto com os olhos. Em contrapartida, lasers de 200 mW, classificados como Classe 3B, representam risco à integridade ocular e à pele, exigindo o uso de equipamentos de proteção individual e a adoção de protocolos de segurança. Por essas razões, são inadequados para o ambiente de sala de aula.

CD e DVDs adquiridos comercialmente foram usados (CD-R CIS premium e DVD-R Philips). Para a visualização do trajeto do laser nos experimentos com CD e DVD, foi utilizada uma máquina de fumaça MonsterLight modelo SBL-1000W.

Porta-amostras de microscopia eletrônica de transmissão, chamados de *grids* ou telinhas, foram utilizados nos experimentos de difração: tela quadrada de 200 mesh, Ted Pella Gilder Grids 200 mesh (G200) de tamanho de fenda nominal $90 \mu\text{m}$ e largura da barra $35 \mu\text{m}$; tela quadrada de 400 mesh Ted Pella Gilder Grids 400 mesh (G400) de tamanho de fenda nominal $37 \mu\text{m}$ e largura da barra $25 \mu\text{m}$; uma tela retangular Breguer and Krugger 75-300 mesh (BKG75-30030P) com tamanhos das fendas nominais de 290 e $58 \mu\text{m}$ e largura das barras de 50 e $25 \mu\text{m}$; e tela hexagonal de 200 mesh, Ted Pella Gilder Fine Bar Hexagonal (G200HH), de tamanho de fenda nominal $113 \mu\text{m}$ e largura da barra $12 \mu\text{m}$.

A caracterização por microscopia de luz do espaçamento e da forma das aberturas das grades de difração foi realizada utilizando microscópios Zeiss, modelos AxioImager A2 e Z2. Para analisar a superfície metálica dos CDs e DVDs, foi necessário parti-los e analisar a superfície em modo de luz refletida.

Para a captura e registro dos padrões de difração em sala escura, foi utilizada uma câmera fotográfica digital Nikon D3100 equipada com lente Nikkor 18-55VR.

Os perfis de linha obtidos nos difratogramas foram traçados pelo programa ImageJ, versão 1.49,⁹ de domínio público. O programa ImageJ 1.49 também foi utilizado para medir a distância nas imagens de microscopia e o ângulo de difração em fotografias. Dez medidas foram realizadas em cada imagem. O erro das medidas se refere ao desvio padrão.

A Figura 2 apresenta um esquema da configuração dos elementos utilizados nos experimentos de difração, em que a fonte laser e a amostra foram montadas com auxílio de suporte, garras e pinça. A Figura 2a mostra o experimento em que o feixe é refletido e difratado por CD ou DVD, pois esses possuem uma película metálica com raias espaçadas regularmente. Nesses experimentos, foi utilizada uma máquina de fumaça para visualizar o trajeto do laser, sendo possível medir diretamente o ângulo θ e consequentemente medir a distância entre as raias, d . A câmera fotográfica foi posicionada perpendicularmente ao plano formado pelos feixes difratados, a uma distância de aproximadamente 1 m, de modo a minimizar erros relacionados à perspectiva e à paralaxe na fotografia.

A Figura 2b mostra a montagem do experimento, em que o laser é transmitido e difratado por telas metálicas. Essas amostras foram posicionadas a 1 m de distância de uma parede branca utilizada como anteparo para a projeção do padrão de difração. Uma régua previamente fixada no anteparo fornece a escala. Na Figura 2b, d corresponde à distância entre os orifícios da grade de difração regularmente espaçados, a é a distância entre a grade e o anteparo (neste trabalho $a = 1$ m) e b é a distância entre o feixe direto e o feixe difratado mais próximo ($n = 1$). Aqui, a e b são usados para calcular θ .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma das vantagens da utilização de lasers é sua visualização. A análise visual do resultado da difração de materiais com características distintas permite um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos. Para medir a distância entre as raias de CD e DVDs por difratometria, utilizou-se uma máquina de fumaça para criar um aerossol que permite

