



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA**

**WILLIAM SARAIVA RODRIGUES JÚNIOR**

**A CONSTRUÇÃO DE MATERIAL DE FORMAÇÃO CONTINUADA EM**  
**ÓTICA FÍSICA PARA PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO**

**FORTALEZA**

**2021**

WILLIAM SARAIVA RODRIGUES JÚNIOR

A CONSTRUÇÃO DE MATERIAL DE FORMAÇÃO CONTINUADA EM ÓTICA  
FÍSICA PARA PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- J1c Júnior, William Saraiva Rodrigues.  
A construção de material de formação continuada em ótica. / William Saraiva Rodrigues Júnior. – 2021.  
169 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. William Saraiva Rodrigues Junior.
1. Ótica Física. 2. Experimentos. 3. Ensino de Física. 4. Experiência de Baixo Custo. I. Título.  
CDD 530.07
-

WILLIAM SARAIVA RODRIGUES JÚNIOR

A CONSTRUÇÃO DE MATERIAL DE FORMAÇÃO CONTINUADA EM ÓTICA  
FÍSICA PARA PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire

Aprovada em: 18/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcos Antônio Araújo Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Maria Consuelo Alves Lima  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Dedico este trabalho aos meus pais por toda auxílio e apoio prestado ao longo de suas vidas, sem vocês nada disto teria sido possível.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter nos ajudado até aqui.

Obrigado aos meus pais, José William (In memoriam) e Idenir Maria que ao longo de minha vida sempre me apoiaram e incentivaram a estudar e que mesmo nas dificuldades nunca mediram esforços para que isso fosse possível.

Meu muitíssimo obrigado a minha companheira, Thalia Sampaio, por todo apoio tempo, paciência e atenção que precisei tomar emprestado para a realização e conclusão deste mestrado. Entendo que nenhum desses agradecimentos seriam suficientes para expressar sua importância neste importante momento de minha vida.

Obrigado por estar ao meu lado sempre.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire, por todo apoio, paciência e orientação. Sua ajuda e atenção foram de extrema importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Deixo meus agradecimentos a todos os professores integrantes do programa que puderam partilhar seu tempo e conhecimento para que fosse possível obtermos uma formação de qualidade e excelência. Isto será de grande valia para nossa missão em sala de aula. Um obrigado em especial aos Prof. Dr. Marcos Antônio Araújo Silva e Prof. Dr. Carlos Alberto Santos de Almeida por toda ajuda e atenção conosco junto à coordenação deste Mestrado.

Agradeço a todos meus colegas e amigos que fiz ao longo do curso e a todos que puderam compartilhar e vivenciar comigo esse período de grande aprendizagem que foi a realização deste mestrado. Meu muitíssimo obrigado a todos!

Por fim, quero agradecer à Capes pelo financiamento parcial deste trabalho através do código de financiamento 001.

## RESUMO

A forma como o ensino de física é apresentada em muitas das escolas mostra que embora mudanças tenham ocorrido ao longo de décadas, quase nenhuma, ou pouquíssimas são as diferenças entre a forma como a física era ensinada antigamente e como é hoje. O ensino segue focado em uma abordagem teórica e matemática, onde os fenômenos físicos são apresentados através de uma breve leitura e o foco central se dá na resolução de exercícios e aplicações de fórmulas. Alguns teóricos da educação, como Piaget, Vygotsky e Bruner defendem que a interação do aluno com o ambiente tem grande papel nos processos de desenvolvimento. Uma forma de tornar os alunos mais ativos e possibilitar a eles a participação nestes processos seria através do uso de experimentos em sala de aula. Entretanto, diversos são os problemas que impossibilitam a sua utilização em sala de aula, como: falta de experiência com os experimentos, carência de materiais, carência de conhecimento prático e teórico, quantidade pequena de aulas assim como vários outros fatores. Tais dificuldades estão presentes em todas as áreas da física, incluindo a ótica. Este trabalho surge então da necessidade observada de resolver, ou mitigar em parte, o problema da formação dos docentes e como experimentos podem ser utilizados por professores em suas aulas para tornar as aulas de ótica mais dinâmicas e motivadora. Como tema central de estudo, aborda-se a óptica física com um produto educacional que apresenta uma estratégia de ensino, sequência didática e experimentos de interferência, difração e polarização da luz. Os experimentos envolvem o espelho de Lloyd; a difração da luz em uma lâmina, em fio de cabelo e em CDs; a lei de Malus e a intensidade luminosa. Uma série de exercícios sobre os diversos temas de ótica física também é fornecida no Produto Educacional, complementando assim os temas apresentados nos experimentos. O Produto Educacional foi aplicado em uma escola estadual no estado do Ceará e analisado em conjunto com alguns professores de disciplinas de Física.

