

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

NATÁLIA CAROLINA SCHVAN WENDT

**PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA AULA EXPERIMENTAL DE
DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA DA LUZ**

CURITIBA

2021

NATÁLIA CAROLINA SCHVAN WENDT

**PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA AULA EXPERIMENTAL DE
DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA DA LUZ**

**A proposal of didactic sequence for experimental classes of diffraction and
interference of light**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de
Curso 2, do Curso de Licenciatura em Física da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título
de Licenciado.

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Florczak

CURITIBA

2021



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

NATÁLIA CAROLINA SCHVAN WENDT

**PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA AULA EXPERIMENTAL DE
DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA DA LUZ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de
Curso 2, do Curso de Licenciatura em Física da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título
de Licenciado.

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Florczak

Data de aprovação: 13/dezembro/2021

José Luís Fabris
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcia Muller
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rita Zanlorensi Visneck Costa
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo apoio e incentivo recebido.

Aos meus orientadores, professor José Luís Fabris e professor Marcos Florczak pela atenção e contribuições ao trabalho.

Às professoras Marcia e Rita por aceitaram o convite para participar da banca examinadora e aos demais professores por todos os ensinamentos recebidos durante o curso.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram nessa etapa da minha formação.

RESUMO

As aulas experimentais são um recurso pedagógico importante no processo de ensino-aprendizagem da Física. Além de tornar este processo mais eficiente, elas proporcionam uma visão mais completa da Física por esta ciência ter uma forte base empírica. Porém, devido a diversas razões como falta de recursos ou falta de tempo durante as aulas, um número significativo de professores ainda opta por aulas excessivamente teóricas, apresentando os fenômenos físicos apenas por meio de equações, imagens, desenhos e diagramas. Isso pode ser constatado tanto por meio da análise de livros didáticos quanto por artigos disponíveis sobre o tema, onde fica explícita a falta de materiais didáticos que incentivam a prática. Este trabalho tem como proposta a elaboração de uma sequência didática para aulas de Ótica no ensino médio, com foco no experimento de fenda dupla de Thomas Young. A prática experimental aqui proposta permite que os alunos realizem o experimento com uma abordagem quantitativa, possibilitando o manuseio de equipamentos e instrumentos de medidas. Os materiais necessários são de baixo custo e fácil acesso, sendo possível a realização da prática mesmo em ambientes não adaptados para experimentação.

Palavras-chave: Experimentação; Ótica; Ensino de Física;

ABSTRACT

Experimental classes are an important pedagogical resource in the teaching-learning process of Physics. In addition to making this process more efficient, they provide a more complete scenario of Physics because this science has a strong empirical basis. However, due to various reasons such as lack of resources or lack of time during classes, a significant number of teachers still opt for excessively theoretical classes, presenting physical phenomena only by means of equations, images, drawings and diagrams. This can be supported by the analysis of textbooks as well as articles about the subject, where the lack of teaching materials that encourage the practice is explicit. This work proposes the elaboration of a didactic sequence for Optics classes in high school, focusing on Thomas Young's double slit experiment. The experimental practice proposed here allows students to carry out the experiment with a quantitative approach, enabling the handling of measuring equipment and instruments. The necessary materials are cost-effective and easy to find, making it possible to carry out the practice in places not adapted for experimentation.

Keywords: Experimentation; Optics; Physics Teaching;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do experimento de fenda simples.....	18
Figura 2 – Desenho esquemático do experimento de Young.....	19
Figura 3 – Diferença de percurso no experimento de Young.....	20
Figura 4 – Simulador de interferência em fenda dupla	22
Figura 5 - Fenda simples sem difração da luz	35
Figura 6 – Desenho esquemático da montagem da fenda simples	36
Figura 7 – Diagrama de montagem do experimento	37
Figura 8 – Padrão das franjas de difração da fenda simples	37
Figura 9 – Tutorial ImageJ parte 1	38
Figura 10 – Tutorial ImageJ parte 2	39
Figura 11 – Tutorial ImageJ parte 3	39
Figura 12 – Gráfico das intensidades da fenda simples	40
Figura 13 – Tutorial SciDavis parte 1.....	42
Figura 14 – Tutorial SciDavis parte 2.....	42
Figura 15 – Gráfico das distâncias das franjas de difração da fenda simples ..	43
Figura 16 – Posição do grafite no papel para montagem da fenda dupla	44
Figura 17 – Desenho esquemático da montagem da fenda dupla	44
Figura 18 – Padrão das franjas de interferência da fenda dupla.....	45
Figura 19 – Gráfico de intensidade da fenda dupla.....	46
Figura 20 – Gráfico das distâncias das franjas de interferência da fenda dupla	48

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Livros de Física do PNL D 2018.....	25
Quadro 2 – Análise dos livros de Física do PNL D 2018 parte 1	30
Quadro 3 – Análise dos livros de Física do PNL D 2018 parte 2.....	31
Tabela 1 – Valores do experimento de fenda simples	41
Tabela 2 – Valores do experimento de fenda dupla	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC	Base Nacional Comum Curricular
COVID-19	Doença de Coronavírus
ISSN	<i>International Standard Serial Number</i>
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
PNLD	Programa Nacional do Livro e do Material Didático
TDIC	Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral.....	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Importância da Experimentação para o Ensino.....	12
2.2	Definição de Sequência Didática	15
2.3	Difração e Interferência da Luz	16
2.4	Propostas de Aulas Experimentais na Literatura	21
3	METODOLOGIA	24
3.1	Concepção de Pesquisa	24
3.2	Etapas de Pesquisa.....	25
4	RESULTADOS.....	27
4.1	Análise dos Documentos.....	27
4.1.1	PCN+	27
4.1.2	BNCC	29
4.1.3	Livros Didáticos	30
4.2	Descrição e Custo dos Materiais	32
4.3	Sequência Didática Experimental	34
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	ANEXOS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A proposta da pesquisa é a elaboração de uma sequência didática para aulas de Ótica no ensino médio, com foco na difração da luz com fenda simples e interferência da luz fundamentada no experimento de fenda dupla de Thomas Young. A motivação para a escolha do tema do trabalho foi feita tendo em vista a publicação de um artigo de demonstração experimental de interferência da luz, traduzido em anexo (WENDT et al., 2020).

A produção do artigo foi realizada durante o programa de iniciação científica no LabLaser, laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), onde são realizadas pesquisas na área de Fotônica aplicada à Engenharia. Durante este período, tive contato direto com a pesquisa experimental, a manipulação de equipamentos e instrumentos de medida e resolução de problemas. Isso possibilitou encarar a experimentação na atividade docente como algo essencial.

Segundo Neto e Parente (2018), dentre as diversas metodologias e ferramentas que podem ser utilizadas pelos professores de Física para um aprendizado satisfatório, a prática de experimentações é amplamente discutida e apontada como um mecanismo de ensino-aprendizagem mais eficiente. Para Grasselli e Gardelli (2014):

O uso de experimentos gera um estímulo para a aprendizagem mediante a observação, análise, exploração, planejamento e o levantamento de hipóteses que possibilitam aos estudantes desenvolver suas habilidades, tornando-a mais significativa pelo estabelecimento de vínculos entre conceitos físicos e fenômenos naturais vivenciados (GRASSELLI; GARDELLI, 2014, p. 2).

O estudo da Ótica no ensino médio geralmente é apresentado aos estudantes por meio de desenhos e/ou diagramas, sem experimentação e de maneira tradicional e expositiva. Na literatura, a maioria dos equipamentos experimentais para experimentos de fenda dupla são de difícil acesso aos professores e só permitem a visualização dos fenômenos.

Esta proposta de aula experimental, assim como a sequência didática, auxilia os professores para uma aula com materiais de fácil acesso. Também permite aos alunos, além de visualizar o fenômeno, tomar medidas e analisá-lo quantitativamente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Elaborar uma sequência didática para aula experimental de fenda simples e fenda dupla, voltada ao ensino de Ótica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Contribuir no processo de ensino-aprendizagem do conteúdo de difração e interferência da luz.

Analisar por meio de documentos e materiais didáticos de que forma os experimentos sobre o tema são abordados.

Propor experimentos que possam ser realizados com materiais de baixo custo.

Verificar quantitativamente a validade das equações envolvidas nos fenômenos físicos dos experimentos de fenda simples e fenda dupla.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Importância da Experimentação para o Ensino

A observação e experimentação dos fenômenos da natureza se tornou um fundamento essencial para o desenvolvimento da Física com os trabalhos de Galileu e Newton. De modo geral, os estudos experimentais tiveram grande impacto na sociedade e revolucionaram a ciência, como Joseph Thomson com a descoberta e identificação do elétron através do tubo de raios catódicos, Marie Curie com seus avanços na radioatividade, Thomas Young comprovando o comportamento ondulatório da luz, entre outros. Isso mostra a relevância da investigação científica para a Física ao longo da história (BRYSON, 2005).

No entanto, é preciso considerar que essa Ciência não depende apenas da experimentação, seu desenvolvimento teórico desempenha um papel importante na descoberta e na pesquisa, principalmente no campo da Física Moderna.

No âmbito da educação, a experimentação também tem um papel muito importante, como destaca Pinho Alves (2000). Ela prioriza o contato dos alunos com os fenômenos estudados, possibilitando associações a partir de suas próprias observações, auxiliando no desenvolvimento de seu raciocínio lógico e até mesmo na resolução de problemas práticos.

As críticas ao modelo tradicional de ensino vêm crescendo devido à sua limitada adequação às necessidades dos estudantes e da sociedade. Paulo Freire (2004) por exemplo, discorda das formas de ensino tradicionais, defendendo um ensino dinâmico que desperte o interesse dos alunos. Enfatiza a curiosidade como um aspecto positivo para o aprendizado.

Os conteúdos de ciências abordados nas salas de aula, bem como os materiais didáticos são apresentados de modo muito artificial, distante dos debates atuais. Isso leva os alunos a não reconhecerem a Física em situações do cotidiano, local em que poderiam ocorrer relações benéficas para seu aprendizado (RICARDO, 2010).

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) destacam a importância de uma formação de Física no Ensino Médio como cultura científica:

[...] que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. É necessário que se inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social ou profissional (BRASIL, 1998, p. 59).

Um ensino que demonstra aspectos culturais da ciência, com uma abordagem menos fragmentada, diante do tradicional enfoque na matematização, gera um maior engajamento do aluno em todo o processo de acordo com Auler (2003). O autor defende a expansão das possibilidades de ensino, diversificando as abordagens e propiciando uma apresentação temática, contextualizada e motivadora aos estudantes.

Segundo Andrade *et al.* (2009), a concepção de ciência como cultura aponta elementos que vão além dos apresentados tradicionalmente no ambiente escolar, que proporcionam o conhecimento e compreensão mais ampla da natureza e de nosso papel na construção das Ciências. Isso oferece uma aproximação do aluno com a ciência e a tecnologia em todas as dimensões da sociedade como economia, política, contextos histórico-sociais e elementos ambientais. Portanto, segundo Rosa (2003) as aulas experimentais nesta perspectiva vão além de um espaço para a comprovação de teorias, pois configuram um elemento constituinte da cultura científica.

Aulas em laboratório, principalmente de Ciências, exercem um papel muito importante no ensino, possibilitando o contato dos estudantes com os fenômenos naturais estudados. Este tipo de aula permite aos alunos testarem suas dúvidas, hipóteses e curiosidades, fazendo uso de criatividade para resolução de problemas. À vista disso, o laboratório didático se torna um ambiente com potencial de desenvolvimento de uma cultura científica, sendo capaz de proporcionar uma visão mais completa da ciência (HODSON, 1994).

A postura do professor deve se basear na intenção de auxiliar os alunos na exploração, desenvolvimento e modificação de suas “concepções ingênuas” acerca de determinado fenômeno para concepções científicas, sem desprezá-las. Os alunos devem ser estimulados a explorar suas opiniões, incentivando-os a refletirem sobre o potencial que suas ideias têm para explicar fenômenos e apontamentos levantados na atividade experimental (HODSON, 1994, p. 305).

Na Grécia antiga, Aristóteles defendia que a observação e experimentação dos fenômenos da natureza era fundamental para a sua compreensão. Segundo

Giordan (1999), naquela época a observação era o principal mediador entre o sujeito e o fenômeno. Porém, muitas propostas de ensino de ciências ainda não reconhecem as contribuições dos empiristas na concepção do conhecimento.

Difícilmente se encontra um professor que negue o uso da experimentação como alternativa para despertar mais interesse nos alunos, no entanto, isso não significa que ele faça uso de experimentos em suas aulas. Também não significa que a prática experimental possa ser usada em qualquer aula, sem uma preparação ou estudo anterior por parte do professor.

De acordo com Ramos e Rosa (2008) alguns dos fatores que acarretam no mau uso de atividades experimentais são: escassez de materiais didáticos para realização dos experimentos, número excessivo de alunos na sala de aula, pouco tempo para discussão, falta de bibliografia para orientação, falta de incentivo e de orientação por parte dos diretores e coordenadores pedagógicos das escolas, falta de preparo dos professores durante os cursos de formação e estímulo dentro das escolas para a manutenção de uma postura tradicionalista de ensino.

Laburú (2006) propõe uma reflexão que procura identificar aspectos importantes para tornar um experimento mais cativante. O autor questiona se o problema da motivação se encontra nos alunos que não demonstram interesse ou nos professores, que não utilizam recursos para despertar a atenção dos estudantes. Conclui que apenas explorar a novidade e o lúdico que uma prática experimental apresenta não são suficientes, é necessário que sejam aplicadas tarefas variadas e diversificação de métodos aos alunos.

Segundo a pesquisa de Nunes (2015), a maioria dos professores que lecionam ciências não são formados na área específica, e muitas vezes ministram esses conteúdos apenas com o fim de complementação de carga horária. A aplicação de experimentos pelo professor exige uma formação adequada a fim de que não haja prejuízo no que diz respeito a conceitos e condução dos experimentos.

Outro problema recorrente na literatura é a falta de recursos materiais e laboratórios de Ciências nas escolas. Porém o fato de não possuir laboratórios formais de ensino de ciências não impede a aplicação de atividades experimentais, uma vez que se pode recorrer aos experimentos de baixo custo realizados na própria sala de aula (NUNES, 2015).

Sabendo da importância e influência que a experimentação pode trazer para o aprendizado de Física, Ribeiro e Verdraux (2013) analisam essa influência no campo da Ótica. Segundo o estudo, no resultado de testes aplicados foi possível observar uma superioridade de rendimento a favor do grupo experimental.

Galili e Hazan (2000) notam dificuldades na aprendizagem de Ótica em geral, onde os alunos acham o assunto estudado difícil e a ajuda dos professores muitas vezes insuficiente. Levando em conta que esse conteúdo constitui base para o entendimento de outros tópicos do currículo de Física, como a Física Moderna, faz-se necessário o uso de recursos que facilitem o aprendizado.

Heckler *et al.* (2007) evidenciam que o ensino de Ótica atual é abordado com metodologias ultrapassadas, tendo em vista a evolução tecnológica recente dessa área. Isso implica em alunos que não fazem conexão entre a Física aprendida na escola com o mundo ao seu redor. Sob essa perspectiva, o uso de tecnologias e aulas contextualizadas podem resultar em uma aprendizagem significativa, que leva em conta aspectos da sociedade e vinculação com os fenômenos físicos.

2.2 Definição de Sequência Didática

Toda prática de ensino necessita uma organização metodológica para ser implementada de maneira mais efetiva em relação à aprendizagem. As sequências didáticas são uma ferramenta importante para a construção do conhecimento, elas permitem trabalhar um conteúdo específico, seguindo uma lógica sequencial da exploração inicial até a formação de uma ideia organizada.