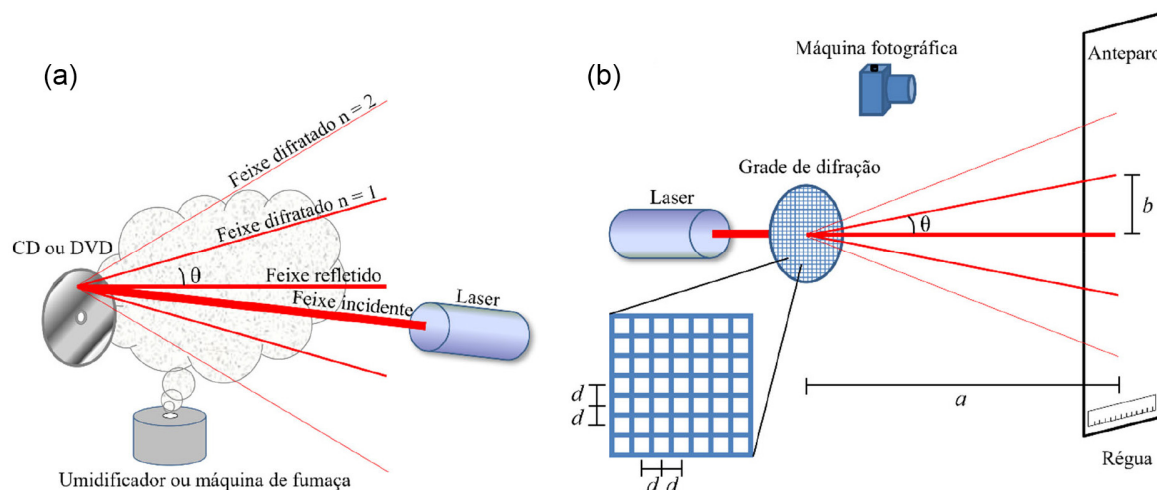


Figura 2. Aparato experimental utilizado nos experimentos de difratometria. (a) Esquema mostrando o experimento com o feixe laser refletido por CD ou DVD; (b) esquema ilustrando a montagem do experimento em que o feixe atravessa grades de difração

a visualização do percurso traçado pelo laser incidente, refletido e difratado. A Figura 3 mostra os resultados obtidos com CD.

A Figura 3a apresenta uma imagem de microscopia em que as raias de um CD são visualizadas. As medidas na imagem mostram que as raias estão espaçadas por distância regulares de $1,52 \pm 0,01 \mu\text{m}$. As raias são observadas como paralelas por causa da magnificação da imagem, mas entende-se que essas descrevem um trajeto circular no corpo do CD. As Figuras 3b e 3c mostram fotografias do feixe laser que incide em um CD, em que é refletido e também difratado pelas estruturas espaçadas regularmente. É possível ver seis feixes de lasers distintos: o feixe incidente, mais intenso, que sai da fonte laser e atinge o CD; o feixe refletido diretamente pelo CD, como em um espelho; e quatro feixes difratados, dois com $n = 1$ e dois com $n = 2$. Os ângulos entre os feixes refletidos e difratados foram medidos e substituídos na equação $d \times \sin\theta = n \times \lambda$, e os valores obtidos para a distância entre as raias foram $1,41 \pm 0,04 \mu\text{m}$ para a luz vermelha e $1,42 \pm 0,03 \mu\text{m}$ para a luz verde. Os resultados de difratometria são próximos, independentemente do laser utilizado, entretanto, o ângulo formado pela luz vermelha é maior que o da luz verde, devido ao seu comprimento de onda ser maior.

Vale destacar que a escala de distâncias envolvida neste experimento – da ordem de micrômetros – é várias ordens de grandeza maior que a distância interatômica em um cristal, que se encontra na faixa dos nanômetros ou angströms e constitui o alvo da difração de raios X. Apesar dessa diferença, o princípio de medição permanece idêntico: ambos os fenômenos são regidos pela Lei de Bragg. Assim, o experimento reproduz, em uma escala acessível, a mesma metodologia empregada para determinar parâmetros estruturais fundamentais na química do estado sólido.

De modo análogo, as medidas foram realizadas em DVD, como ilustrado na Figura 4.

As medidas realizadas por microscopia (Figura 4a) mostram que as raias do DVD estão distanciadas regularmente pela distância de $0,75 \pm 0,01 \mu\text{m}$, valor próximo ao limite de resolução do microscópio de luz. Na difratometria (Figuras 4b e 4c), foram obtidos os valores $0,72 \pm 0,03 \mu\text{m}$ para a luz vermelha e $0,74 \pm 0,02 \mu\text{m}$ para luz verde, condizentes com as medidas de microscopia. Além do feixe incidente e do feixe refletido, é possível observar apenas dois feixes difratados. Isso ocorre porque os feixes com $n = 2$ ocorreriam em ângulo maior que 90° . Outros experimentos didáticos utilizando CDs e DVDs são amplamente divulgados e podem ser acessados a fim de complementar os experimentos aqui descritos.^{10,11}

A Figura 5a apresenta uma imagem de microscopia de luz

de uma tela quadrada com orifícios de $94 \mu\text{m}$ e fios de $32 \mu\text{m}$ de espessura. A Figura 5b mostra o padrão de difração obtido pela incidência do laser vermelho nessa tela e visualizado em um anteparo a um metro de distância. A Figura 5c mostra o padrão de difração obtido nas mesmas condições utilizando um laser verde. O arranjo experimental utilizado para fotografar estes padrões de difração é mostrado na Figura 2b.