**Palavras-chave:** Ensino de Física. Ótica Física. Experimentos. Experiência de Baixo Custo.

## ABSTRACT

The way in which physics education is presented in many schools shows that although changes have occurred over the last decades, very few are the differences between the way physics was taught in the past and how it is today. Physics teaching remains focused on a theoretical and mathematical approach, with physical phenomena provided through a brief reading and the central focus concentrated on solving exercises and applying formulas. Some theorists, such as Piaget, Vygotsky and Bruner argue that the student's interaction with the environment plays a great role in the development processes. A way to make students more active and enable them to participate of these processes should be the use of experiments in the classroom. However, there are several problems that prevent its use in the classroom, including: lack of experience with experiments, lack of materials, lack of practical and theoretical knowledge, small number of physics classes as well as several other factors. These difficulties are present in all areas of physics, including optics. The present dissertation arises from the need to solve, or partially mitigate, the problem of teacher training and how experiences can be used by teachers in their classes to make optics classes more dynamic and motivating. As a central theme of study, Physical Optics is approached with an educational product that presents teaching strategy, didactic sequence and experiments of interference, diffraction and polarization of light. The experiments involve Lloyd's mirror; diffraction of light on a blade, on a hair and on a CD; Malus's law and luminous intensity. A series of exercises on the different topics of Physical Optics is also provided in the Educational Product, thus complementing the themes presented in the experiments. As the final remark, the Educational Product was used in a state school in the state of Ceará, Brazil, and was analyzed together with some physics teachers.

**Keyword:** Physics Teaching. Physical Optics. Experiments. Low Cost Experience.

## **LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

ENEM	Exame Nacional do Ensino Médio
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educaao Nacional
PCN+EM	Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
DCN	Diretrizes Curriculares Nacionais
ENADE	Exame Nacional de Desempenho de Estudantes

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>DESAFIOS NO ENSINO DE FÍSICA .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>A teoria da aprendizagem de Bruner.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.1</b>	<b>O Desenvolvimento Cognitivo.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Princípios fundamentais da Teoria da Aprendizagem de Bruner.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Estratégias pedagógicas para o ensino de ótica.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E DISCUSSÃO SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Estrutura do Produto Educacional.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Estratégia de ensino.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Sequência didática.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Sugestões de experimentos.....</b>	<b>45</b>
<b>4.4</b>	<b>Exercícios propostos.....</b>	<b>50</b>
<b>4.5</b>	<b>Aplicação do produto educacional.....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A educação no Brasil vem enfrentando nos últimos anos uma série de mudanças e grandes dificuldades, isso deve ao crescente avanço tecnológico global e as inúmeras mudanças e reformas educacionais propostas para a educação brasileira, como a implementação da nova BNCC e alteração dos Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN’s.

Na contramão dessas mudanças é observado que o atual modelo de ensino de ciências físicas usado, e largamente adotado pela grande maioria dos docentes em sala de aula é aquela onde há uma excessiva dependência de livros didáticos, de aulas expositivas, ausência, ou inexistência de aulas experimentais e centrado na memorização de conteúdo.

Embora, seja este o cenário encontrado em muitas das salas de aula pelo país é importante salientar que nas últimas décadas foram traçadas diversas políticas públicas com o intuito de reformular a prática escolar (MOREIRA, 2000), a exemplo disto temos: a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – LDB, também conhecida como Lei Darcy Ribeiro (Lei 9.394/96), os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio – PCN+EM, o Exame Nacional de Desempenho de Estudantes – ENADE, as Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Graduação – DCN e a mais recente Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – LDB também conhecida como Novo Ensino Médio. (Lei 13.425/2017). Com tantas mudanças que ocorrem e que estão ocorrendo leva-se algum tempo para que os novos processos possam ser implementados e para que os docentes sejam preparados para o enfrentamento dessas novas questões, o que na grande maioria das vezes não ocorrem em tempo hábil.

A partir do breve resumo da situação apresentada, é possível perceber que o ensino de física no país, apesar de apresentar propostas interessantes e inovadoras, ainda tem diversas falhas em seus processos. Ao final do processo, muitas vezes, obtêm-se resultados insuficientes, me induzindo a pensar que o problema está relacionado ao modelo de formação dos professores que é incompleto ou ineficiente para o objetivo que se propõe. Posto isso, torna-se de fundamental importante o desenvolvimento de estudos voltados para a campo da formação de professores, cujos objetivos sejam os de solucionar ou mitigar os problemas encontradas na práxis escolar. Um dos objetivos para o qual se

propõe o trabalho que será apresentado a seguir é o de auxiliar professor que tenham dificuldades em trabalhar alguns tópicos em séries do ensino médio.

Analisarmos os conteúdos abordados ao longo do Ensino Médio na disciplina de Física, nos deparamos com um tópico bastante relevante e que está diretamente relacionado ao nosso cotidiano e dos alunos, a ótica. Sendo a visão um dos sentidos mais importantes do ser humano, tudo aquilo que é capaz de excitá-la é objeto de curiosidade e de estudos. Desde os primórdios o homem buscou respostas para explicar como era possível enxergarmos as coisas, como a luz se propaga, a ocorrência de eclipses, os arco-íris e vários outros fenômenos naturais. No Ensino Médio, a ótica se divide em duas áreas, a ótica geométrica e a ótica física. Embora ambas sejam importantes, uma importância maior acaba sendo dada à geométrica em detrimento da outra. Pouquíssimo ou quase nada é estudado de ótica física ao longo do Ensino Médio, isso deve a diversos fatores. Além disso em muitos dos casos existe um outro problema que estão diretamente relacionadas à carência de formação dos professores neste tema.