De acordo com Zabala (1998):

Sequências didáticas são um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelos professores como pelos alunos (...)
(ZABALA, 1998, p.18).

Portanto, o objetivo da sequência didática é o de introduzir atividades que possibilitem uma melhora no aprendizado. Estas podem ser compostas por leituras, aula dialogada, simulações computacionais, experimentos, etc. Zabala (1998) descreve que as atividades que compõem uma sequência didática devem ser apresentadas de forma adequada ao nível de desenvolvimento de cada aluno. Elas

devem, ainda, promover a atividade mental necessária para que se estabeleça relações entre os novos conteúdos e os conhecimentos prévios. Também devem permitir maior autonomia dos alunos, além de motivá-los em relação à aprendizagem de novos conteúdos.

Segundo Oliveira (2013), os principais pontos para a construção de uma sequência didática são:

- Escolha do tema a ser trabalhado;
- Questionamentos para problematização do assunto;
- Planejamento dos conteúdos;
- Objetivos a serem atingidos no processo de ensino-aprendizagem;
- Delimitação da sequência de atividades, levando-se em conta formação de grupos, material didático, cronograma, integração entre cada atividade e avaliação dos resultados (OLIVEIRA, 2013, p. 40).

A proposta deste trabalho, apresentada em forma de sequência didática, permite auxiliar o professor nas aulas de Ótica, facilitando a utilização de experimentos em sala de aula. Seguindo os pressupostos de Zabala, as atividades têm por objetivo melhorar a aprendizagem dos alunos.

2.3 Difração e Interferência da Luz

A teoria corpuscular da luz surgiu no século XVII baseada nas ideias de filósofos gregos de que a luz era formada por “corpúsculos”, ou seja, partículas que se movem em linha reta e com velocidade alta. Esta teoria foi defendida por Isaac Newton (1642 - 1727), apesar de seu trabalho revelar uma tendência de aceitação simultânea do modelo ondulatório. Em razão de sua autoridade científica na época, a teoria ondulatória ficou abalada durante todo o século XVIII.

Newton sempre se baseou em resultados da observação direta e evitou utilizar hipóteses especulativas. A razão principal para rejeitar a teoria ondulatória era o problema da propagação retilínea da luz, de difícil explicação em termos de ondas que se propagam em todas as direções.

Robert Hooke (1635 - 1703), experimentalista na Royal Society em Londres, foi o primeiro a estudar os padrões de interferência coloridos gerados por películas delgadas, sugerindo que a luz fosse considerada associada a um rápido movimento oscilatório do meio. Este é o primeiro indício da natureza ondulatória da luz (HECHT, 2002).

Christian Huygens (1629 - 1695) usando a teoria ondulatória concluiu corretamente que a luz era atenuada ao penetrar em meios mais densos, sendo capaz de explicar as leis da reflexão, da refração e a dupla refração no mineral calcita. Também teve contribuições na descoberta de fenômenos de polarização.

Foi em 1801 que o físico e médico inglês Thomas Young (1773 - 1829) apresentou comunicações à Royal Society, defendendo a teoria ondulatória. O que ele fez foi mostrar que a luz sofre interferência, como as ondas do mar, as ondas sonoras e todos os outros tipos de ondas, por meio de um experimento com fenda dupla. Embora Young tenha afirmado que se baseou no trabalho de Newton, ele foi severamente atacado, sendo suas comunicações na época consideradas destituídas de mérito.

Augustin Jean Fresnel (1788 - 1827), nascido na Normandia, iniciou seus trabalhos sobre a teoria ondulatória da luz na França, 13 anos depois de Young sem ter conhecimento do mesmo. Fresnel unificou os conceitos inerentes à descrição ondulatória de Huygens e o princípio de interferência. Ele conseguiu calcular os padrões de difração, devidos a obstáculos, e chegar a uma explicação satisfatória da propagação retilínea da luz. Um tempo depois, conheceu os trabalhos de Young e lhe escreveu dizendo que havia encontrado um aliado. Por volta de 1825, a teoria corpuscular já tinha poucos defensores (HECHT, 2002).

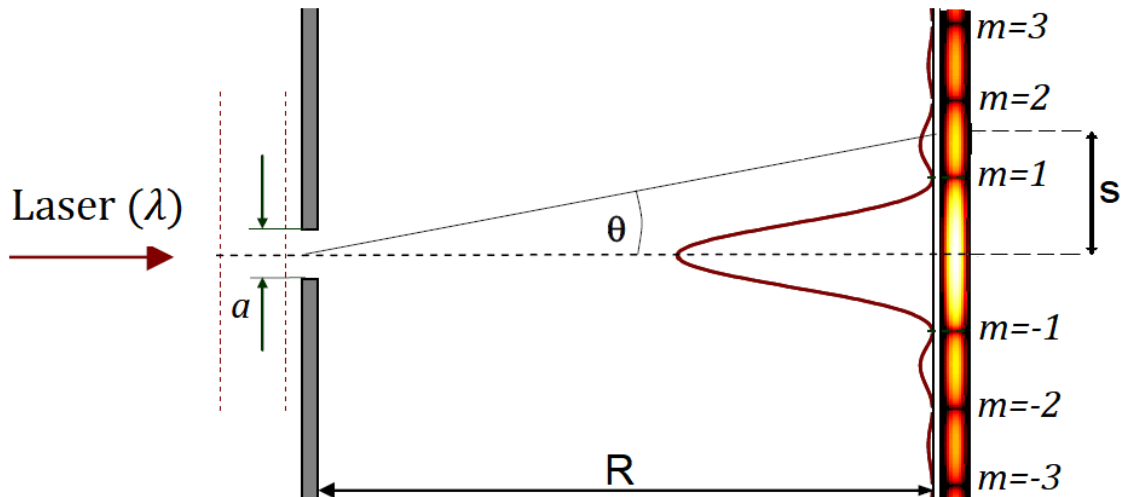
Os efeitos de difração da luz foram primeiramente observados no Colégio dos jesuítas, em Bolonha, por Francesco Maria Grimaldi (1618 - 1663). Ele designou o termo "difração" (do latim *diffringere*, 'quebrar em pedaços'), referindo-se à luz quebrando-se em diferentes direções. A difração pode ser explicada por uma analogia com as ondas na água, como as ondas do mar que são difratadas ao passar por um barco ancorado.

Ao considerar um pequeno orifício iluminado por um feixe paralelo de luz monocromática (de um laser, por exemplo), segundo o princípio da propagação retilínea da Ótica geométrica, o feixe transmitido formaria uma imagem idêntica ao orifício em um anteparo de observação, e fora desta região a escuridão seria completa (NUSSENZVEIG, 1998).

Porém, quando as dimensões do orifício (a) são muito pequenas e comparadas a ordem de grandeza do comprimento de onda da luz (λ) incidente, verifica-se que a luz penetra na região da sombra geométrica, com aparecimento de

franjas claras e escuras na vizinhança do limite da sombra. Estes desvios da propagação retilínea da luz são chamados de difração. Esta situação descreve o experimento de fenda simples, esquematizado na figura 1.

Figura 1 - Desenho esquemático do experimento de fenda simples



Fonte: Autoria própria (2021)

A equação (1) relaciona a posição angular θ dos mínimos de difração com os múltiplos inteiros do comprimento de onda.

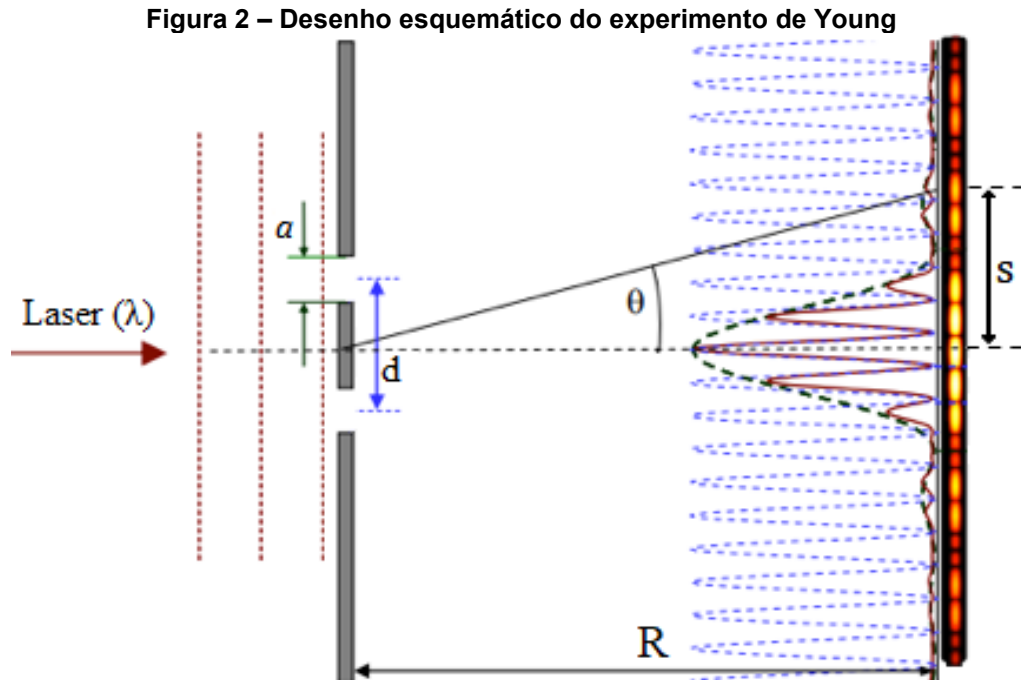
$$a \operatorname{sen}\theta = m\lambda \quad \text{onde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1)$$

Quando a distância da fenda ao anteparo é muito maior que a abertura da fenda ($R \gg a$), é possível fazer a aproximação $\operatorname{sen}\theta \cong \tan\theta$. Portanto a equação (1) se torna:

$$a \frac{s}{R} = m\lambda \quad \text{onde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2)$$

Na fenda dupla, além do efeito de difração que acontece com a fenda simples, existe a interferência entre os feixes de luz de cada uma das fendas. Com isso, a figura obtida no anteparo, conforme apresentado pela linha vermelha na figura 2, será formada pela figura de difração (linha tracejada preta) modulando a intensidade das franjas de interferência (linha pontilhada azul). A figura 2 representa de forma esquemática, o experimento de Young, onde o feixe de laser de comprimento de onda

(λ) passa pelas fendas com largura a e distanciadas por d . A imagem é formada no anteparo a uma distância R das fendas.



Fonte: Wendt *et al.*, 2020

No experimento de Young com luz monocromática, a intensidade da luz resultante (I) em um determinado ponto depende da soma das duas intensidades provenientes de cada uma das fendas (I_1 e I_2) e também do termo de interferência. Este último é dependente da diferença de fase (Δ) entre as duas ondas (com fases φ_1 e φ_2) (NUSSENZVEIG, 1998). A equação (3) descreve a situação:

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

$$\text{onde } \Delta = \varphi_2 - \varphi_1$$

Quando $\Delta = 2n\pi$ a intensidade resultante fica $I = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$ descrevendo uma interferência construtiva. Quando $\Delta = (2n + 1)\pi$ a intensidade resultante fica $I = \sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$ descrevendo uma interferência destrutiva.

Em conformidade com o Princípio de Huygens, os pontos no centro de cada uma das fendas funcionarão como fontes puntiformes, gerando ondas esféricas. Como estas são excitadas pela mesma frente de onda incidente, oscilarão na mesma

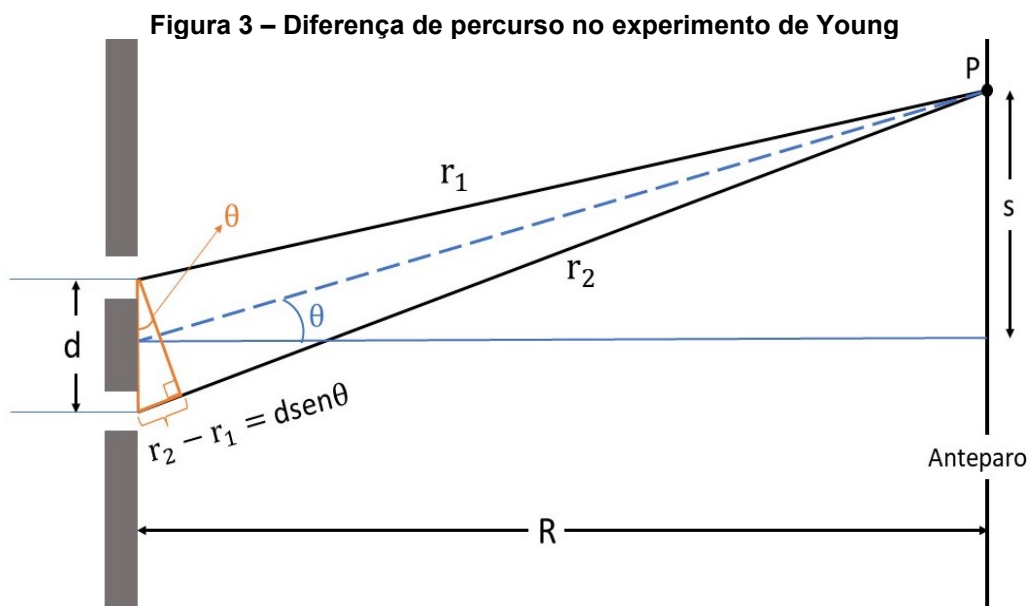
fase, com mesma amplitude e mesma intensidade. Como $I_1 = I_2$, a intensidade resultante pode ser escrita pela equação (4), onde a intensidade é máxima para $\theta = 0$ (ponto central do anteparo na figura 2) e oscila periodicamente entre $4I_1$ e 0.

$$I = 2I_1(1 + \cos\Delta) = 4I_1 \cos^2\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (4)$$

Além disso, a diferença de fase pode ser escrita em termos do número de onda ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$) e da diferença de percurso entre as ondas que passam pelas duas fendas e acabam por se recombinar em um ponto no anteparo (equação (5)).

$$\Delta = k(r_2 - r_1) \quad (5)$$

Onde r_1 e r_2 são as distâncias percorridas por cada uma das ondas na situação descrita. A diferença de percurso pode ser visualizada através da semelhança de triângulos, conforme ilustrado na figura 3.



Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com a figura 3, pode-se escrever a diferença de fase como:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (d \sin \theta) \quad (6)$$

Portanto, os máximos de interferência ocorrem para ângulos θ , nos quais a projeção da distância entre as fendas (d) sobre o eixo de propagação da onda difratada é um múltiplo inteiro do comprimento de onda, conforme a equação (7).

$$d \sin\theta = n\lambda \quad \text{onde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (7)$$

Quando a distância das fendas ao anteparo é muito maior que a distância entre as fendas ($R \gg d$), é possível fazer a aproximação $\sin\theta \cong \tan\theta$. Portanto a equação (7) se torna:

$$d \frac{s}{R} = n\lambda \quad \text{onde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (8)$$

Segundo Richard Feynman (1919 - 1988) em "*The Feynman lectures on physics*", ninguém nunca foi capaz de definir a diferença entre interferência e difração satisfatoriamente. Para ele, é somente uma questão de linguagem e não há diferenças físicas importantes ou específicas entre elas. Entretanto é possível dizer que quando existem poucas fontes interferindo, por exemplo duas, então o resultado é geralmente chamado de interferência, mas se existe um grande número delas, a palavra difração é mais comumente usada.

Estes conceitos são utilizados como base para entendimento, análise e realização da atividade experimental proposta neste trabalho.

2.4 Propostas de Aulas Experimentais na Literatura

Propostas de atividades experimentais no ensino de Ótica são muito comuns na literatura, ficando atrás apenas de Mecânica, conforme a revisão realizada em artigos publicados entre 1992 e 2001 por Araújo e Abib (2003). Além da análise quanto aos temas das propostas experimentais de Física, verifica-se uma categorização quanto aos aspectos metodológicos destes trabalhos. O número de artigos com propostas qualitativas (2/3) é muito superior às quantitativas (1/3).