A imagem de microscopia (Figura 5a) mostra a tela metálica preta, por ser opaca, e os orifícios brancos. As medidas realizadas na imagem resultam na distância entre as estruturas de $125,7 \pm 0,3 \mu\text{m}$, condizentes com o valor especificado pelo fabricante: $126 \mu\text{m}$.

Os padrões de difração apresentam ao centro da imagem o feixe direto, mais intenso, e os feixes difratados ao redor. Medindo a distância b , entre o feixe direto e os feixes difratados mais próximos ($n = 1$), é possível calcular o ângulo de difração, considerando a distância entre a amostra e o anteparo, a . Utilizando essa abordagem, a difratometria fornece o resultado de $121,3 \pm 1,0 \mu\text{m}$ para a luz vermelha e $125,3 \pm 0,4 \mu\text{m}$ para a luz verde.

Nas mesmas condições, os lasers vermelho e verde produzem padrões de difração diferentes, pois emitem luz em comprimentos de onda distintos, 640 e 532 nm , respectivamente. Em razão de seu maior comprimento de onda, o laser vermelho apresenta pontos mais espaçados e ângulo θ maior que o laser verde, condizentes com a Equação 1. O difratograma obtido com a luz verde apresenta mais pontos e, por causa da maior potência da fonte laser verde, sua intensidade satura o detector da câmera em alguns pontos.

Os perfis de linha (parte inferior das Figuras 5b e 5c) são uma forma de visualizar a variação de intensidade ao longo da linha principal de difração. Eles quantificam a intensidade dos pontos, tornando mais fácil a medida da distância entre os pontos e a observação da variação simétrica das intensidades em relação ao feixe direto. Neste trabalho, não é explorado o estudo quantitativo da distribuição da intensidade de luz no padrão de difração. Para mais detalhes sobre este tópico, recomenda-se o trabalho de Oliveira *et al.*,¹² ou a consulta de livros textos clássicos.⁷

A Figura 6 apresenta os resultados dos experimentos realizados com tela quadrada de 400 mesh .

Os orifícios quadrados presentes na tela de 400 mesh (Figura 6a) são menores que na tela de 200 mesh . A distância entre as estruturas da tela de 400 mesh medida por microscopia é de $63,1 \pm 0,2 \mu\text{m}$. As medidas de difratometria são de $60,3 \pm 0,2 \mu\text{m}$ para a luz vermelha e de $61,6 \pm 0,1 \mu\text{m}$ para a luz verde, sendo os valores comparáveis ao fornecido pelo fabricante: $62 \mu\text{m}$.

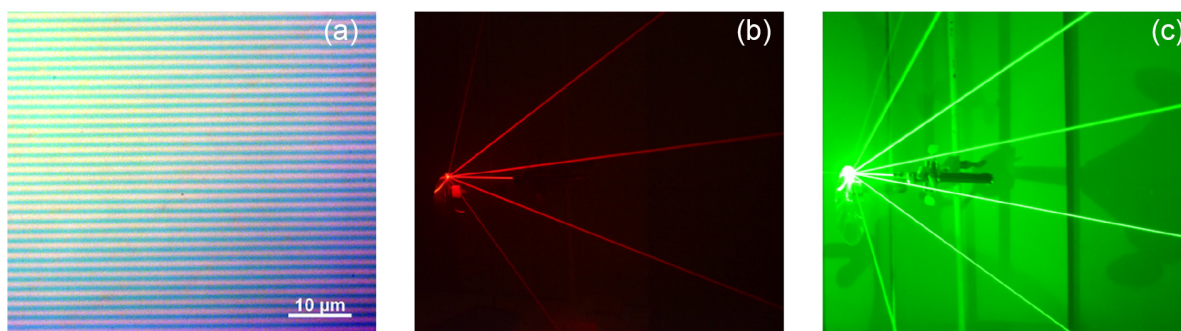


Figura 3. (a) Imagem de microscopia das trilhas de CD, mostrando que as trilhas estão espaçadas por distâncias regulares. Fotografias mostrando (b) um laser vermelho e (c) um laser verde que incidem e são refletidos por um CD. Nas imagens, é possível ver feixes difratados onde ocorre interferência construtiva dos lasers e também medir o ângulo entre os feixes difratados e o feixe refletido. Nestes experimentos foi utilizado aerossol gerado por máquina de fumaça para visualizar os trajetos dos feixes laser