Dado o momento em que vivemos, devido a rapidez com que as mudanças ocorrem e os momentos de muitas incertezas, tornou essencial para os docentes se manter sempre atualizado e revisando suas práticas docentes. Como alternativa de ajudar a solucionar, ou mitigar problemas observados na prática escolar, e como estratégia de formação continuada foi desenvolvido ao longo deste trabalho um material utilizando como bases para sua elaboração: experiências vivenciadas em sala de aula ao longo de anos de ensino, pesquisas realizadas nos últimos anos sobre a carente situação em que se encontram os cursos de licenciaturas no país e a deficiência na formação de professores de licenciatura em Física. O trabalho que é apresentado tem como objetivo pontual propor um material didático que possa ser utilizado como ferramenta por docentes da disciplina de física com o objetivo de suprir carências ou dificuldades apresentadas naqueles assuntos que tangem a ótica física.

O capítulo 1 dessa dissertação é essa introdução. No capítulo 2 faz-se uma breve discussão sobre os desafios existentes no ensino de Física, no capítulo 3 são realizadas considerações teóricas sobre o estudo. No capítulo 4, denominado de Metodologia e Discussão sobre o Produto Educacional, é sugerida uma estratégia de ensino, apresentando-se sequências didáticas para 15 aulas e sugestões de experimentos e

exercícios. Uma lista mais completa de experimentos e exercícios são fornecidos no Produto Didático. Por fim, no capítulo 5 são fornecidas as considerações finais.

## 2 DESAFIOS NO ENSINO DE FÍSICA

A grande maioria dos alunos concludentes do ensino médio tem como resposta ao ser questionados o que pensam da disciplina de física, que: “É coisa de louco! ”. Está é uma das frases mais ditas não somente pelos alunos, como também por boa parte da população. Para muitas pessoas, falar de física representa trazer à tona inúmeras situações de frustrações e de dificuldades enfrentadas ao longo de sua vida escolar, segundo Bonadiman & Nonenmacher (2007), o que se observa é que, de um modo geral, nas escolas de nível médio, se aprende pouco da física e, o que é pior, se aprende a não gostar dela. Uma disciplina que em sua essência traz luz para nos ajudar a entender o porquê das coisas serem do jeito que são, acaba levando os alunos para uma região escura e sombria onde lá, eles, em sua grande maioria, permanecem durante muito tempo.

Os estudantes do Ensino Fundamental ao progredirem para o Ensino Médio costumam se sentir desconfortáveis com as mudanças enfrentadas: acréscimo no número de aulas semanais e disciplinas, mudanças de professores, exagerada cobrança sobre jovens ainda muitos novos e diversas outras. Isso em conjunto com a grande mudança que a puberdade traz consigo acaba por extinguir ou ceifar em muitos dos jovens a curiosidade e a busca de novas descobertas além do prazer de estudar determinadas matérias. Como resultando disso, estudantes que normalmente eram alunos brilhantes no Ensino Fundamental passam a terem um desempenho abaixo do esperado nos processos avaliativos. Para Bonadiman & Nonenmacher (2007) o fraco desempenho estudantil em processos avaliativos como o Programa Internacional de Avaliação de Alunos – PISA e nas provas do Exame Nacional do Ensino Médio – ENEM é um problema geral, que perpassa todos os campos do conhecimento, não sendo exclusividade de nenhuma área específica, mas se apresentam de forma mais contundentes quando se trata do ensino de ciências da natureza. O autor também indica alguns outros fatores que contribuem para este quadro:

[...] a pouca valorização do profissional do ensino, as precárias condições de trabalho do professor, a qualidade dos conteúdos desenvolvidos em sala de aula, a ênfase excessiva na Física clássica e o quase total esquecimento da Física moderna, o enfoque demasiado na chamada Física matemática em detrimento de uma Física mais conceitual, o distanciamento entre o formalismo escolar e o cotidiano dos alunos, a falta de contextualização dos conteúdos desenvolvidos com as questões tecnológicas, a fragmentação dos conteúdos e a forma linear como são desenvolvidos em sala de aula, sem a necessária

abertura para as questões interdisciplinares, a pouca valorização da atividade experimental e dos saberes do aluno, a própria visão da ciência, e da Física em particular, geralmente entendida e repassada para o aluno como um produto acabado. (BONADIMAN; NONENMACHER, 2007, p.196-197)

Dentre todas as disciplinas que compõem a área de ciências da natureza, nossa atenção e análise será dada com maior ênfase à disciplina de física. Ao estudarmos ela, é inegável a importância de a matemática como ferramenta para melhor compreender fenômenos a nossa volta. Apesar disso, observando os principais métodos de ensino que são utilizados, é notável a prevalência de conceitos matemáticos antecôncitos fenomenológicos da grande maioria dos conteúdos lecionados. É importante de ser destacado também a ausência de aulas de experimentação, a grande maioria dos alunos terminam o Ensino Médio sem ter tido a oportunidade de vivenciar através da prática conceitos da física. A falta dessas oportunidades acaba contribuindo para privar os alunos da oportunidade de poder presenciar ali na sua frente fenômenos que muitas das vezes ficam restrito ao formalismo matemático ou imagens e gravuras. Na minha opinião, algumas razões para justificar o cenário atual são: grande quantidade de conteúdo a ser ministrado em poucas aulas semanais, escassez de tempo para uma melhor qualificação dos docentes, sobrecarga de trabalho, ausência de laboratórios ou em situações precárias e elevados custos para aquisição de kit com experimentos.