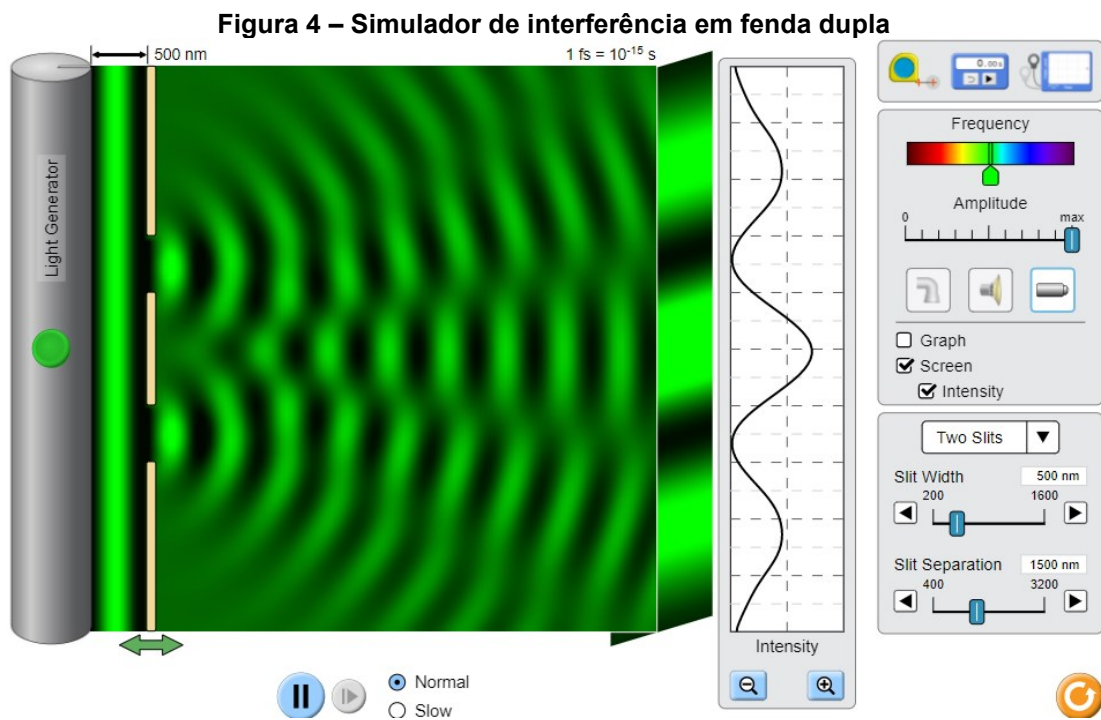
Os autores destacam que experimentos de natureza quantitativa permitem aos alunos manusear equipamentos e instrumentos de medidas, além de fazer o tratamento dos dados obtidos tendo uma noção de propagação de incertezas.

Também possibilita fazer uma comparação dos resultados com valores teóricos, comprovando leis e teorias.

Alguns artigos recentes mostram dificuldades de execução das propostas com tema semelhante ao do presente trabalho, com materiais de difícil acesso e valores elevados (HÉNAULT e SPANG, 2010), (DARROZ *et al.*, 2016), (ANDRADE e SILVA, 2017). Além disso, estas propostas permitem apenas a visualização dos fenômenos estudados, sem que o aluno possa manusear os instrumentos e tomar medidas para analisar os dados.

Esse levantamento é importante para verificar os tipos de trabalhos que vêm sendo realizados sobre propostas experimentais em Ótica, mais especificamente em difração e interferência da luz.

Há ainda, opções de simuladores de Física que demonstram o experimento de fenda dupla. No exemplo da figura 4, disponível no repositório de simuladores Phet Colorado, é possível visualizar o fenômeno de interferência e difração com ondas mecânicas, sonoras e eletromagnéticas. Também é possível modificar alguns parâmetros e obter os dados experimentais das distâncias entre as franjas.



Fonte: https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html

Os simuladores proporcionam a visualização de modelos físicos com certa vantagem em relação a figuras estáticas em livros didáticos ou no quadro negro. São objetos que auxiliam nas aulas, muito interessantes para se utilizar em situações de poucos recursos. Porém, não permitem uma interação direta com o aluno, dado que em situações reais existem diversas condições que podem afetar o experimento. Estas condições fazem com que o aluno enfrente a resolução de problemas através de hipóteses levantadas e testadas por ele próprio, contribuindo assim para o entendimento do fenômeno.

3 METODOLOGIA

3.1 Concepção de Pesquisa

Para a elaboração do material didático foi necessário um estudo qualitativo, exploratório e descritivo de como o conteúdo de difração e interferência da luz vem sendo abordado. Também pretendeu-se verificar as sugestões de experimentos. Para isso foram analisados documentos que norteiam a educação. De acordo com Bardin (1977), o método para análise de documentos consiste em um conjunto de instrumentos metodológicos que pode ser aplicado a diversos conteúdos, em todas as formas de comunicação. Esse método pode ser definido como:

[...] um conjunto de técnicas de análise visando obter, por procedimentos sistemáticos, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção de certas mensagens (BARDIN, 1977, p. 42).

Segundo a análise de Godoy (1995), este método é dividido em três fases listadas a seguir:

- Pré-análise: deve ser estabelecida uma organização precisa, com procedimentos muito bem definidos, mas podendo ser flexíveis. Esta fase envolve a leitura “flutuante”, que nada mais é do que um primeiro contato com os documentos a serem analisados, incluindo a escolha e preparação destes materiais, a definição dos objetivos, a elaboração de hipóteses e a concepção de parâmetros que orientarão a interpretação.
- Exploração do material: é a fase de cumprimento das decisões tomadas anteriormente.
- Tratamento dos resultados obtidos: os resultados são reunidos e analisados, de forma a buscar padrões e relações contidas, utilizando os parâmetros já definidos na primeira fase.

Frente a isso, é necessário o desenvolvimento de um trabalho que mostre com clareza os procedimentos metodológicos (tipo de pesquisa, universo delimitado, instrumento de coleta de dados).

3.2 Etapas de Pesquisa

Com o intuito de auxiliar na organização e coleta de dados, foram definidas etapas que sistematizam a pesquisa. Primeiramente, foram analisados documentos relevantes para o desenvolvimento do material didático proposto.

Os documentos selecionados detalham o funcionamento da educação brasileira e regulamentam a elaboração curricular das escolas. São eles os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Nestes documentos, procurou-se investigar como o conteúdo de Ótica deve ser abordado no ensino médio, além de verificar se estão presentes incentivos a atividades experimentais.

Além disso, é fundamental identificar os conteúdos e como estes geralmente são abordados em sala de aula. Portanto, torna-se necessário conhecer os livros didáticos utilizados atualmente. Para isso foram selecionados seis dos doze livros aprovados no Programa Nacional do Livro e Material Didático (PNLD) de 2018, listados no quadro 1. Nessa escolha selecionaram-se os livros que estavam gratuitamente disponíveis na internet.

Quadro 1 – Livros de Física do PNLD 2018

Livro	Título	Autor	Editora
1	Compreendendo a Física	Alberto Gaspar	Ática
2	Física	Osvaldo Guimarães; José Roberto Piqueira; Wilson Carron	Ática
3	Ser Protagonista – Física	Adriana B. M. Válio; Ana Fukui; Bassam Ferdinian; Madison Molina;	SM
4	Física para o Ensino Médio	Kazuhito Yamamoto; Luiz Felipe Fuke	Saraiva
5	Física: Contexto & Aplicações	Antônio Máximo Ribeiro da Luz; Beatriz Alvarenga Álvares	Scipione
6	Física Aula por Aula	Benigno Barreto Filho; Cláudio Xavier da Silva	FTD

Fonte: Autoria própria (2021)

É importante ressaltar que a análise avalia apenas a seção de Ótica de cada material. Foram elaborados alguns parâmetros para guiar o processo investigativo de análise dos livros. Tais parâmetros estão apresentados a seguir:

- Como é abordado o conteúdo de difração e interferência da luz nestes materiais (tempo dedicado, aprofundamento e nível matemático).
- Quanto à sugestão de experimentos.
- Se os experimentos são práticas qualitativas ou quantitativas.
- Quanto aos materiais utilizados nos experimentos (custo e dificuldade de utilização em escolas com infraestrutura inadequada).

Após esta análise foi possível se dedicar ao objetivo central da pesquisa: elaborar uma sequência didática de aula experimental de difração e interferência da luz. Vale salientar que, devido a restrições na realização de atividades presenciais nas escolas em razão da pandemia do COVID-19, a proposta elaborada não foi aplicada em sala de aula. Os resultados da aplicação dessas etapas são apresentados ao longo do próximo capítulo deste trabalho.

4 RESULTADOS

4.1 Análise dos Documentos

4.1.1 PCN+

Os PCN+ são uma proposta do Ministério da Educação para as escolas brasileiras a fim de tornarem-se referência para elaboração dos currículos escolares e limitar os conteúdos a serem ministrados nas disciplinas.

Eles abordam diversas competências e habilidades que devem fazer parte da educação. Em Física especificamente, estas competências devem estimular o aluno a perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos.

Quanto às atividades de experimentação, o tópico investigação e compreensão cita o uso de instrumentos de medição. Também é citada a necessidade do uso de cálculo, de representação de dados, de fazer estimativas, de elaborar hipóteses e de interpretar resultados. Decorrente disso, são apresentadas as seguintes competências:

- Fazer uso de formas e instrumentos de medida apropriados para estabelecer comparações quantitativas. Por exemplo, escolher a forma adequada para medir a quantidade de água presente em um copo ou a quantidade de alimento em uma embalagem. Ou escolher a melhor forma para medir o comprimento de uma sala ou a distância percorrida em um trajeto longo.
- Fazer estimativas de ordens de grandeza para poder fazer previsões. Por exemplo, estimar o volume de água de um tanque ou uma piscina e o tempo necessário para esvaziá-los.
- Compreender a necessidade de fazer uso de escalas apropriadas para ser capaz de construir gráficos ou representações como, por exemplo, a planta de uma casa ou o mapa de uma cidade. (BRASIL, 2002, p. 66).

Na seção das estratégias para ação, é encontrado o tópico denominado de Sentido da Experimentação, que enfatiza a necessidade de atividades experimentais na sala de aula.

O documento afirma que é indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável.

O papel da experimentação deve ser retomado, atribuindo-lhe uma maior abrangência para além das situações convencionais de experimentação em laboratório. As abordagens mais tradicionais precisariam portanto ser revistas, evitando-se “experiências” que se reduzem à execução de uma lista de procedimentos previamente fixados, cujo sentido nem sempre fica claro para o aluno. É tão possível trabalhar com materiais de baixo custo, tais como pedaços de fio, pequenas lâmpadas e pilhas, quanto com conjuntos mais sofisticados, que incluem multímetros e osciloscópios. A questão a ser preservada, menos do que os materiais disponíveis, é, novamente, que competências estão sendo promovidas com as atividades desenvolvidas.

Experimentar pode significar observar situações e fenômenos a seu alcance, em casa, na rua ou na escola, desmontar objetos tecnológicos, construir aparelhos e outros objetos simples. Pode também envolver desafios, estimando, quantificando ou buscando soluções para problemas reais.

Na seção dos temas estruturadores do ensino da Física, o documento mostra os conteúdos selecionados a serem abordados no ensino médio. Essa seleção apresenta uma das possíveis formas de organização das atividades escolares. Não se trata da única organização dos conteúdos da Física, mas serve, sobretudo, para exemplificar as possibilidades e os caminhos para o desenvolvimento das atividades.

Nessa perspectiva, são privilegiados seis temas estruturadores:

1. Movimentos: variações e conservações
2. Calor, ambiente e usos de energia
3. Som, imagem e informação
4. Equipamentos elétricos e telecomunicações
5. Matéria e radiação
6. Universo, Terra e vida

Foi feita uma busca no documento a fim de analisar como são apresentados os conteúdos de Ótica. Foram encontradas menções referentes ao tema nos tópicos 3 e 5, listados a seguir:

3. Som, imagem e informação - formação e detecção de imagens:

- Identificar objetos, sistemas e fenômenos que produzem imagens para reconhecer o papel da luz e as características dos fenômenos físicos envolvidos.
- Associar as características de obtenção de imagens a propriedades físicas da luz para explicar, reproduzir, variar ou controlar a qualidade das imagens produzidas.
- Conhecer os diferentes instrumentos ou sistemas que servem para ver, melhorar e ampliar a visão: olhos, óculos, telescópios, microscópios etc., visando utilizá-los adequadamente.

5. Matéria e radiação - radiações e suas interações

- Identificar diferentes tipos de radiações presentes na vida cotidiana, reconhecendo sua sistematização no espectro eletromagnético (das ondas de rádio aos raios gama) e sua utilização através das tecnologias a elas associadas (radar, rádio, forno de micro-ondas, tomografia, etc.).
- Compreender os processos de interação das radiações com meios materiais para explicar os fenômenos envolvidos em, por exemplo, fotocélulas, emissão e transmissão de luz, telas de monitores, radiografias.
- Avaliar efeitos biológicos e ambientais do uso de radiações não-ionizantes em situações do cotidiano. (BRASIL, 2002, p. 75-78).

4.1.2 BNCC

A BNCC é um documento normativo que define o conjunto de aprendizagens essenciais que todos os alunos devem desenvolver ao longo das etapas e modalidades da Educação Básica. Nele são estabelecidos os conhecimentos, competências e habilidades que devem estar presentes na sala de aula.

A aprendizagem, segundo o documento, deve valorizar a aplicação dos conhecimentos na vida individual, favorecendo o protagonismo dos estudantes no enfrentamento de questões sobre consumo, energia, segurança, ambiente, saúde, entre outras.

As normativas da Física estão contidas na seção de Ciências da Natureza. Nesta é descrito que os processos e práticas de investigação merecem destaque especial nessa área. A dimensão investigativa das Ciências da Natureza deve ser enfatizada no Ensino Médio, aproximando os estudantes dos procedimentos e instrumentos de investigação, tais como: identificar problemas, formular questões, identificar informações ou variáveis relevantes, propor e testar hipóteses, elaborar argumentos e explicações, escolher e utilizar instrumentos de medida, planejar e realizar atividades experimentais e pesquisas de campo, relatar, avaliar e comunicar conclusões e desenvolver ações de intervenção, a partir da análise de dados e informações sobre as temáticas da área.

Quanto às competências e habilidades, foram selecionadas as que mencionam conteúdos de Ótica e atividades experimentais, são elas:

- Habilidade (EM13CNT205): Interpretar resultados e realizar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas noções de probabilidade e incerteza, reconhecendo os limites explicativos das ciências.
- Competência específica 3: Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).
- Habilidade (EM13CNT301): Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica. (BRASIL, 2017, p. 557-559).

4.1.3 Livros Didáticos

Quando se utilizam livros didáticos em sala de aula, é fundamental familiarizar-se com o material para compreender qual a melhor forma de abordar certos conceitos. Desse modo, torna-se necessário conhecer os livros para entender sua estrutura, permitindo ao professor utilizá-los da melhor forma possível.

O Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) é um programa do Governo Federal do Brasil que tem por objetivo principal avaliar e distribuir livros didáticos, pedagógicos e literários, de forma universal e gratuita, às escolas públicas das redes de ensino básico e também às instituições de educação infantil sem fins lucrativos.

Decidiu-se verificar a presença de sugestões de experimentos sobre difração e interferência da luz em cada livro escolhido para a análise, os resultados dessa investigação estão apresentados no quadro 2.