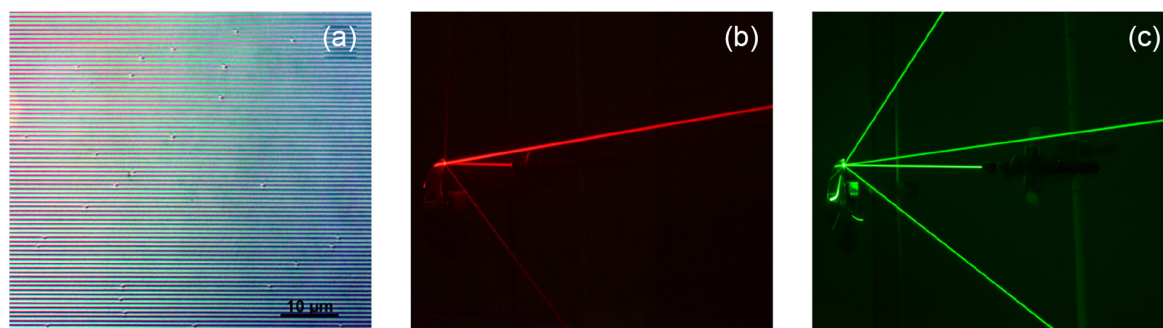


Figura 4. (a) Imagem de microscopia das raiais de DVD, mostrando que as raiais estão espaçadas por distâncias regulares. Fotografias mostrando (b) laser vermelho e (c) laser verde que incidem e são refletidos por um DVD. Nas imagens, é possível observar os feixes difratados e medir o ângulo entre esses feixes e o feixe refletido. Nestes experimentos foi utilizado aerossol gerado por máquina de fumaça para visualizar os trajetos dos feixes laser

É importante deixar claro que a difração pode ser contraintuitiva. Os espaços entre os pontos no padrão de difração não correspondem à sombra dos fios da tela quadrada e, na verdade, quanto mais próximas as estruturas analisadas, maior o ângulo de difração e maior a distância entre os pontos no padrão obtido. Para exemplificar esse fenômeno, a Figura 7a apresenta uma tela retangular, onde a distância entre as estruturas na horizontal é menor que na vertical. Já os feixes difratados estão separados por distância maior na horizontal que na vertical (Figuras 7b e 7c).

Observando a difração produzida por uma tela retangular, as barras mais próximas, paralelas na horizontal, resultam em pontos mais espaçados entre si. A Figura 7a mostra que a distância de separação dos orifícios na horizontal, correspondente ao menor lado do retângulo, é de 84,9 µm. Já as Figuras 7b e 7c mostram que os feixes difratados na horizontal estão separados por distâncias de 0,81 e 0,66 mm, respectivamente. Por outro lado, a distância vertical, correspondente à maior dimensão dos retângulos, é de 341,5 µm, medida por microscopia. Já os pontos dos difratogramas estão muito próximos, não sendo possível distinguir o feixe mais próximo do feixe direto. Assim, feixes de maior ordem foram medidos, resultando na distância entre os feixes de 0,21 e 0,17 mm, para a luz vermelha e verde, respectivamente.

Esse princípio de reciprocidade é exemplificado na Figura 7a, que apresenta uma tela retangular na qual a separação entre as estruturas na horizontal é menor do que na vertical. Como previsto pela teoria, os feixes difratados associados à direção mais compacta (horizontal) aparecem mais afastados entre si no anteparo em comparação com os feixes correspondentes à direção de menor compactação (vertical), como mostrado nas Figuras 7b e 7c.

Outra informação importante fornecida pela difratometria é a simetria, pois o difratograma apresenta a mesma simetria da amostra.¹³ Assim, a difração também fornece informações sobre o formato e

a organização dos objetos que difratam a luz. Na Figura 7, a grade retangular e os padrões de difração apresentam simetria rotacional de ordem 2, e nas Figuras 5 e 6, são apresentadas grades quadradas e difratogramas com simetria rotacional de ordem 4. A Figura 8 ilustra resultados referentes a uma tela hexagonal e difratogramas com simetria rotacional de ordem 6.

A difração obtida pelo uso de uma tela hexagonal apresenta um eixo de simetria 6, indicando que é possível identificar a simetria das amostras pela simples observação de seu padrão de difração. A distância entre as estruturas da tela hexagonal medida por microscopia é de $126,9 \pm 0,3$ µm. As medidas de difratometria são de $107,8 \pm 1,2$ µm, para a luz vermelha, e de $109,0 \pm 1,3$ µm, para a luz verde.