Dado o cenário atual, cabe reforçar que a matemática tem sua importante parcela de contribuição no desenvolvimento da física como em diversas outras áreas. Contudo, é necessário tomar um caminho alternativo para o ensino da física que não seja aquele centrado na chamada física matemática, conceitos físicos deveriam ser apresentados de modo que possam serem observados no dia-a-dia dos alunos, como por exemplo através de vídeos, laboratórios virtuais, observações do ambiente a sua volta ou através de experiências.

O uso de experimentos como ferramenta para o ensino de Física e de Ciências vem sendo defendido a bastante tempo por diversos autores como um objeto que tem importantíssimas contribuições para o ensino-aprendizagem dos alunos, segundo Araújo & Abib (2003):

No que se refere ao grau de direcionamento das atividades, acredita-se que, de um modo geral, a utilização adequada de diferentes metodologias experimentais, tenham elas a natureza de demonstração, verificação ou investigação, pode possibilitar a formação de um ambiente propício ao

aprendizado de diversos conceitos científicos sem que sejam desvalorizados ou desprezados os conceitos prévios dos estudantes. Assim, mesmo as atividades de caráter demonstrativo, amplamente utilizada pelos autores pelos autores pesquisados e que visam principalmente à ilustração de diversos aspectos dos fenômenos estudados, podem contribuir para o aprendizado dos conceitos físicos abordados, na medida em que essa modalidade pode ser empregada através de procedimentos que vão desde uma mera observação de fenômenos até a criação de situações que permitam uma participação mais ativa dos estudantes, incluindo a exploração dos seus conceitos alternativos de modo a haver maiores possibilidades de que venham a refletir e reestruturar esses conceitos. (Araújo & Abib, 2003, p.190)

Utilizar experimentos em sala de aula para as demonstrações de fenômenos, ou explicação de conceitos físicos pode ser utilizada como uma interessante ferramenta para ajudar a transformar a imagem que os alunos têm sobre a disciplina de Física. Ademais, pode ser usada como instrumento motivador, levando os alunos a se questionarem sobre a causa daquele fato, podendo o professor ainda utilizar isso para ajudar a desenvolver nos alunos a capacidade de propor soluções para situações que eles possam encontrar em situações do seu cotidiano relacionados àquele fato.

Para Gaspar e Monteiro (2005):

As atividades experimentais de demonstração em sala de aula, tanto quanto as atividades tradicionais de laboratório realizadas por grupos de alunos com orientação do professor, apresentam dificuldades comuns para a sua realização, desde a falta de equipamentos até a inexistência de orientação pedagógica adequada. No entanto, alguns fatores parecem favorecer a demonstração experimental: a possibilidade de ser realizada com um único equipamento para todos os alunos, sem a necessidade de uma sala de laboratório específica, a possibilidade de ser utilizada em meio à apresentação teórica, sem quebra de continuidade da abordagem conceitual que está sendo trabalhada e, talvez o fator mais importante, a motivação ou interesse que desperta e que pode predispor os alunos para a aprendizagem. (Gaspar & Monteiro, 2005, p. 227)

Devido à importância de sua utilização, a experimentação em sala de aula deveria ser uma ferramenta adotada por professor para o ensino de Física. Mesmo com as dificuldades encontradas em sua aquisição devido os altos valores encontrados para kits com experimentos de Física, uma alternativa de baratear e de tornar mais acessível o uso de experimentos em sala seria através da elaboração de kits com matérias de baixo custo.

### 3 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

#### 3.1 A teoria da aprendizagem de Bruner

Embora o estadunidense, Jerome Bruner seja psicólogo por formação e possua grandes contribuições para o mundo da psicologia, seus trabalhos ganharam uma maior notoriedade no campo da educação. Durante o período da corrida espacial, após a antiga União Soviética lançar seu satélite Sputnik aos céus, o medo e a crença que seus estudantes estavam em desvantagem nas disciplinas de ciências e matemática quando comparado aos soviéticos passou a tomar conta dos sentidos do povo norte-americano. Como forma de lidar com esse problema uma conferência nacional foi organizada com vários líderes de várias áreas dos saberes, dentre estes, havia Jerome Bruner que foi um dos responsáveis por realizar alterações curriculares nos Estados Unidos ao longo dos anos 60.