Quadro 2 – Análise dos livros de Física do PNLD 2018 parte 1

Livro	Sugestão de experimentos	Natureza da prática	Custo e facilidade de acesso aos materiais
1	Sim, para fenda simples e fenda dupla	Observação	Materiais de fácil acesso: tubo de filme fotográfico, papel e lâmpada
2	Não	-	-
3	Não	-	-
4	Não	-	-
5	Não	-	-
6	Não	-	-

Fonte: Autoria própria (2021)

Além disso, foi verificado o aprofundamento matemático e características gerais de como é abordado o conteúdo analisado nos livros didáticos selecionados. O resultado está apresentado no quadro 3.

Quadro 3 – Análise dos livros de Física do PNL D 2018 parte 2

Livro	Nº de páginas destinadas ao conteúdo	Presença das equações	Características gerais
1	13 páginas	Sim	O livro traz muitas relações do conteúdo estudado com exemplos do cotidiano e interdisciplinaridade com a biologia. A parte matemática é bem desenvolvida e possui muitas imagens e desenhos esquemáticos.
2	Não apresenta o conteúdo	Não	Neste livro os conteúdos de difração e interferência são tratados somente para as ondas em geral, sem mencionar o experimento de Young, fenda dupla ou difração em fenda simples. No geral, os conteúdos são bastante focados em exemplos do cotidiano e explicação das tecnologias.
3	Não apresenta o conteúdo	Não	Como no livro anterior, este também apresenta a difração e interferência para ondas em geral, não sendo mencionado especificamente para a luz. Sugere um experimento com ondas na água.
4	5 páginas	Sim	Destina um capítulo especial para ondas eletromagnéticas, onde aborda a difração e interferência da luz com desenhos esquemáticos dos fenômenos e todas as equações envolvidas. Não propõe atividade experimental com a luz, apenas com ondas na água utilizando um retroprojetor e gerador de ondas.
5	9 páginas	Não	O conteúdo é abordado com foco no contexto histórico do desenvolvimento do experimento de Young. Além disso a interferência é demonstrada para as ondas em geral, como as mecânicas e sonoras. Não é abordada a parte matemática dos conteúdos.
6	4 páginas	Sim	Discute sobre os estudos da natureza da luz: da teoria corpuscular, ondulatória e dualidade onda-partícula. Apresenta a interferência para ondas luminosas junto às equações e aborda um pouco da história do experimento de Young. Não apresenta difração da luz, apenas menciona para ondas mecânicas e sonoras.

Fonte: Autoria própria (2021)

Diante do exposto, fica claro que há uma carência de materiais que auxiliem os professores nas aulas práticas de fenda dupla. A análise demonstra que é essencial a realização de atividades experimentais em sala de aula, pois os documentos que regulam a educação enfatizam o uso e manipulação de instrumentos de medidas por parte dos alunos, mostrando também a necessidade de experimentos de natureza quantitativa.

4.2 Descrição e Custo dos Materiais

Nesta seção, são descritos os custos dos materiais utilizados para realizar os experimentos de fenda simples e fenda dupla, a fim de observar e medir os fenômenos de difração e interferência.

Os experimentos foram projetados pelo Prof. Dr. José Luís Fabris, orientador da autora, e descritos em um artigo com tradução em anexo. Foi publicado na revista *Physics Education* (Editora: IOP Publishing e ISSN web: 1361-6552), uma revista científica que cobre o ensino de física na escola secundária e nos níveis introdutórios de graduação. Seu escopo inclui ideias e orientações para o ensino em sala de aula, demonstrações e experimentos de laboratório, notícias internacionais sobre desenvolvimentos educacionais, resenhas de livros, equipamentos e produtos multimídia, etc.

O artigo foi produzido durante a iniciação científica em conjunto com um colega (Rodrigo Sanas Zamboni) e sua respectiva orientadora (Prof. Dra. Marcia Muller). O objetivo foi elaborar um experimento com materiais acessíveis e de baixo custo.

Materiais de baixo custo, segundo Wisniewski (1990) são um tipo de recurso simples, barato e de fácil aquisição que facilitam o processo de ensino-aprendizagem. Eles procuram tornar mais fácil a realização de trabalhos experimentais, levando em conta as dificuldades encontradas nas escolas em relação ao uso de laboratórios.

Os materiais necessários estão descritos a seguir, e são adaptáveis de acordo com a disponibilidade:

- Paquímetro de plástico ou de metal com resolução de 0,1 mm ou menor, utilizado para formar as fendas simples e dupla que, sob iluminação coerente, irão produzir os padrões de difração e interferência no experimento;
- Grafite para lapiseira de 0,3 mm ou 0,5 mm de diâmetro que será utilizado para compor a fenda dupla;
- Pedaco de papel sulfite (diferentes gramaturas entre 50 g/cm² e 300 g/cm² podem ser exploradas) de aproximadamente 2 cm x 7 cm usado como elemento auxiliar na delimitação das fendas simples e dupla;

- Anteparo opaco no qual serão projetados os padrões de difração e interferência;
- Régua ou fita métrica para medir a separação entre as franjas das imagens projetadas e a distância do paquímetro ao anteparo opaco;
- Apontador laser (diferentes comprimentos de onda podem ser explorados, como vermelho, verde ou azul).

A maioria dos materiais geralmente está disponível nas escolas. Para realização do experimento não é necessário se locomover ao laboratório, podendo facilmente ser feito na sala de aula. O que pode gerar maior dificuldade de disponibilidade são o paquímetro e o laser. Há diversas opções de paquímetro disponíveis no mercado, os preços variam de R\$5,00 a R\$50,00.

Os lasers de baixa potência que atuam no visível são uma ótima opção para se utilizar no experimento, visto que são fontes de luz coerente, colimada, polarizada e com alto grau de monocromaticidade. Sendo assim, os apontadores lasers são uma excelente escolha pois são portáteis, de baixo custo e fácil aquisição. O preço de um apontador laser de baixa potência varia de R\$6,00 a R\$40,00.

Devem ser tomadas várias precauções ao se utilizar estes dispositivos, pois eles podem causar danos ao olho humano. Para controlar o risco de lesões, foram criadas algumas normas que regulam os procedimentos de segurança requeridos para sua operação. A norma internacional IEC 60825 (IEC, 2007) classifica os perigos dos lasers em função da sua potência e comprimento de onda. De acordo com esta norma, lasers que atuam no espectro visível e com até 5 mW de potência (geralmente utilizados em sala de aula) só são perigosos se forem feitas observações por meio de instrumentos óticos de aumento (lupas, binóculos, lunetas e telescópios). **No entanto, deve ser observada a regra de nunca direcionar o feixe de qualquer tipo de laser diretamente dentro dos olhos.** Em alguns casos, mesmo o espalhamento ou reflexos podem ser danosos. Portanto, recomenda-se alertar os alunos quanto aos riscos a que estão sujeitos e, principalmente, o professor deve supervisionar o uso por parte deles. Além disso, convém sempre verificar a potência e a classe do laser, informações que estão disponíveis nas etiquetas destes dispositivos. Mais

informações sobre a classe e regras de segurança para utilização dos lasers podem ser verificadas através do endereço de internet: https://www.rp-photonics.com/laser_safety.html.

O ideal para ser usado em sala de aula é o laser com emissão no vermelho, pois além de ter custo mais baixo que os demais comprimentos de onda, é geralmente de menor potência e, portanto, mais seguro. Para a demonstração do experimento neste trabalho, foi utilizado um laser verde de 5 mW de potência e comprimento de onda de 532 nm. Optou-se por utilizar a cor verde pois é a que melhor se destaca nas fotos, proporcionando uma melhor visualização das imagens para este trabalho.

4.3 Sequência Didática Experimental

Tema: Difração e interferência da luz

Tempo estimado: 4 aulas

Objetivos:

- Compreender o fenômeno de difração e interferência da luz
- Diferenciar o padrão das franjas de fenda simples e de fenda dupla
- Reconhecer os pontos de interferência construtiva e destrutiva
- Ser capaz de manusear instrumentos de medida
- Compreender a teoria relacionada aos fenômenos
- Comprovar quantitativamente as equações envolvidas

Desenvolvimento:

AULA 1 - DIFRAÇÃO

Nesta aula deve ser introduzido o conceito de difração. Para isso é descrita uma atividade a fim de diferenciar difração de som e de luz. Na primeira etapa, o professor deve se mover para fora da sala de aula em uma posição em que possa ser visto e ouvido pelos alunos. Nesta situação, a difração das ondas (som e luz) não desempenha papel importante para que os alunos vejam e ouçam o professor. De lá, ele deve perguntar o que o som e a luz têm em comum. A resposta esperada dos alunos é que ambos são fenômenos ondulatórios.

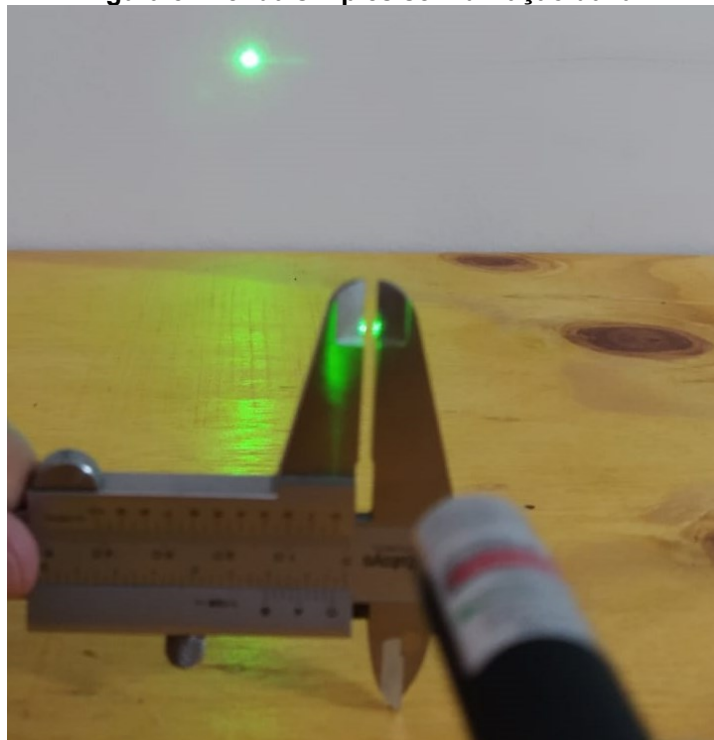
Na segunda etapa, ainda fora da sala, o professor deve se mover de modo a ficar fora do campo de visão dos alunos, porém próximo à porta. Neste caso, a difração

do som possibilita que ele continue sendo ouvido, mas a difração pouco significativa da luz faz com que ele não possa ser visto. Pergunte então, já que o som e a luz são fenômenos de mesma natureza (ondulatória), por que nesta situação eles conseguem ouvir, mas não ver. Algumas hipóteses devem surgir, devem ser utilizados exemplos dos próprios alunos para introduzir o conteúdo.

Deve-se evidenciar que a difração tem relação com a ordem de grandeza do comprimento de onda do fenômeno ondulatório e com o tamanho do elemento difrator. Voltando ao exemplo inicial, comentar que o Lá fundamental, por exemplo, possui frequência de 440 Hz. Tomando a velocidade do som no ar como 343 m/s, seu comprimento de onda é de aproximadamente 78 cm, valor bem próximo ao da largura de uma porta. Já o centro do espectro da luz visível tem comprimento de onda de 550 nm, mais de um milhão e quatrocentas mil vezes menor que o tamanho de uma porta. Portanto a difração é observada mais recorrentemente nas ondas sonoras.

Para mostrar a difração da luz e que esta tem relação com o tamanho da fenda, é descrita uma atividade experimental de demonstração. Utilizando um paquímetro aberto em aproximadamente 2 mm, deve-se incidir um feixe de laser perpendicularmente a ele, a fim de formar uma fenda simples, como mostra a figura 5.

Figura 5 - Fenda simples sem difração da luz



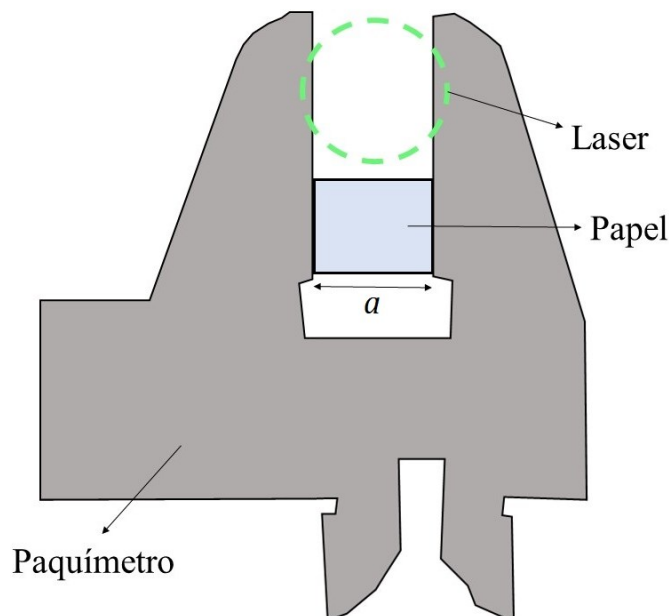
Fonte: Autoria própria (2021)

Evidencia-se que, com esta abertura, o feixe transmitido forma uma imagem muito semelhante ao orifício pelo qual ele está incidindo. Deve-se então diminuir a abertura da fenda até formar o padrão de franjas de difração. Explicar na sequência que para que o fenômeno ocorra, o tamanho da fenda deve estar na mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz incidente. Apresentar e discutir a equação que descreve este fenômeno.

AULA 2 - EXPERIMENTO DE DIFRAÇÃO NA FENDA SIMPLES

O objetivo deste experimento é determinar a espessura do papel (a) que compõe a fenda simples através dos conceitos e equações estudados na aula anterior, bem como comparar este valor com aquele medido com o paquímetro. A fenda simples é feita colocando um pedaço de papel na abertura do paquímetro, sendo assim mensurável sua espessura através do mesmo, como mostra a figura 6.

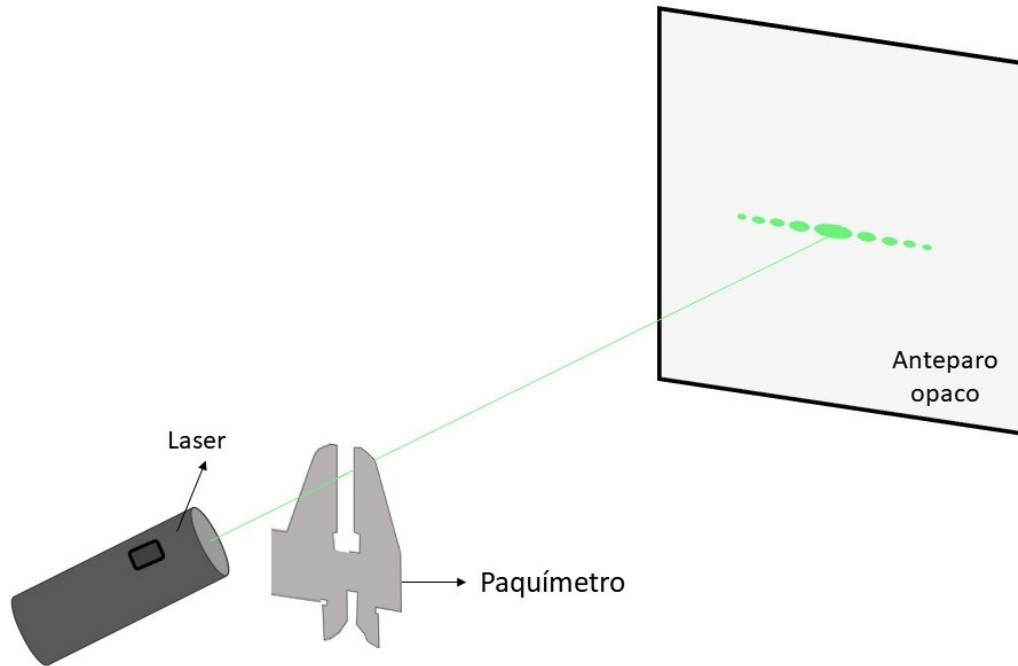
Figura 6 – Desenho esquemático da montagem da fenda simples



Fonte: Autoria própria (2021)

O paquímetro e o anteparo opaco são posicionados perpendicularmente ao feixe do laser, observando-se uma distância em torno de 2 m entre paquímetro e anteparo, na configuração da figura 7.