A elucidação da simetria do arranjo cristalino nas amostras é de grande importância para a química, pois a simetria do padrão de difração revela diretamente a simetria da estrutura que o originou, constituindo a base da cristalografia. Na determinação de uma estrutura molecular por difração de raios X, a identificação dessa simetria – formalmente descrita pelo grupo espacial – representa o primeiro e mais crucial passo para a resolução da estrutura atômica. No experimento proposto, esse princípio pode ser observado de forma direta e visual: uma grade hexagonal gera um padrão também hexagonal, correspondente a uma simetria de ordem seis, assim como cristais com a mesma organização, como o quartzo ou a grafita, produzem padrões de difração de raios X com a simetria característica de sua rede cristalina. A combinação da análise de simetria com a validação métrica oferecida pela microscopia transforma este experimento em uma ferramenta pedagógica completa para o ensino dos princípios da caracterização estrutural.

A Tabela 1 apresenta os resultados das medidas realizadas neste trabalho, possibilitando a comparação das medidas de microscopia de luz com as medidas de difratometria utilizando laser vermelho ou verde.

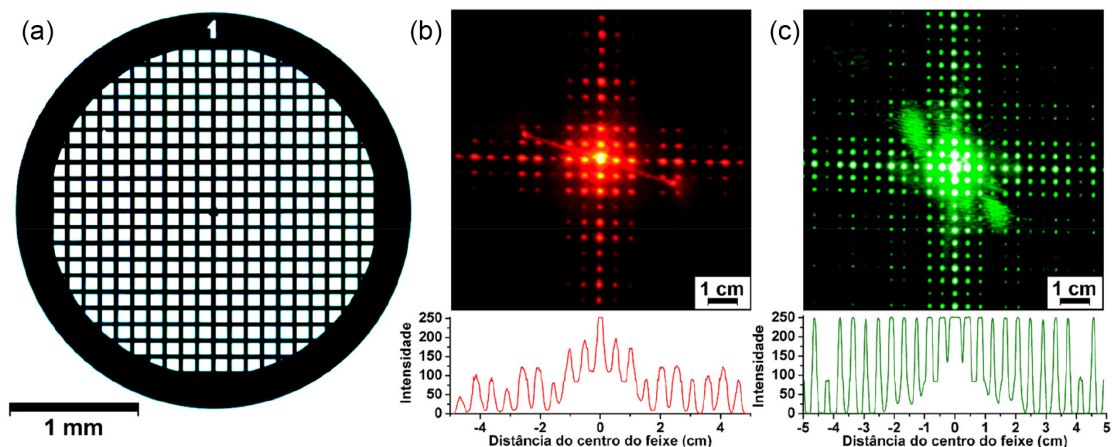


Figura 5. Visualizando o padrão de difração de uma tela quadrada de 200 mesh. (a) Tela quadrada visualizada por microscopia de luz; (b) padrão de difração obtido pela incidência do laser vermelho sobre a tela apresentada em a; (c) padrão de difração obtido pela incidência do laser verde sobre a tela. Os perfis de linha correspondentes são apresentados abaixo de cada padrão de difração e foram capturados na horizontal, passando pelo centro da imagem (feixe direto)