Bruner foi também um dos principais líderes das chamadas revolução cognitiva, tendo papéis importante durante as duas.

No primeiro desses movimentos, Bruner contribui para o próprio fortalecimento das pesquisas baseadas no processamento de informação, enquanto que na segunda revolução cognitiva, o trabalho desse autor volta-se para a produção de significados culturais. (VASCONCELLOS; VASCONCELLOS, 2007, p.388).

Para estudiosos, as teorias apresentadas por Bruner apresentam renovações com relação aos ditos aspectos tradicionais. Embora seu trabalho apresente semelhanças em relação as ideias defendidas por Jean Piaget, como por exemplo, o fato de Bruner também colocar os processos de maturação e as interações que o ser tem com o ambiente como sendo o centro do processo de desenvolvimento e de formação da pessoa, para Bruner o contexto dos fatos psicológicos tem grande importância nesses processos.

As relações entre quem ensina e quem aprende repercutem sempre na aprendizagem. E desde que o processo do ensino é essencialmente social - principalmente nos seus primeiros estágios, quando abrange, no mínimo, um professor e um aluno -, é claro que uma criança que tem que ir à escola deve ter um mínimo de conhecimentos sociais para poder participar do processo de aprendizagem escolar. (BRUNER, 1973b, p. 50).

O fato de defender que o meio no qual o sujeito está inserido, e as relações com o ambiente a sua volta além das interações sociais possuem influência sobre os processos de formação e de desenvolvimento, faz com que sua teoria tenha um caráter mais holístico quando comparado a de Piaget, é o que aponta Marques (2004, p.1),

A abertura à influência do contexto e do social no processo de desenvolvimento e de formação torna a teoria de Jerome Bruner mais abrangente do que a teoria de Jean Piaget e fazem com que aquele consiga incorporar a transmissão social, o processo de identificação e a imitação no processo de desenvolvimento e formação. O caráter desenvolvimentista da teoria de Bruner mantém-se graças à tônica que ele coloca no papel da equilíbrio, ou seja, a capacidade que cada pessoa tem de se autorregular.

O nome de Jerome Bruner aparece atualmente como uma das pessoas mais importantes do construtivismo. O construtivismo presume que o conhecimento e a experiência estão intimamente relacionados um com o outro e que o conhecimento adquirido pelo sujeito está diretamente vinculado às experiências nas quais o conhecimento foi construído. Bruner afirma que o ensino estruturado é fundamental para a boa aprendizagem, em sua obra ele apresenta quatro características principais que caracterizam uma teoria de ensino:

1º - Uma teoria de ensino deve apontar as experiências mais efetivas para implantar em um indivíduo a predisposição para a aprendizagem – aprendizagem em geral, ou qualquer caso dela.

2º - Deve especificar como deve ser estruturado um conjunto de conhecimentos, para melhor ser aprendido pelo estudante.

3º - Uma teoria de ensino deverá citar qual a sequência mais eficiente para aprender as matérias a serem estudadas.

4º - Uma teoria da instrução deve deter-se na natureza e na aplicação dos prêmios e punições, no processo de aprendizagem e ensino.

A estruturação dos processos pedagógicos é fundamental para ajudar os estudantes a aprenderem de fato, ele considera que as matrizes dos conteúdos de ensino e dos processos educativos devam ser bem planejadas e organizadas em etapas além de que os

processos de ensino devam ser divididos em pequenas etapas tornando assim o processo de aprendizagem muito mais eficiente.

Para Bruner, o ensino deve ser focado na compreensão dos conceitos centrais de cada um dos assuntos abordados, uma vez compreendido os conceitos centrais serão mais fáceis a compreensão dos conceitos secundários. Angeli e Sousa (2015, p. 47) afirma que “A organização de conteúdos tem papel importante no desenvolvimento cognitivo da criança. A seleção dessa sequência influenciará diretamente na compreensão do estudante sobre determinado assunto. ”

A maneira como os assuntos são tratados e apresentados aos alunos refletem diretamente o direcionamento que se deseja dar a determinados conteúdos, compreendendo isso fica mais claro o que Bruner (1969, 73, 76) diz que "Qualquer assunto pode ser ensinado eficazmente, de alguma forma intelectualmente honesta, a qualquer criança em qualquer fase de desenvolvimento.

Ao dizer isso,

[...] ele não quis dizer que o assunto poderia ser ensinado em sua forma final, e sim que seria sempre possível ensiná-lo, desde que se levassem em consideração as diversas etapas do desenvolvimento intelectual. Cada uma dessas etapas é caracterizada por um modo particular de representação, que é a forma pela qual o indivíduo visualiza o mundo e explica-o a si mesmo. Assim, a tarefa de ensinar determinado conteúdo a uma criança, em qualquer idade, é a de representar a estrutura deste conteúdo em termos da visualização que a criança tem das coisas. (MOREIRA, 1999, p. 81-82).