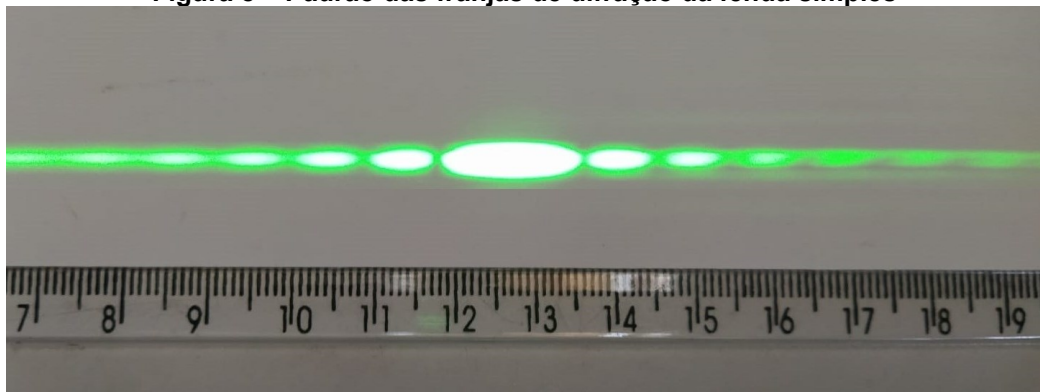
Figura 7 – Diagrama de montagem do experimento



Fonte: Autoria própria (2021)

É ajustada uma posição do anteparo para que a imagem formada fique nítida como mostra o padrão de difração na figura 8.

Figura 8 – Padrão das franjas de difração da fenda simples

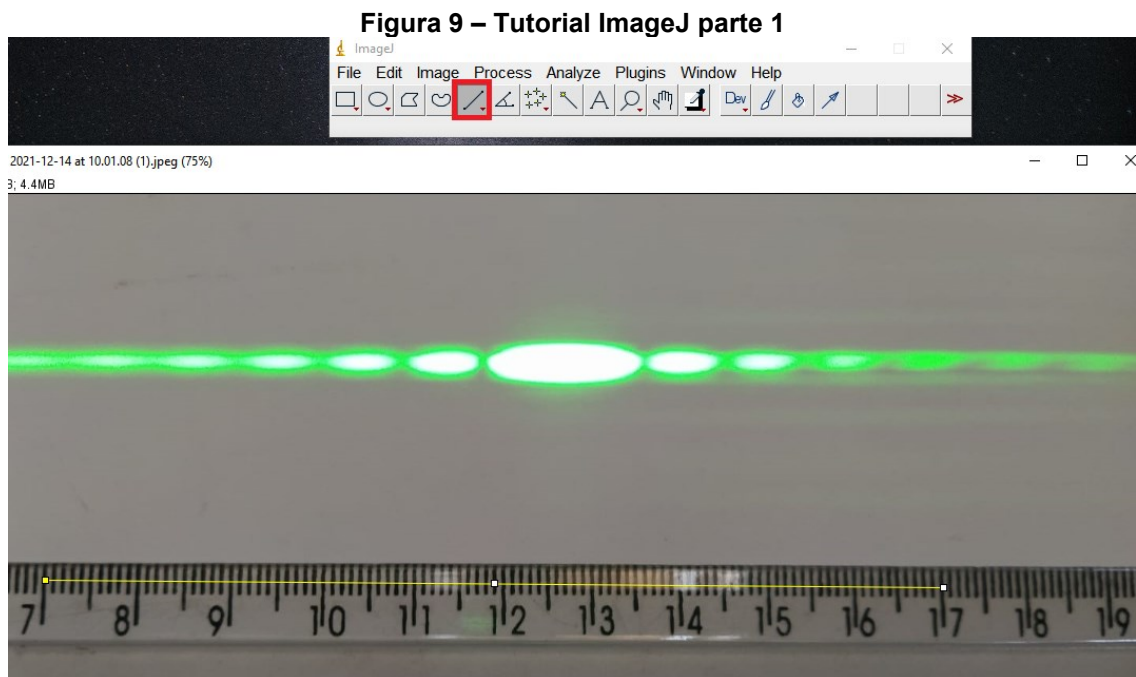


Fonte: Autoria própria (2021)

Devem ser medidos: a distância da fenda ao anteparo (R) e a distância dos pontos de interferência destrutiva ao centro da imagem de difração (s). Essas distâncias de s podem ser medidas através da fita métrica ou utilizando o programa ImageJ. Este é um programa de computador de domínio público destinado a processamento de imagens. Pode ser instalado gratuitamente a partir do endereço da internet: <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>.

Para utilizar o ImageJ, é necessária apenas uma foto da figura de difração com uma medida de referência para definir a escala, como por exemplo uma régua. A foto deve ser tirada com a parte frontal da câmera alinhada (o máximo possível) paralelamente ao anteparo a fim de minimizar problemas de paralaxe. Também é necessário conhecer o comprimento de onda (λ) do laser utilizado. A abertura da fenda (a) é medida para poder comparar com o resultado obtido experimentalmente.

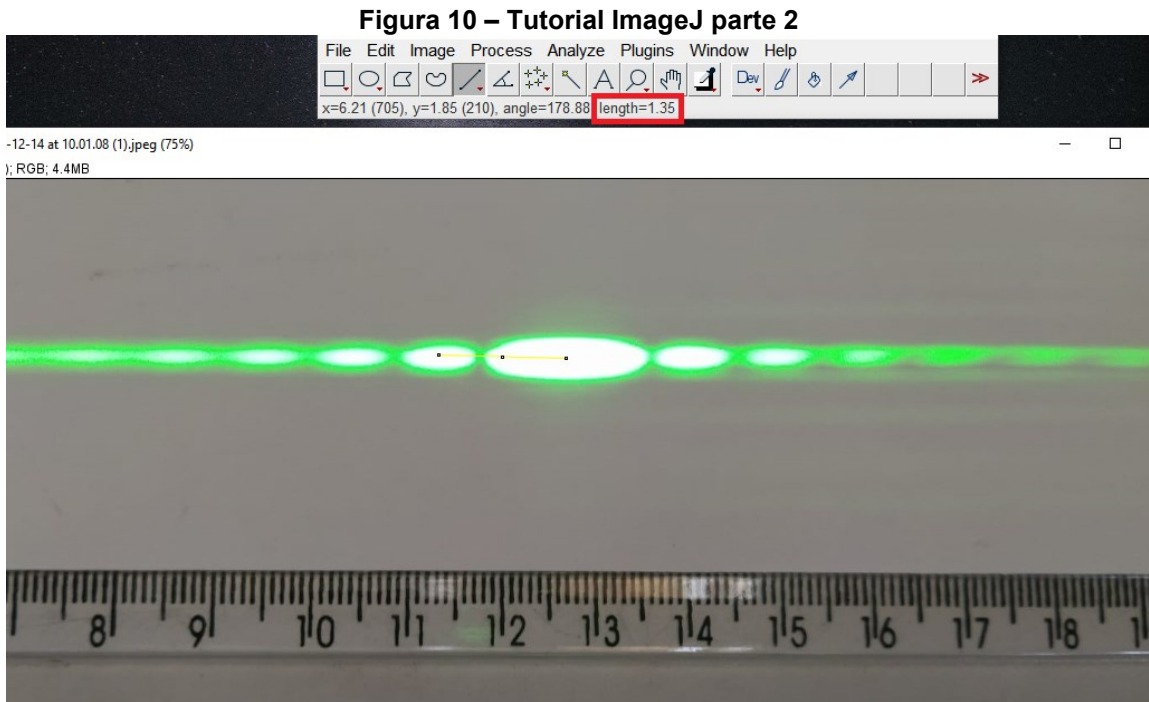
Para fazer a medição através do programa deve-se abrir a imagem desejada clicando em “Files” e em seguida “Open”. Para definir a escala é preciso selecionar o ícone em vermelho mostrado na figura 9 e delimitar uma região de tamanho conhecido.



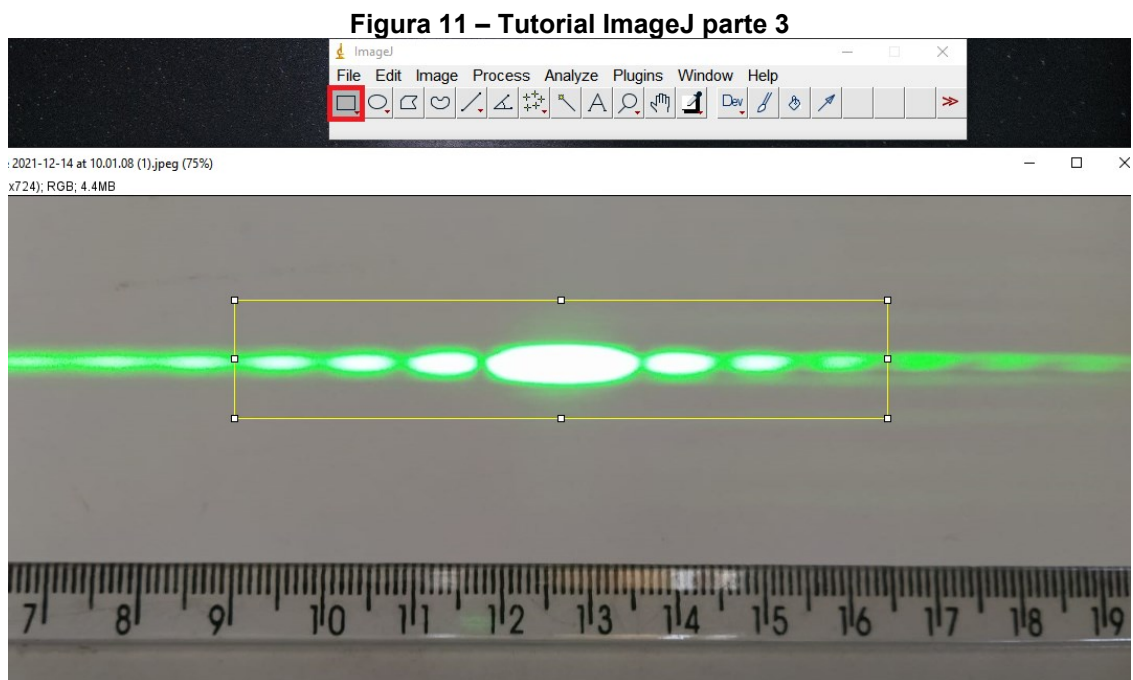
Fonte: Autoria própria (2021)

Em seguida, deve-se clicar em “Analyze” e “Set Scale” abrindo assim uma caixa de configurações. Em “Known distance” é possível especificar o tamanho da região delimitada (10 cm, como no exemplo) e em “Unit of length” a unidade de medida da mesma (cm).

Com a escala definida, deve-se selecionar o mesmo ícone da figura 7 e delimitar a distância que se deseja medir. A figura 10 exemplifica a medição da distância do primeiro mínimo de difração ao centro da imagem do padrão da fenda simples, onde o resultado é mostrado na região em vermelho (1,35 cm, no exemplo).

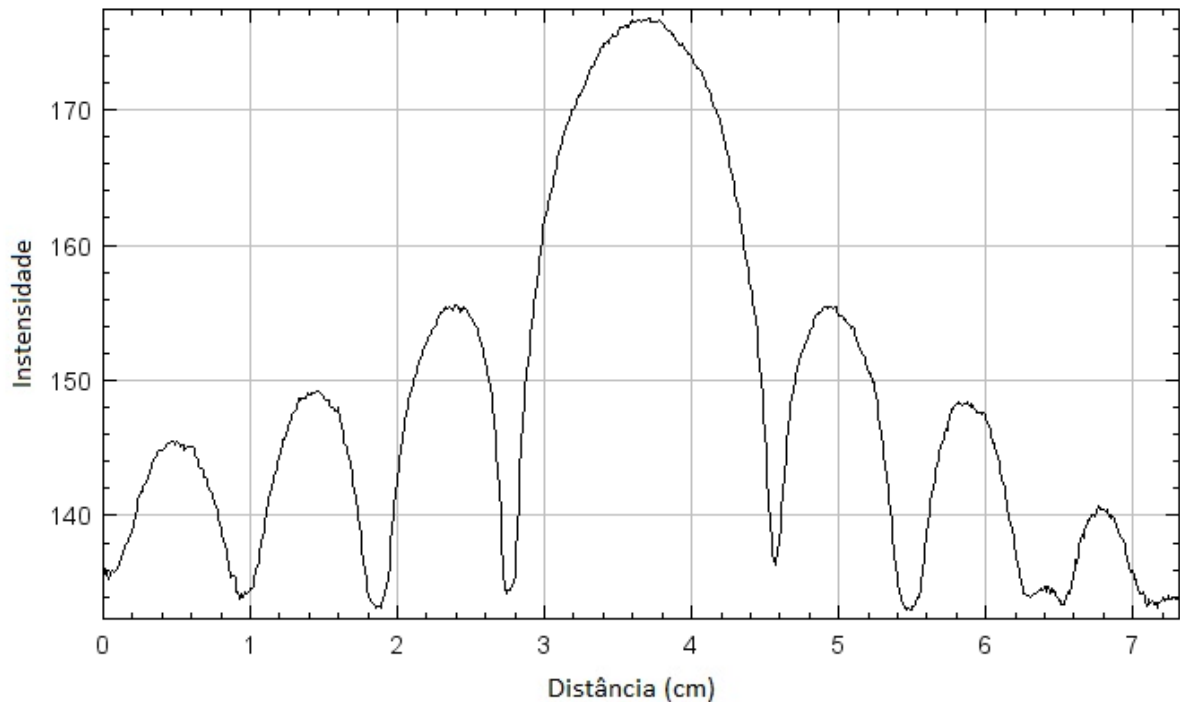


Além disso, é possível medir essas distâncias através de um gráfico da intensidade da luz em função das distâncias das franjas também pelo ImageJ. Para construir o gráfico é necessário clicar no ícone mostrado em vermelho na figura 11 e selecionar o padrão de difração.



Em seguida, deve-se clicar em “Analyze” e “Plot profile”. Assim, o programa gera o gráfico mostrado na figura 12. A partir dele, é possível identificar mais facilmente os mínimos de intensidade e medir suas distâncias horizontais até o centro do máximo central de difração.

Figura 12 – Gráfico das intensidades da fenda simples



Fonte: Autoria própria (2021)

A tabela 1 mostra os valores obtidos no experimento e através deles é possível construir um gráfico, de acordo com a equação que relaciona os mínimos de difração da fenda simples ($a \frac{s}{R\lambda} = m$ onde $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) para determinação do valor de a . A distância medida entre o paquímetro e o anteparo foi $R = 1,72$ m e o comprimento de onda nominal do laser nominal era $\lambda = 532$ nm.