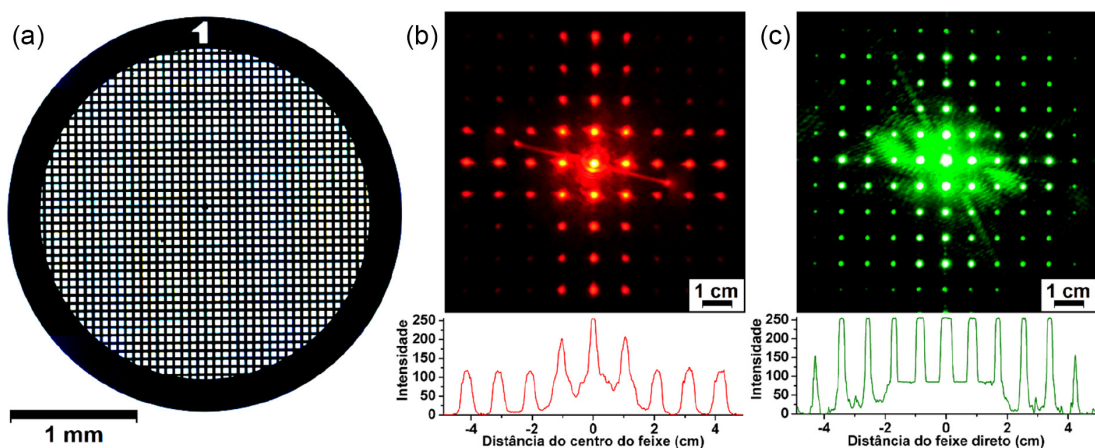


Figura 6. Visualizando o padrão de difração de uma tela quadrada de 400 mesh. (a) Tela quadrada visualizada por microscopia de luz; (b) padrão de difração obtido pela incidência do laser vermelho sobre a tela apresentada em a; (c) padrão de difração obtido pela incidência do laser verde sobre a tela. Os perfis de linha correspondentes são apresentados abaixo de cada padrão de difração

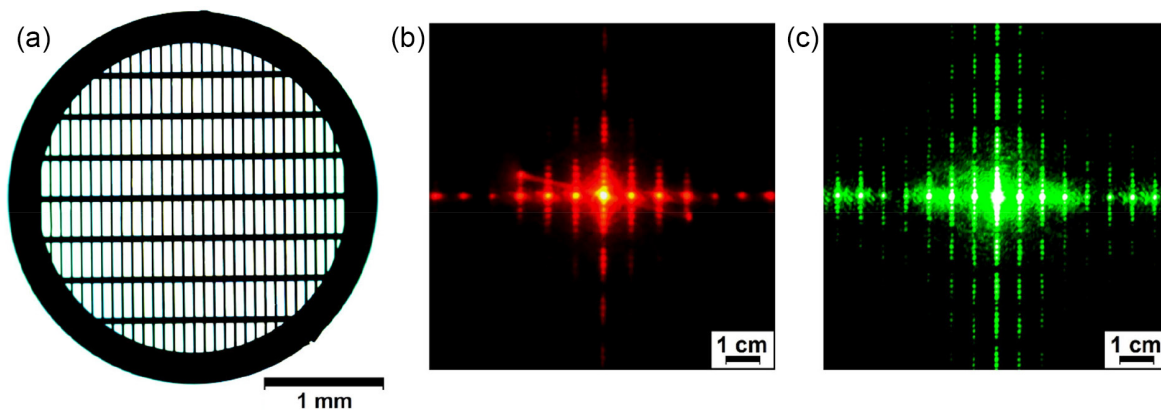


Figura 7. Visualizando o padrão de difração de uma tela retangular. (a) Tela retangular visualizada por microscopia de luz; (b) padrão de difração obtido pela incidência do laser vermelho sobre a tela apresentada em a; (c) padrão de difração obtido pela incidência do laser verde sobre a tela

Uma análise crítica da Tabela 1 revela que as medidas de microscopia e difratometria estão em boa concordância. Entretanto, discrepâncias significativas são observadas para algumas amostras, notadamente na grade hexagonal e na grade retangular quando se utiliza o laser vermelho. Estas diferenças, que chegam a 15%, superam os desvios-padrão reportados e indicam a presença de erro sistemático não contemplado pelo modelo teórico simplificado.

A investigação dos erros de medida constitui uma oportunidade

pedagógica valiosa. Entre as possíveis fontes de erro estão: (i) a medida imprecisa da distância amostra-anteparo (a), crítica para o cálculo; (ii) valores incorretos ou imprecisos para o comprimento de onda do laser (λ); (iii) desalinhamentos geométricos no arranjo experimental, que podem introduzir distorções de perspectiva; e (iv) calibração do microscópio.

Na Tabela 1, as medidas realizadas com o laser verde apresentam maior concordância com os valores de referência (obtidos por