Bruner também defende a aprendizagem por descoberta, também conhecida como Teoria da Aprendizagem por Descoberta, ele defende que uma das melhores formas de aprender é através da pesquisa ativa, do próprio esforço cognitivo dos alunos e não através da mera leitura de um tema, ou de aulas expositivas onde eles escutam passivamente os conteúdos que estão sendo ministrados. Na aprendizagem por descoberta, os estudantes devem criar uma hipótese sobre o tema, realizar pesquisas para verificar suas hipóteses e conduzir experimentos, com a orientação do professor. Quando o estudante é movido pela curiosidade ele se sente mais motivado a compreender o que está estudando e adquirir novos conhecimentos. Para Prass (2012, p. 23), “A aprendizagem por descoberta ocorre

quando o professor apresenta todas as ferramentas necessárias ao aluno para que ele descubra por si o que deseja aprender. ”

A teoria da aprendizagem por descoberta também nos remete ao currículo em espiral, para ele o ensino das matérias na escola deve adotar o formato de uma espiral, onde cada ano os professores devem retomar os mesmos temas estudados nos anos anteriores, sempre acrescentando novas informações, além de novas atividades de estudo assim agregando mais conhecimentos ao que os alunos já sabem sobre aqueles temas. O estudo começa pelos conceitos mais básicos e a cada ano novos conceitos são agregados aos anteriormente visto.

### **3.1.1 O Desenvolvimento Cognitivo**

Na aprendizagem por descoberta o aluno é participante ativo do processo de construção do seu conhecimento, transformando-o e assimilando-o por meio de três modos de representação, mencionados intensivamente por autores como Moreira (1999), Prass (2012) e McLeod (2008):

Representação Enativa ou Ativa – É a forma inicial como a criança codifica as informações e as armazena em sua memória. Desenvolve-se por meio do contato da criança com o objeto;

Uma criança pequena entende melhor o ambiente interagindo com os objetos a sua volta, nessa etapa a criança não usa palavras nem conceitos, ela interage com os objetos a seu redor para dar sentido ao mundo, muitas vezes uma criança pequena dará mais atenção a caixa que embrulha um presente do que para o próprio presente pois está lhe apresenta mais estímulos aos seus sentidos. Neste estágio elas são capazes de se expressar através de ações, porém não possuem a capacidade de explicá-las. Elas também são mais receptivas a informações ativas como vídeos, desenhos animados, apresentações do que informações estáticas como imagens ou ouvirem histórias.

Representação Icônica – Esse modo se dá quando a criança armazena as informações/objetos na forma de imagens mentais;

Nessa etapa a memória visual é mais desenvolvida que o anterior, desta forma a criança já se mostra capaz de criar relações entre objetos reais e as figuras que os objetos representam, por isso os livros infantis trazem muitas ilustrações e figuras, uma criança não terá durante sua infância a oportunidade de observar diversas figuras, mas pela ilustração do livro ela será capaz de ver aquela imagem e poder interagir com o ele, mesmo que nenhuma delas estejam presente. Outra forma da criança aprender, armazenar, e criar as informações dos objetos em sua mente é através da convivência com outras pessoas.

**Representação Simbólica** – Essa última representação refere-se ao armazenamento da informação em forma de código ou símbolo abstratamente.

Nessa etapa a mente da criança vai além do ícone e consegue lidar com símbolos para representar o mundo, ao ver determinados símbolos ela já é capaz de associar ele a uma informação conhecida, não havendo a necessidade de ter o ícone que o represente diante dela para poder-lo associar ao objeto, ela também já lida com ideais abstratas e já entende seu significado, além de ser capaz de traduzir suas vivências em relatos complexos e de receber orientações verbais com clareza.

### **3.1.2 Princípios fundamentais da Teoria da Aprendizagem de Bruner**

Os princípios fundamentais da Teoria da Aprendizagem de Bruner são os seguintes:

1. **Motivação:** Segundo Bruner, as crianças já nascem com o desejo de aprender, por natureza as crianças são ativas e curiosas, mas para que esse desejo seja mantido, é necessário que haja recompensas, prêmios, reforços externos, o que ele chama de motivação. Contudo, esses devem ser passageiros, apenas a motivação interna é capaz de manter o gosto pela aprendizagem.
2. **Estrutura:** Os assuntos quando adequadamente estruturados e organizados, por mais difíceis que sejam podem ser transmitidos as crianças de forma que elas compreendam e sejam capazes de apresentar elas a alguém que tenham um conhecimento mais avançado do tema de maneira e que ela possa ter suas ideais reconhecíveis.

3. Sequência: Uma ordem adequada dos conteúdos a serem ministrados deve ser seguida, para Bruner o desenvolvimento intelectual é sequencial, partindo da representação enativa, passando pela representação icônica e finalmente chegando à representação simbólica.

4. Reforçamento: Ao longo do processo de aprendizagem o aluno deve receber recompensas e ser acompanhado com relação ao seu desempenho, mas com o passar do tempo o aluno deve-se tornar autossuficiente, não precisando de reforçamento.