Tabela 1 – Valores do experimento de fenda simples

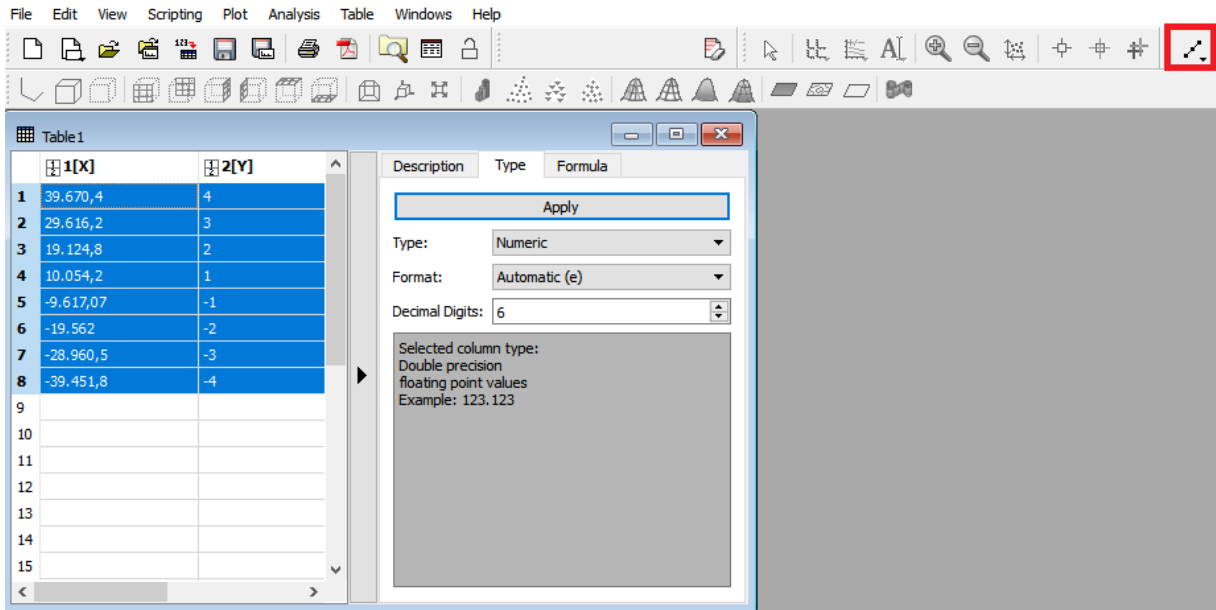
s (m)	m (eixo y)	$\frac{s}{R\lambda}$ (m^{-1}) (eixo x)
0,0363	4	39670,39692
0,0271	3	29616,19164
0,0175	2	19124,847
0,0092	1	10054,20528
0,0088	-1	9617,065921
0,0179	-2	19561,98636
0,0265	-3	28960,4826
0,0361	-4	39451,82724

Fonte: Autoria própria (2021)

Para fazer a análise dos dados através de um gráfico foi utilizado o programa SciDavis, que é possível ser instalado gratuitamente a partir do endereço da internet: <http://scidavis.sourceforge.net>. Para isso, podemos associar o valor m ao eixo y, $\frac{s}{R\lambda}$ ao eixo x e a espessura do papel (a) será o coeficiente angular obtido através do ajuste da reta.

Para gerar o gráfico através do SciDavis, deve-se inserir os valores obtidos experimentalmente em cada uma das colunas de acordo com o valor associado a cada eixo. Em seguida, é preciso selecionar os valores adicionados, clicar no ícone em vermelho mostrado na figura 13 e depois em “*Scatter*”.

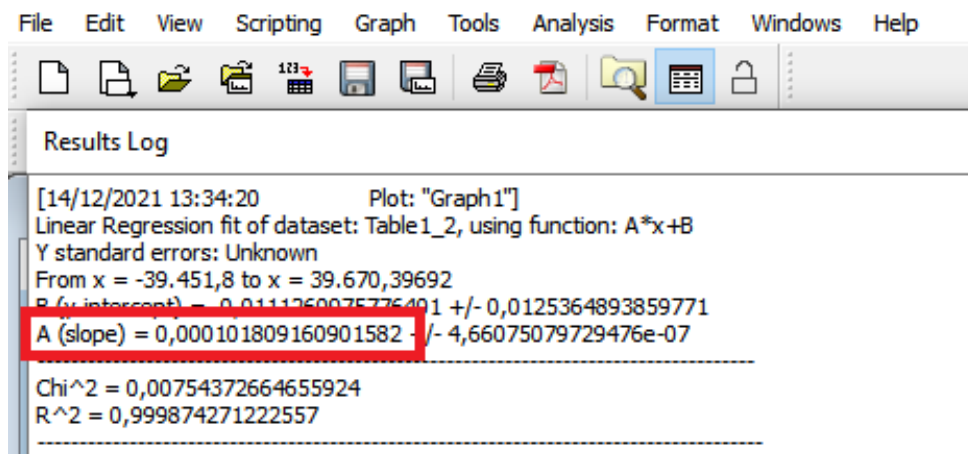
Figura 13 – Tutorial SciDavis parte 1



Fonte: Autoria própria (2021)

Para fazer o ajuste da reta deve-se clicar com o botão direito em cima do gráfico gerado, em seguida em “analyze” e “fit linear”. O programa abrirá uma caixa de texto onde mostrará o valor do ajuste linear, mostrado em vermelho na figura 14.

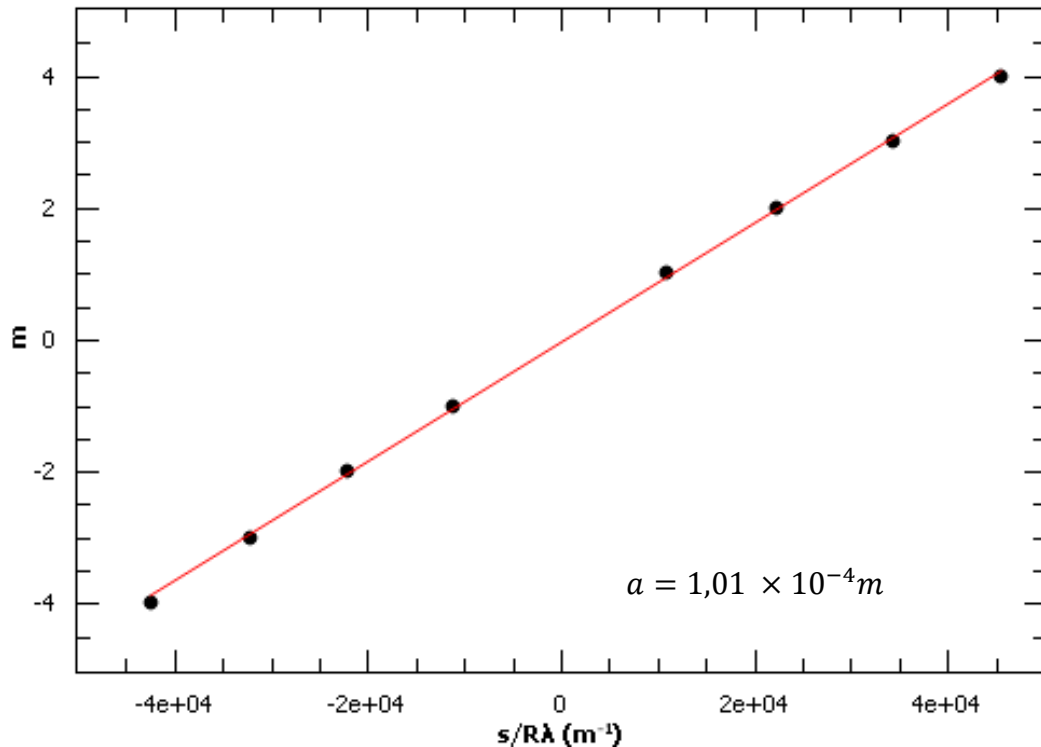
Figura 14 – Tutorial SciDavis parte 2



Fonte: Autoria própria (2021)

O gráfico feito com os valores obtidos através do experimento de fenda simples é apresentado na figura 15.

Figura 15 – Gráfico das distâncias das franjas de difração da fenda simples



Fonte: A autoria própria (2021)

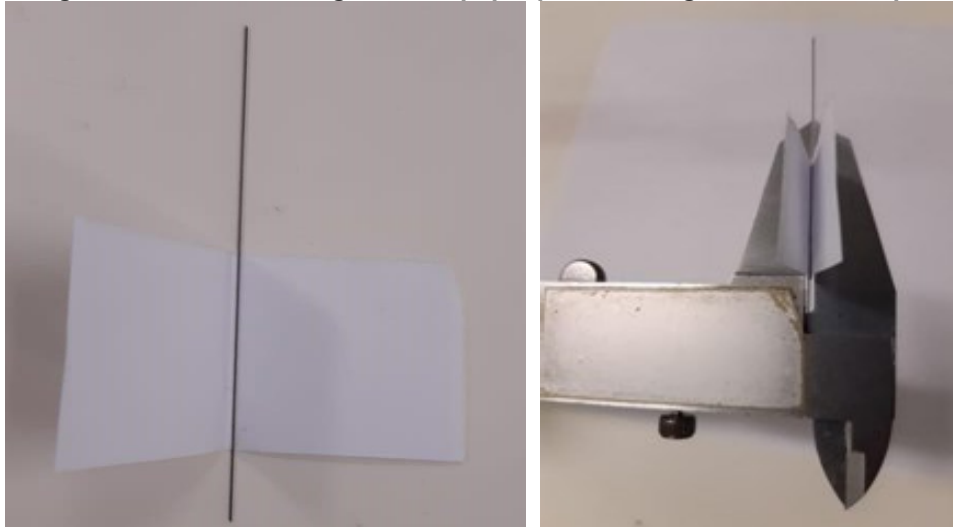
É possível então comparar o valor obtido experimentalmente através da fenda simples, com o valor medido através da abertura do paquímetro. No exemplo demonstrado, o valor experimental foi de 0,101 mm e o valor medido com paquímetro de 0,095 mm, o que corresponde a um erro relativo de 6%.

AULA 3 - EXPERIMENTO DE INTERFERÊNCIA DA FENDA DUPLA

Para esta aula, o objetivo é demonstrar o padrão das franjas de interferência da luz através de uma atividade experimental de fenda dupla. Neste primeiro contato, os alunos deverão identificar as diferenças entre o padrão formado através da fenda dupla e da fenda simples, além de criar hipóteses para tentar explicá-las. Em seguida, a teoria deve ser abordada. Na aula seguinte, os valores experimentais obtidos podem ser utilizados para comprovar as equações que descrevem o fenômeno da interferência da luz.

Para fabricar a fenda dupla, um grafite de lapiseira (diâmetro de 0,3 mm, no exemplo) é colocado dentro de um pedaço de papel dobrado (deve ser da mesma gramatura do papel usado no experimento de fenda simples, pois assim o valor da espessura já foi determinado) como mostra a figura 16.

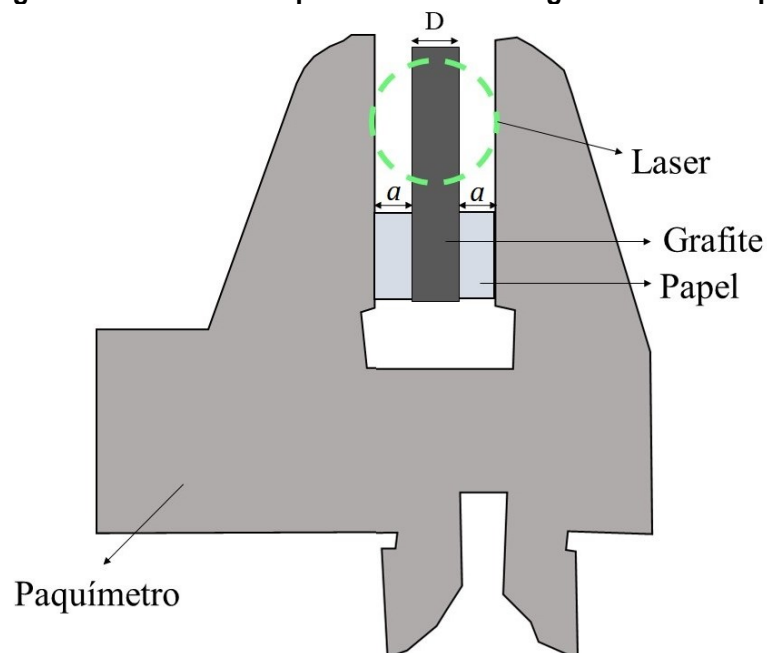
Figura 16 – Posição do grafite no papel para montagem da fenda dupla



Fonte: Aatoria própria (2021)

Esse conjunto é posicionado no meio do paquímetro, com o grafite alinhado paralelamente às garras do mesmo, como mostra a figura 17. Um vídeo da montagem da fenda dupla está disponível a partir do endereço da internet: https://lablaser.tk/realizacoes/conteudo_realizacoes_arquivos/double-slit-caliper.mp4. A espessura do papel (a) se assemelha à largura de cada fenda e a separação entre os centros das fendas (d) é dada por $D + a$, onde D é o diâmetro do grafite.

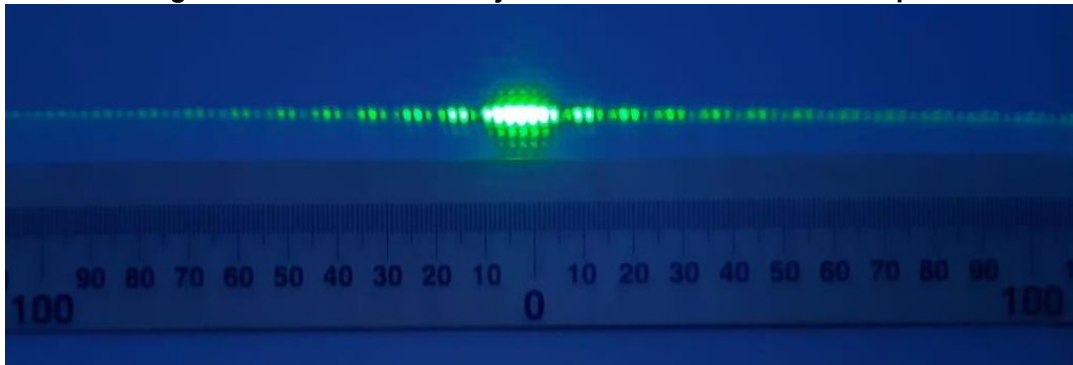
Figura 17 – Desenho esquemático da montagem da fenda dupla



Fonte: Aatoria própria (2021)

O paquímetro e o anteparo opaco são posicionados perpendicularmente ao feixe do laser, observando-se uma distância em torno de 2 m entre paquímetro e anteparo, na configuração da figura 7. É ajustada uma posição do anteparo para que a imagem formada fique nítida, como mostra o padrão de interferência da figura 18.