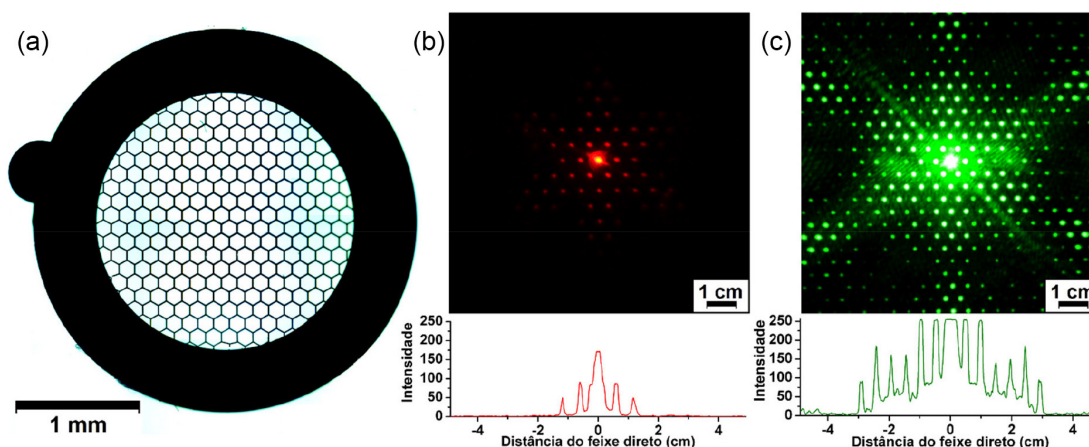


Figura 8. Visualizando o padrão de difração de uma tela hexagonal. (a) Tela hexagonal visualizada por microscopia de luz; (b) padrão de difração obtido pela incidência do laser vermelho sobre a tela apresentada em a; (c) padrão de difração obtido pela incidência do laser verde sobre a tela. Os perfis de linha correspondentes são apresentados abaixo de cada padrão de difração

Tabela 1. Valores das distâncias dos espaçamentos das amostras apresentadas nas Figuras 3 a 8 obtidos por microscopia e difratometria

Amostra	Distância medida por microscopia / μm	Distância medida por difratometria com laser vermelho / μm	Distância medida por difratometria com laser verde / μm	Distância nominal, fornecida pelo fabricante / μm
CD	$1,52 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,04$	$1,42 \pm 0,03$	não se aplica
DVD	$0,75 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,02$	não se aplica
Quadrada 200 mesh	$125,7 \pm 0,3$	$121,3 \pm 1,0$	$125,3 \pm 0,4$	125
Quadrada 400 mesh	$63,1 \pm 0,2$	$60,3 \pm 0,2$	$61,6 \pm 0,1$	62
Hexagonal	$126,9 \pm 0,3$	$107,8 \pm 1,2$	$109,0 \pm 1,3$	125
Retangular – horizontal	$84,9 \pm 0,3$	$79,3 \pm 0,5$	$81,0 \pm 0,2$	83
Retangular – vertical	$341,5 \pm 0,5$	$311,0 \pm 6,3$	$321,5 \pm 2,5$	340

microscopia e fornecidos pelo fabricante) em comparação com as obtidas com o laser vermelho. Isso sugere que o comprimento de onda do laser vermelho (informado pelo fabricante como 630–650 nm) é impreciso ou incorreto, ou ainda que a distância entre a amostra-anteparo não esteja calibrada exatamente em 1 m. Portanto, essas discrepâncias enriquecem o experimento, permitindo que professores e alunos pratiquem a análise de dados, identifiquem fontes de erro e compreendam as limitações e premissas de modelos teóricos – competências fundamentais no ensino de ciências.

Objetos simples e de baixo custo, como lasers, CDs, DVDs e telas finas, podem ser utilizados na execução de experimentos de difração que permitem a identificação de diversas características dos lasers, das amostras e do fenômeno de difração. Neste artigo, os experimentos foram realizados utilizando equipamentos e objetos encontrados em laboratórios, como telas de microscopia, microscópio, máquina de fumaça e máquina fotográfica digital. Entretanto, esses equipamentos não são necessários aos experimentos em sala de aula, apesar de enriquecerem a experiência, sendo possível realizar essas medidas usando apenas objetos do cotidiano.

Telefones celulares atuais possuem câmeras capazes de registrar os padrões de difração e os feixes difratados. Essas câmeras podem ainda registrar imagens de pequenos objetos, utilizando o “modo macro”. Réguas podem ser utilizadas como escala, e lentes de aumento podem ser utilizadas para ampliar a resolução, na distância de foco. As telas podem ser medidas dessa forma, entretanto, as ranhuras de CDs e DVDs apenas podem ser visualizadas com o microscópio.

As telas de microscopia têm custo relativamente elevado (um frasco com 100 telas Ted Pella G200 tem o valor de US\$ 36,00), mas podem ser utilizadas repetidamente, pois os experimentos são não

destrutivos. Pode-se também reutilizar materiais que são comumente descartados em laboratórios de microscopia e, para tanto, pode-se limpar as telas com acetona utilizando banho de ultrassom.