### **3.1.3 Estratégias pedagógicas para o ensino de ótica**

Diversas são as contribuições que Bruner apresenta para o ensino de física. Através da Teoria da Aprendizagem por Descoberta, um leque de possibilidade pode ser aberto para a sua aplicação em diversos assuntos da física. Trazer para sala de aula um problema do cotidiano dos alunos relacionado ao assunto que está sendo estudado ou questão a ser solucionada, ajudar os alunos a explorar as alternativas de solução, as observações e orientando sobre os caminhos que podem ser utilizados é uma das maneiras possíveis de aplicar a teoria de Bruner no ensino de física.

É importante destacar que os alunos não devem ser deixados sozinhos para que descubram por si só as respostas para os problemas apresentados, pois um tempo muito grande seria desperdiçado por ele para buscar ideias, ou tecnologias que poderiam ser uteis para a solução daquilo.

Aulas de laboratório são ótimos exemplos que podem ser usados para empregar as teorias de Bruner, antes de ser apresentado, por exemplo, o conteúdo de ótica no ensino médio, o professor pode apresentar questionamentos ou situações problemas acerca do comportamento, natureza e de fenômenos relacionados a luz e pedir para que os alunos, sozinhos, ou em conjunto tentem reproduzi-lo em laboratório com as ferramentas que lhe são dadas, para que os alunos não se sintam perdidos, pode ser utilizado roteiros de prática, onde através desse roteiro ele poderá saber os procedimentos a serem seguidos e objetivos que se esperem que eles alcancem. No final pode ser acrescentado questionamentos sobre os procedimentos realizados onde os alunos deverão propor soluções para os problemas apresentados.

Como forma de alcançar os objetivos para o qual o produto foi proposto, foi necessário encontramos uma das linhas de pensamentos pedagógicos que pudessem serem utilizadas pelos professores ao longo da aplicação do trabalho. Neste capítulo, iremos abordar um pouco sobre os fundamentos teóricos da aprendizagem que ajudam a embasar e fortalecer a proposta do trabalho apresentado. É importante destacarmos também, que embora seja dada ênfase a uma linha pedagógica específica, isso não significa que outras sejam menos importantes, caso seja do desejo do utilizador do trabalho aplica-lo com base em outras linhas pedagógicas isto poderá ser feito sem que ocorra perdas nos objetivos que o objeto educacional se propõe.

#### **4 METODOLOGIA E DISCUSSÃO SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL**

Apresentado a problemática com relação ao ensino de física e cotidiano dos professores em sala de aula será apresentado uma proposta de material didático que possa ser utilizado como base de uma estratégia didática para uma formação continuado dos professores de Ensino Médio. A intenção desse material é aparelhar os professores com ferramentas que os possibilitem fazer uma abordagem mais completa sobre a Ótica Física em sala de aula, além de orientar os professores sobre os experimentos, daquele assunto, que podem ser utilizados em sala de aula.

Além do pouco tempo para apresentação dos conteúdos, um dos receios acerca do ensino de Ótica Física está diretamente relacionado a carência de formação nesse assunto muitos professores durante sua formação, ao cursarem a disciplina de ótica, tiveram este tópico abordado de maneira bastante superficial. Isso atrelado a ausência por quase completo desse assunto no Ensino Médio acaba fazendo com os professores tenham dificuldades para ministrar aulas sobre esse tema.

Durante o processo de feitura desse material, foi levado sempre em consideração quais seriam os fatores que deveriam ser abordados ao longo do trabalho para que ele pudesse contribuir de maneira substancial para o ensino de Física em nosso país. Um dos grandes desafios encontrados ao longo da construção dele foi a de elaborar um produto que fosse capaz de facilitar o entendimento daquele assunto por parte dos professores e os tornassem capaz de repassar aquele conhecimento para os alunos de maneira sucinta.

Uma das formas encontrada e sugerida desses conteúdos ser construídos em conjunto com os alunos se dá através de experimentos, como foi discutido anteriormente os experimentos tem uma grande contribuição para o processo de ensino-aprendizagem, através deles é possível estimularmos a curiosidade e vários outros aspectos nos alunos. Ao longo dos Capítulos também foram adicionados roteiros de práticas para que os professores possam levar estes experimentos para sua sala de aula.

Ao longo a elaboração destes roteiros, foi tomado o cuidado de apresentar uma coletânea de experimentos que utilizassem materiais que poderiam ser facilmente encontrados pelos professores a fim de traspasar todas as dificuldades verificada para a aquisição e utilização de kits com experimentos.

Por fim, foram incluídos ao final de cada um dos Capítulos uma coletânea de exercícios que poderá ser utilizado pelos professores a fim de avaliar os seus conhecimentos sobre aquele assunto que foi estudado, ou que poderá ser utilizado no intuito de ajudar os alunos a fixarem melhor os conteúdos abordados em sala de aula.

Procurou-se durante a elaboração do produto educacional fixamo-nos em uma única linha de pensamento pedagógica, contudo, pode ser observado que cada uma das salas de aulas que nos deparamos diariamente possuem suas peculiaridades onde notamos que uma mesma metodologia nem sempre funcionará para todas elas. Com isso, buscou-se tornar todos os assuntos abordados interessantes a leitura e diretamente relacionados a situações do nosso cotidiano, de modo a fornecendo assim ao professor diferente abordagem de um mesmo assunto para que ele possa escolher aquela que melhor se adequa a sua sala de aula.