Figura 18 – Padrão das franjas de interferência da fenda dupla

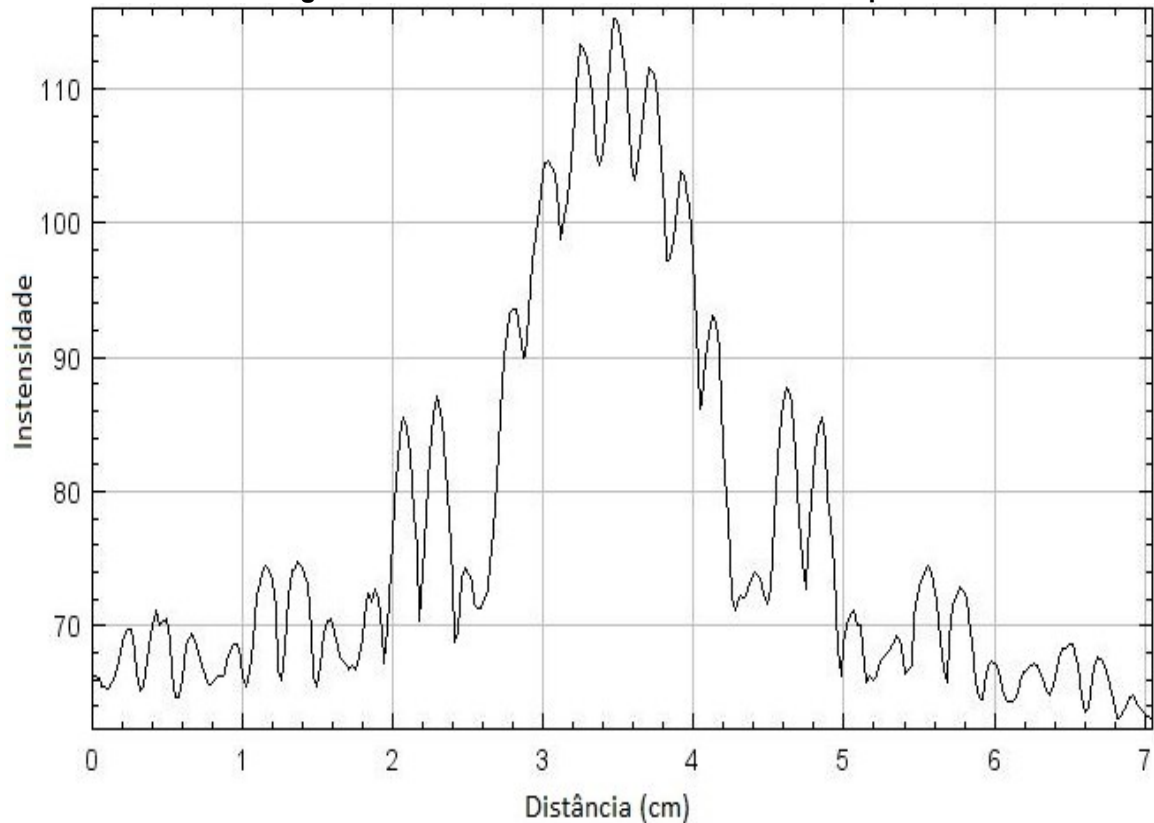


Fonte: Autoria própria (2021)

É necessário informar aos alunos que devem ser medidos os seguintes parâmetros: distância da fenda ao anteparo (R) e a distância (s) de cada ponto de interferência construtiva ao centro do máximo principal de ordem $m = 0$. Novamente é possível medir essas distâncias através do programa ImageJ, seguindo o tutorial mostrado anteriormente no experimento de fenda simples. Além disso é necessário saber a espessura da folha de papel (a). Esta pode ter sido obtida através do experimento de fenda simples descrito anteriormente, ou simplesmente ser medida com o paquímetro. Também é necessário saber o comprimento de onda (λ) do laser utilizado.

O gráfico de intensidade da luz em função das distâncias das franjas do padrão de interferência, construído através do ImageJ, é mostrado na figura 19.

Figura 19 – Gráfico de intensidade da fenda dupla



Fonte: Autoria própria (2021)

Após o experimento, o professor deve abordar o conteúdo teórico de interferência da luz através de hipóteses levantadas pelos alunos. É esperado que eles notem que os dois padrões (fenda simples e dupla) mostram similaridades por conta da difração. Porém, no padrão de interferência da fenda dupla existem pontos de mínimo de intensidade dentro de cada franja de difração. Deve ser evidenciado então que isso ocorre devido ao fenômeno de interferência, que por sua vez é gerada pela diferença de percurso (e diferença de fase) das ondas que passam pelas duas fendas.

AULA 4 - INTERFERÊNCIA

O objetivo desta aula é comparar o valor do diâmetro do grafite (D) que compõe a fenda dupla (determinado através dos dados obtidos no experimento) com seu valor nominal. A equação que descreve o fenômeno de interferência de fenda dupla deve ser discutida com os alunos.

A tabela 2 mostra os valores obtidos no experimento e através deles é possível construir um gráfico de acordo com a equação dos máximos de interferência da fenda dupla $((D + a) \frac{s}{R\lambda} = n$ onde $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$). A distância medida entre o paquímetro e o anteparo foi de $R = 1,72$ m e o comprimento de onda nominal do laser é $\lambda = 532$ nm.

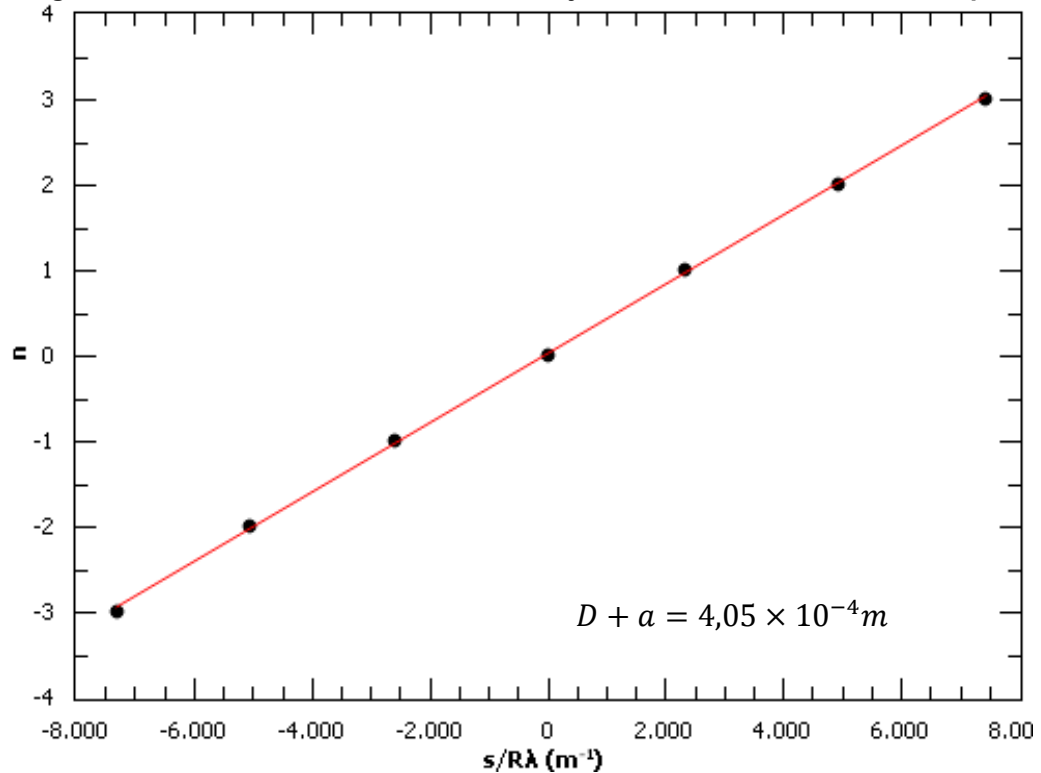
Tabela 2 – Valores do experimento de fenda dupla

s (m)	n (eixo y)	$\frac{s}{R\lambda}$ (m^{-1}) (eixo x)
0,0068000	3	7430,505108
0,0045000	2	4939,100454
0,0021000	1	2338,423666
0	0	0
0,0023000	-1	-2578,822361
0,0046000	-2	-5048,372588
0,0067000	-3	-7299,378548

Fonte: Autoria própria

Novamente é possível construir um gráfico através do programa SciDavis, seguindo o tutorial mostrado anteriormente. No gráfico, n representa o eixo y, $\frac{s}{R\lambda}$ o eixo x e a distância entre as franjas $(D + a)$ é o coeficiente angular obtido através do ajuste da reta, exemplificado na figura 20.

Figura 20 – Gráfico das distâncias das franjas de interferência da fenda dupla



Fonte: Autoria própria (2021)

Conhecendo a espessura do papel (a) é possível obter a espessura do grafite (D) e comparar o valor obtido experimentalmente com seu valor nominal. No exemplo demonstrado, o valor experimental obtido para a espessura do grafite foi de 0,305 mm enquanto que o valor nominal é 0,3 mm, o que corresponde a um erro relativo de 2%.

5 CONCLUSÕES

No decorrer do trabalho buscou-se produzir um material de fácil aplicação, além de verificar as propostas que estavam disponíveis para o professor de Física realizar experimentos nas escolas. Assim, a sequência didática experimental produzida é acessível e com materiais de baixo custo.

Os documentos que regulam a educação brasileira enfatizam a necessidade de atividades experimentais no ensino, pois possibilita o contato dos alunos com os fenômenos físicos, permitindo que estes façam associações a partir de suas próprias observações além de auxiliá-los na resolução de problemas. Verificou-se através da revisão de literatura e pela análise dos livros didáticos que existe uma carência de materiais escritos que auxiliem os professores nas aulas experimentais. Além do mais, a maioria dos experimentos disponíveis na literatura é de natureza demonstrativa, o que impossibilita o aluno de manusear instrumentos de medição.

Os experimentos propostos são de fácil aplicação em qualquer sala de aula, possibilitando a experimentação em escolas com poucos recursos, em contraponto à maioria dos artigos que propõem atividades experimentais de fenda dupla utilizando materiais menos acessíveis. Foi desenvolvida uma sequência didática para facilitar a aplicação nas escolas e auxiliar o professor em aulas de difração e interferência da luz. Vale ressaltar que há diversas possibilidades de aplicação destes experimentos, que podem ser adaptados para outras atividades.

Por fim, como sugestão, seria interessante fazer a aplicação do material em contexto de ensino visando possibilitar a análise do resultado educacional, bem como avaliar a receptividade e aproveitamento dos estudantes quanto à proposta.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. B.; SILVA, T. R. O. L. Difração a laser como proposta de experimento para o Ensino de Física. In: XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2017. **Anais...** UEPB, 2017.

ANDRADE, J. A. N. de; LOPES, N. C.; CARVALHO, W. L. P. Uma análise crítica do Laboratório Didático de Física: a experimentação como uma ferramenta para a cultura científica. *In*: Encontro Nacional de pesquisa em ensino de ciências, 2009. **Anais...** Florianópolis, 2009.

ARAÚJO, M.; ABIB, M. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, jun. 2003.

AULER, D. Alfabetização científico-tecnológica: um novo "paradigma"? **Ensaio pesquisa em educação em ciências**, v. 5, n. 1, 2003.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Edições 70, LDA. Lisboa, Portugal, 1977.

BARRETO FILHO, B.; SILVA, C. X. **Física aula por aula**. FTD, v. 2, 2018.

BENKERT, T.; FRANKE, K.; STANDISH, R. SciDAVis, 2007. Disponível em: <<http://scidavis.sourceforge.net>>; Acesso em: 01 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Curricular Comum (BNCC)**. Brasília: MEC, 2017.

BRASIL. **Parâmetros curriculares nacionais (PCN)**. Brasília: MEC, 1998.

BRASIL. **Parâmetros curriculares nacionais (PCN+)**. Ciências da natureza e suas tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

BRYSON, B. **Breve História de Quase Tudo**. Companhia das Letras; 1ª Edição, 2005.

DARROZ, L. M. D.; ROSA, C. T. W.; ROSA, A. B. Experimentos simples para visualização dos fenômenos de difração e interferência da luz. **Revista Tema**, v. 13, p. 18-26, 2016.

DOUBLE-SLIT INTERFERENCE WITH A CALIPER. Disponível em: <https://lablaser.tk/realizacoes/conteudo_realizacoes_arquivos/double-slit-caliper.mp4>; Acesso em: 01 nov. 2021.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics, California Institute of Technology* (Caltech). Disponível em: <<https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>>; Acesso em: 01 nov. 2021.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 2004.

GALILI, I.; HAZAN, A. *Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis*. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 1, p. 57-88, 2000.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física**. 1ª. Ed. São Paulo: Ática, v. 2, 2018.

GIORDAN, M. O papel da experimentação no ensino de ciências. **Experimentação e Ensino de Ciências**, n. 10, nov. 1999.

GODOY, A. S. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **Revista de Administração de empresas**, v. 35, n. 3, p. 20-29, 1995.

GRASSELLI, E. C.; GARDELLI, D. O ensino da Física pela experimentação no ensino médio: da teoria à prática. Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE artigos. **Cadernos PDE**, 1, 1-22, 2014.

GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. **Física**. São Paulo: Ática, v. 2, 2018.

HECHT, E. **Óptica**. Fundação Calouste Gulbenkian; 2ª edição, 2002.

HECKLER, V.; SARAIVA, M. F. O.; OLIVEIRA FILHO, K. S. Uso de simuladores, imagens e animações como ferramentas auxiliares no ensino/aprendizagem de óptica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 267-273, 2007.

HENAULT, F.; SPANG, A. *A variant of Young's double slit experiment for educational purposes*. **Physics Education**, v. 46, n. 1, ago. 2010.

HODSON, D. *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*. **Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas**, v. 12, n. 3, p. 299- 313, 1994.

IEC 60825 - **Safety of Laser Products Package** (International Electrotechnical Commission), 2007.

INTERFERÊNCIA DE ONDAS. In: *Phet Interactive Simulations*. University of Colorado Boulder. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html>; Acesso em: 01 nov. 2021.

LABURÚ, C. E. Fundamentos para um experimento cativante. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 23, n. 3, p. 383-405, set. 2006.

PASCHOTTA, R. *Laser Safety*. Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/laser_safety.html>; Acesso em: 13 dez. 2021.

LUZ, A. M. R.; ÁLVARES, B. A. **Física Contexto & Aplicações**. Scipione, v. 2, 2018.

NETO, J. G. P.; PARENTE, N. N. Utilização de experimentos nas aulas de Física do ensino fundamental: uma análise de suas contribuições e preferências discentes. *In: V Congresso Nacional de Educação*, 2018. **Anais...** 2018.

NUSSENZVEIG, H. M. **Ótica, Relatividade e Física Quântica: Curso de Física básica**. São Paulo: Blucher, 1998.

NUNES, F. N. **Práticas experimentais de óptica para alunos do ensino fundamental utilizando material de baixo custo**. Dissertação (mestrado em ensino de Física) - Universidade Federal Rural do Semi Árido, Mossoró, 2015.

OLIVEIRA, M. M. **Sequência didática interativa no processo de formação de professores**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2013.

PINHO ALVES, J. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 17, n. 2, p. 174-188, ago. 2000.

RAMOS, L. B. C.; ROSA, P. R. S. O Ensino de Ciências: fatores intrínsecos e extrínsecos que limitam a realização de atividades experimentais pelo professor dos anos iniciais do ensino fundamental. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 299-331, 2008.

RASBAND, W. S. 1997–2018 ImageJ (Bethesda, MD: US *National Institutes of Health*). Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>>; Acesso em: 01 nov. 2021.

RIBEIRO, J. L. P.; VERDEAUX, M. F. S. Atividades experimentais no ensino de Óptica: uma revisão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 4, 2012.

RICARDO, E. C. Problematização e contextualização no ensino de Física. **Ensino de Física**. São Paulo: *Cengage Learning*, p. 29-48, 2010.

ROSA, C. W. Concepções teórico-metodológicas no laboratório didático de Física na Universidade de Passo Fundo. **Revista Ensaio**, v. 5, n. 2, p.13-27, 2003.

VÁLIO, A. B. M.; FUKUI, A.; FERDINAND, B.; MOLINA, M. **Ser protagonista - Física** Editora: SM, v. 2, 2018.

WENDT, N. C. S.; ZAMBONI, R. S.; FABRIS, J. L.; MULLER, M. *Double-slit interference with a caliper*. **Physics Education**, v. 55, n. 4, 2020.

WISNIEWSKI, G. **Utilização de Materiais de Baixo Custo no Ensino de Química Conjugados aos Recursos Locais Disponíveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 1990.

YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. **Física para o ensino médio**. São Paulo: Saraiva, v. 2, 2018.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Artmed, 1998.