Por fim, para visualizar o trajeto do laser, em que foi usada a máquina de fumaça, podem-se utilizar diversos tipos de aerossóis líquidos ou sólidos, por exemplo, umidificadores, borrifadores de água, desodorantes spray, poeiras, fumaças ou pó de giz. As pequenas partículas de sólido ou líquido dispersas no ar espalham a luz, possibilitando ver o trajeto do feixe do laser que atravessa o aerossol, como registrado nas Figuras 3 e 4. O umidificador atende à proposta para a visualização de segmentos do feixe laser, permitindo visualizar o ângulo de difração. Entretanto, caso haja disponibilidade, a máquina de fumaça é mais eficiente gerando aerossol que preenche completamente o ambiente. Experimentos mais simples podem ser conduzidos utilizando apenas lasers, CDs, DVDs, réguas e câmera fotográfica de telefone celular para registrar os pontos de incidência do feixe no anteparo.

Em ciência avançada, a difratometria é uma técnica corrente em diversas áreas da química, física, geologia, engenharia de materiais, entre outras grandes áreas do conhecimento. Em muitos casos, é possível obter dados com resolução atômica, o que permite a compreensão dos determinantes estruturais da interação entre moléculas e a elucidação de mecanismos de reação complexos. Além dos raios X, técnicas de difratometria utilizando feixes de elétrons e nêutrons são bem desenvolvidas e têm sua particularidade de aplicação, pois fornecem informações diferenciadas. Os experimentos aqui apresentados, baseados na validação cruzada de técnicas e na exploração de simetria e reciprocidade, constituem uma fundação acessível para a compreensão dessas metodologias de ciência avançada.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que é possível visualizar e analisar os fenômenos de difração e interferência utilizando lasers e grades de difração acessíveis. Os experimentos podem ser realizados com materiais de baixo custo, como lasers comerciais, CDs, DVDs, câmeras de telefones celular, régua e borrifadores de água, todos facilmente encontrados no cotidiano. Por meio da difratometria, foi possível medir distâncias microscópicas, invisíveis a olho nu, e comparar os resultados de forma sistemática com os obtidos por microscopia de luz, validando não apenas os princípios físicos envolvidos, mas também a própria técnica de difratometria por meio de uma abordagem de validação cruzada.

Além disso, a exploração de grades com diferentes simetrias (quadrada, retangular e hexagonal) ilustrou o princípio fundamental de que o padrão de difração atua como uma “impressão digital” da estrutura, introduzindo de forma tangível o conceito de espaço recíproco – onde estruturas mais compactas geram padrões de difração mais expandidos. A metodologia apresentada tem aplicações práticas em ciência dos materiais e pode ser adaptada para diferentes contextos educacionais, incentivando a experimentação e o pensamento crítico em estudantes.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Todos os dados estão disponíveis no texto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Stanley I. Klein (*in memoriam*) pelas discussões sobre a natureza da onda.

REFERÊNCIAS

1. Bond, A. D.; Boese, R.; Desiraju, G. R.; *Angew. Chem., Int. Ed.* **2007**, *46*, 618. [Crossref]
2. Nierhaus, K. H.; *Angew. Chem., Int. Ed.* **2009**, *48*, 9225. [Crossref]
3. Azevedo, E. R.; Nunes, L. A. O.; *Quim. Nova* **2008**, *31*, 2199. [Crossref]
4. The Nobel Prize. [Link] acessado em Novembro 2025
5. Renk, K. F.; *Basics of Laser Physics for Students of Science and Engineering*, 2nd ed.; Springer: London, 2017.
6. Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.; *Fundamentos de Física 4 - Ótica e Física Moderna*, 9^a ed.; LTC Editora S. A.: Rio de Janeiro, 2012.
7. Atkins, P. W.; *Physical Chemistry: 21 Diffraction Techniques*, 6th ed.; Oxford University Press: Oxford, 1998.
8. Al-Azzawi, A.; *Physical Optics: Principles and Practices*, 1st ed.; Boca Raton: CRC Press, 2006. [Crossref]
9. Rasband, W.; *ImageJ*, 1.49; National Institutes of Health, USA, 2014.
10. Saguia, A. M.; Lago, B. L.; Bastos, C.; Luiz, F. F.; Mondaini, F.; Casas, G. A.; Melo, W. W. M.; *Ciências da Natureza e Suas Tecnologias: Experimentando o Fenômeno da Difração*; Moderna: São Paulo. [Link] acessado em Novembro 2025
11. Fractal, *ExP F.14 Óptica Física*. [Link] acessado em Novembro 2025
12. Oliveira, F. A. M.; Azevedo, E. R.; Nunes, L. A. O.; *Quim. Nova* **2015**, *38*, 451. [Crossref]
13. Ashcroft, N. W.; Mermin, N. D.; *Solid State Physics*, 1st ed.; Saunders College: Michigan, 1976.