ANEXOS

Tradução de Wendt *et al.* (2020):

Interferência em fenda dupla com paquímetro

Resumo

Neste trabalho, é descrita a implementação de uma fenda dupla simples para experimentos de interferência da luz, usando apenas três componentes não óticos prontos para uso. Graças à simplicidade da montagem, a distância entre as fendas e a largura da fenda podem ser facilmente modificadas. O dispositivo pode ser usado em laboratórios de ensino para experimentos quantitativos, bem como em aulas de demonstração.

Palavras-chave: Interferência da luz; Fenda dupla; Fenda simples.

Introdução

No início de 1800, Thomas Young realizou uma experiência memorável que contribuiu para a aceitação da natureza ondulatória da luz. Ele dividiu um feixe de luz solar parcialmente coerente, espacialmente emergindo de uma pequena abertura e combinou os dois feixes coerentes obtidos em uma tela. O padrão resultante mostrando franjas claras e escuras alternadas só poderia ser explicado admitindo-se que os dois feixes se comportavam como ondas de luz, interferindo quando sobrepostos. Devido ao significado histórico e científico do experimento, ele é bem discutido na maioria dos livros didáticos de Física [1].

Atualmente, quando os fenômenos de interferência da luz são explorados em laboratórios de ensino, eles normalmente contam com o uso de fendas duplas comerciais sob incidência de laser, além de uma tela de projeção colocada na distância focal de uma lente convergente posicionada logo após as fendas. No entanto, as franjas são difíceis de distinguir em curtas distâncias, e afastar a tela faz com que a intensidade do padrão diminua. Foram feitas tentativas para resolver os problemas usando, por exemplo, componentes óticos nem sempre disponíveis [2], lâmina de vidro de microscópio enegrecida com algum tipo de tinta e riscada para formar duas fendas próximas, comumente irregulares e imprecisas,

separadas uma da outra [3], filmes de arte gráfica para produzir fendas duplas exigindo várias etapas de projeto à produção, bem como o uso de um normalizador de imagens de alta resolução [4].

Neste trabalho foi construída uma fenda dupla utilizando um paquímetro e grafite de lapiseira enrolado em papel. O padrão de difração-interferência resultante foi utilizado para determinar experimentalmente o diâmetro do grafite e a espessura do papel que compõe a fenda dupla.

Revisão teórica

Um par de fendas distanciadas em d uma da outra, sob incidência de um laser de comprimento de onda λ , projeta em um anteparo a uma distância $R \gg d$ um padrão de difração-interferência. A intensidade das franjas de interferência da fenda dupla (linha tracejada azul na figura 1) é modulada pelo padrão de difração de uma única fenda de largura a (linha tracejada roxa na figura 1). A distância y_{max} no anteparo, relacionada com a m -ésima franja brilhante (linha contínua vermelha na figura 1) é fornecida por (1):

$$d \sin \theta \cong d \tan \theta = d \frac{y_{max}}{R} = m \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (1)$$

onde m é a ordem de interferência e a aproximação para ângulos pequenos é considerada. Além disso, a distância y_{min} da m -ésima franja de interferência destrutiva do

padrão de difração de fenda simples é dado por (2):

$$a \sin \theta \cong a \tan \theta = a \frac{y_{min}}{R} = m \lambda, \quad m = \pm 1, \pm 2 \dots (2)$$

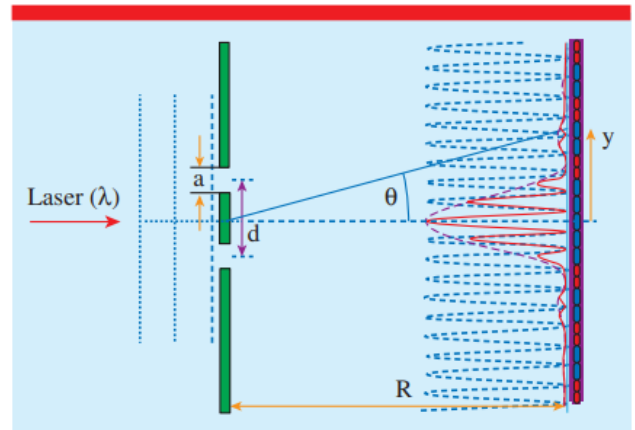


Figura 1. Padrão de interferência-difração de uma fenda dupla sob incidência de laser. A distância y pode ser y_{max} ou y_{min} .

Metodologia

Para fabricar a fenda dupla, um grafite de lapiseira (diâmetro nominal de 0.2 mm) é colocado dentro de um pedaço de papel dobrado (2 cm x 7 cm), como mostra a figura 2(a). Esse conjunto é posicionado no meio do paquímetro, com o grafite alinhado paralelamente às garras do mesmo. O diagrama na figura 2(c) mostra o conjunto final da fenda dupla, onde a espessura do papel (a) se assemelha à largura da fenda simples e a separação da fenda é dada por $D + a$.

A fenda dupla é fixada em uma bancada ótica sob incidência de um laser pointer. A figura 2(d) mostra a área circular

onde o laser incide na fenda dupla. O comprimento de onda do laser usado nos cálculos obedece a duas abordagens: (1) considerando o valor nominal de (532 ± 10) nm fornecido pelo fabricante; (2) medindo-o com uma rede de difração previamente caracterizada com um laser HeNe (632,8 nm), resultando em $(533,1 \pm 1,2)$ nm. As distâncias y_{min} e y_{max} foram obtidas utilizando o software ImageJ [5] a partir de uma foto do padrão de interferência-difração tirado com uma câmera de smartphone. A distância R e sua incerteza [6], medida com uma fita métrica (1 mm de resolução) foi de (1.7202 ± 0.0005) m.

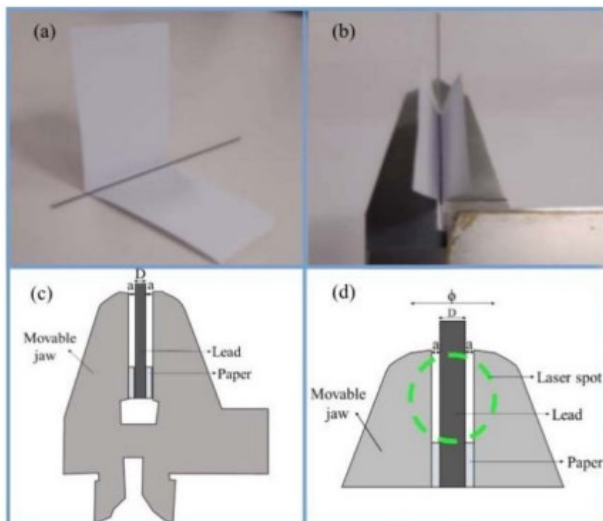


Figura 2. (a) Grafite posicionado no meio do papel dobrado, (b) aparência final da fenda dupla, (c) parâmetros geométricos (fora de posição) da fenda dupla onde D é o diâmetro do grafite e a é a espessura do papel e (d) diagrama (dimensões aproximadamente em proporção) mostrando a área de incidência do laser ($\phi \sim 1$ mm) na fenda dupla.

Substituindo d por $(a + D)$ em (1):

$$y_{max} = \frac{R\lambda}{(a + D)} m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

A relação linear entre y_{min} e m em (2) e y_{max} e m em (3), obtidas através do conjunto de dados experimentais, fornecem a espessura do papel a e o diâmetro D do grafite. O software SciDavis[7] foi usado para fazer as regressões lineares dos dados experimentais. O valor de D foi comparado com o fornecido pela especificação nominal e medido com um micrômetro.

Resultados e discussões

A figura 3 mostra o padrão de interferência-difração sob análise, bem como o gráfico de intensidade fornecido pelo ImageJ. Depois de definir a escala no ImageJ com a ajuda da régua (resolução de 1 mm), as distâncias y_{min} e y_{max} em relação à posição central do padrão (linha vertical preta) são obtidas com a ferramenta 'ponto'. Para cada franja, cinco medições foram realizadas e uma análise estatística de incerteza foi realizada [6], indicando o tamanho do pixel da imagem (0,2 mm) como a principal fonte de incerteza.

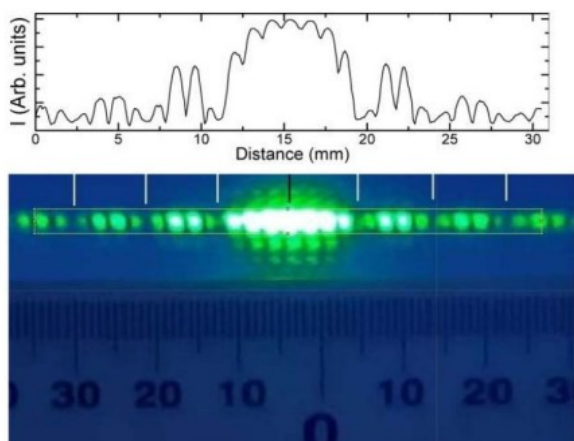


Figura 3. Padrão de interferência-difração de fenda dupla em análise com ImageJ. Seis mínimos do padrão de difração da fenda simples estão indicados com linhas brancas verticais.

A figura 4 mostra a regressão linear para o gráfico de dispersão de y_{min} versus m , onde a inclinação, $\frac{R\lambda}{a}$ em (2), leva a uma espessura do papel de $a = (0.105 \pm 0.002)$ mm (utilizando a abordagem (1), comprimento de onda do laser nominal).

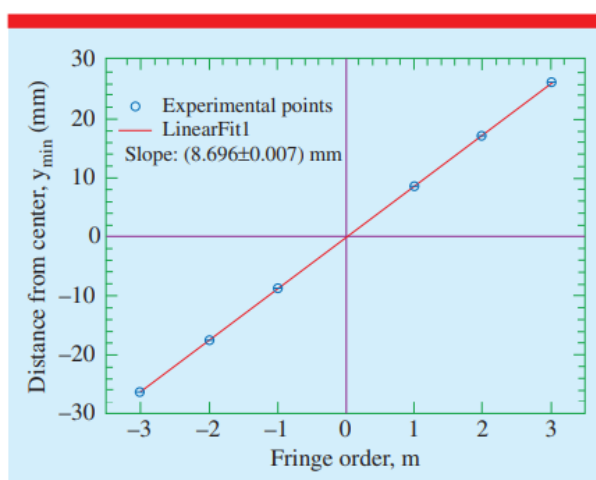


Figura 4. Distância y_{min} de 6 franjas de interferência destrutiva ($m = \pm 1, \pm 2$ e ± 3) em relação ao centro do padrão.

Ao restringir a análise ao máximo de difração de fenda única central, sete franjas de interferência de fenda dupla podem ser visualizadas. A Figura 5 mostra a regressão linear para o gráfico de dispersão y_{max} versus m , onde a inclinação é $\frac{R\lambda}{(a+D)}$ em (3). O diâmetro do grafite $D = (0,301 \pm 0,008)$ mm foi então determinado (dentro da abordagem (1), comprimento de onda nominal do laser).

É interessante notar que D determinado opticamente é cerca de 33% maior do que o diâmetro nominal (0,2 mm). Porém, o diâmetro medido com o micrômetro (resolução de 0,01 mm) foi de $(0,31 \pm 0,03)$ mm, o que confirma a validade do procedimento experimental.

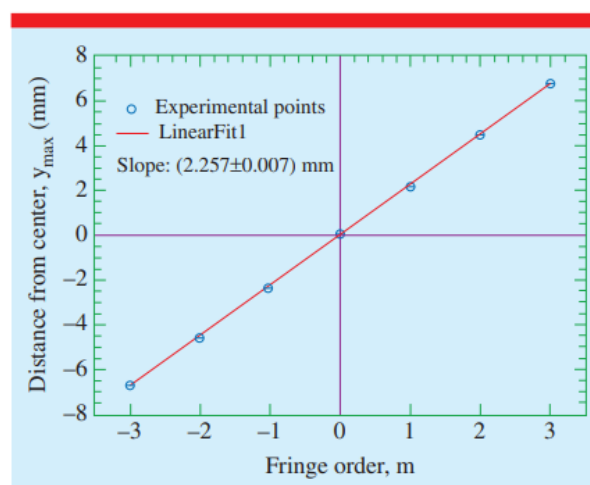


Figura 5. Distância y_{max} de 6 franjas de interferência construtiva ($m = \pm 1, \pm 2$ e ± 3) em relação ao máximo central ($m = 0$).

Dentro da abordagem (2), usando o comprimento de onda do laser medido e sua

incerteza, os valores obtidos para a espessura do papel e o diâmetro do grafite são $a = (0,1055 \pm 0,0003)$ mm e $D = (0,3008 \pm 0,0016)$ mm.

Uma técnica alternativa para medir D é focalizar o laser na parte do grafite que fica acima da extremidade das garras do paquímetro. O princípio de Babinet afirma que o padrão de difração resultante é equivalente ao padrão de difração de uma única fenda com largura D . Medindo os mínimos deste padrão e substituindo a por D em (2), encontramos $D = (0,297 \pm 0,006)$ mm (dentro da abordagem (1), comprimento de onda nominal do laser).

Conclusões

O experimento de interferência de dupla fenda descrito é simples e preciso o suficiente para permitir seu uso em aulas experimentais de Ótica. Para obter valores precisos, é importante verificar se o sistema ótico está alinhado corretamente. Um padrão simétrico é visualizado quando a fenda dupla é perpendicular à tela de projeção.

As fontes de erro mais importantes ($\sim 2\%$ para a e $\sim 3\%$ para D na abordagem (1), comprimento de onda nominal do laser) foram a incerteza do comprimento de onda do laser e o erro em a também afetando o erro em D . Na abordagem (2), usando o comprimento de onda do laser medido e sua incerteza, as

fontes de erro diminuem em aproximadamente uma ordem de magnitude ($\sim 0,3\%$ para a e $\sim 0,5\%$ para D). É importante notar que a medição mecânica para D resulta em um erro de $\sim 10\%$. Com o princípio de Babinet de fenda única, $\sim 2\%$ de erro foi encontrado para D , principalmente devido à incerteza do comprimento de onda do laser (dentro da abordagem (1), comprimento de onda do laser nominal). Dentro da abordagem (2), usando o comprimento de onda do laser medido e sua incerteza, esse erro cai para $0,5\%$.

O padrão também pode ser facilmente utilizado em demonstrações qualitativas (sem a necessidade de uma bancada ótica) para destacar conceitos de interferência e difração nas aulas teóricas. Embora o experimento tenha sido conduzido com o objetivo de determinar os parâmetros geométricos da fenda dupla (espessura do papel a e diâmetro do grafite D), se esses parâmetros forem conhecidos, o comprimento de onda do laser poderá ser medido. A espessura do papel e o diâmetro do grafite podem ser alterados para estudar sua influência no padrão de difração de interferência. Também é bastante simples usar apenas a abertura do calibrador entre as mandíbulas para fazer experiências com a difração de luz de uma única fenda variável. Vale ressaltar que, embora os experimentos tenham utilizado uma imagem analisada por

computador, a distância entre as franjas pôde ser medida diretamente no anteparo, o que de certa forma é mais atraente para os alunos.

Referências

- [1] Hecht E 2017 Optics 5th edn (London: Pearson)
- [2] Hénault F and Spang A 2011 Phys. Educ. 46 41–4
- [3] Physical Science Study Committee 2005 Physics: Laboratory Guide 7th edn (New York: Wiley)
- [4] Lee C, Shin K and Lee S 2010 Am. J. Phys. 78 71-4
- [5] Rasband W S 1997–2018 ImageJ (Bethesda, MD: US National Institutes of Health) (<https://imagej.nih.gov/ij/>)
- [6] JGCM 100:2008 Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertatinty in Measurement (Sèvres: BIPM)
- [7] Benkert T, Franke K and Standish R 2007 SciDAVis (<http://scidavis.sourceforge.net/>)