Os diferentes tipos de experimentos e níveis de dificuldade das atividades encontradas possibilitam abordagem diferentes de um mesmo assunto, ou conceito físico, permitido assim ao professor determinar quais os objetivos e nível de profundidade naquele tema que se deseja alcançar. Esse grau de profundidade e possibilidade de abordagens diferentes pode ser utilizado pelos professores ao verificarem que em uma, ou em determinadas turmas é mais interessante utilizar certos tipos de sequência. Dessa forma, o produto será capaz de fornecer diferentes abordagem dos temas estudados e de possibilitar uma aprendizagem dos temas abrangendo uma maior quantidade de situações possíveis.

#### **4.1 Estrutura do Produto Educacional**

O produto educacional que elaborado foi construído e dividido de maneira que o leitor pudesse encontrar um referencial teórico, prático e sugestões de exercícios para serem trabalhados em sala de aula. O produto foi dividido em quatro unidades onde em cada um deles será trabalhado conceitos relacionados ao tópico que será estudo e trabalhado em sala de aula. É importante destacar que se tomou o cuidado de ao longo da elaboração do produto a linguagem que fosse utilizada possibilitasse uma leitura rápida e fluida sobre os tópicos apresentados.

Na primeira unidade, é feita uma apresentação do tema que será trabalhado no material, a ótica física. Após isso são apresentados fundamentos que auxiliarão o leitor a distinguirem a ótica física da ótica geométrica além de apresentar quais serão os fundamentos necessários para um melhor entendimento desse segmento da ótica.

Na segunda unidade é apresentado um dos fenômenos físicos da luz, a interferência luminosa, nesta unidade serão apresentadas as condições para a ocorrência da interferência da luz e o fenômeno em si. Nesta unidade é feito uma revisão sobre os conceitos de interferência de ondas, tomando como exemplo a interferência de onda em cordas. Também é feito um estudo matemático sobre a interferência luminosa em uma fenda dupla além ser apresentado ao leitor o experimento e resultados obtidos através do experimento de dupla fenda de Young.

Na terceira unidade é apresentado um outro fenômeno físico para a luz, a difração luminosa, nesta unidade é apresentado ao leitor o fenômeno da difração e as condições para a ocorrência dela. Nesta unidade também é feita uma revisão matemática sobre conceitos da difração da luz, onde através da análise do fenômeno observado é possível obter diversos resultados e ao final da unidade é apresentado uma situação onde a difração luminosa pode ser utilizada.

Por fim, na quarta e última unidade é apresentado ao leitor o fenômeno da polarização da luz. Para um melhor entendimento do fenômeno é feito uma revisão sobre os conceitos relacionados as características das ondas, são também analisados as situações e os tipos de polarização que é possível termos. Também é feito nesse capítulo uma abordagem matemática, através da Lei de Malus, onde será possível determinarmos a intensidade luminosa da luz transmitida através de lentes polarizadoras.

Um outro ponto importante de destacarmos é que da maneira como o produto foi elaborado ao final de cada uma das unidades o leitor irá encontrar sugestões de atividades práticas que poderá ser utilizada em sala de aula para apresentação dos assuntos relativos a cada uma das unidades. Durante a escolha e construção de cada uma das sugestões de experimentos, tomou-se o cuidado de selecionar experimentos que pudessem ser levados para sala de aula pelos professores e que não exigissem um alto investimento por parte deles. Desta forma, todas as experiências foram que serão apresentadas utilizam materiais de baixo custo e de fácil acesso de todos.

Por fim, todas as unidades contam com uma seção de exercícios propostos que podem ser utilizados e trabalhados pelo professor ao longo das aulas da maneira que ele achar necessário.

## **4.2 Estratégia de ensino**

Um dos campos que mais atraem a atenção dos pesquisadores na área de educação é aquele focado nos processos de melhoria de aprendizagem dos alunos. Buscando a melhoria nestes processos para o tema que o produto educacional se propõe, será apresentada uma sequência didática como método e estratégia de ensino que poderá ser adotada pelo professor como guia para uma melhor utilização do produto.

Embora não sejam tão novos, haja vista já serem partes integrantes dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), as sequências didáticas vêm ganhando recentemente um grande destaque devido à crescente quantidade de materiais produzidos utilizando como base essa estratégia de ensino. Por ser uma estratégia já amplamente difundida, viável e eficaz optou-se por escolher essa ferramenta como estratégia de ensino para o produto educacional.

### **4.2.1 Sequência didática**

Segundo Pais (2002, p. 102), “Uma sequência didática é formada por um certo número de aulas planejadas e analisadas previamente com a finalidade de observar situações de aprendizagem, envolvendo os conceitos previstos na pesquisa didática.” Desta forma, a SD que será apresentada a seguir tem como objetivo analisar e avaliar o alcance e a validade do produto educacional proposto. Ciente de que uma SD pode possuir um caráter onde a análise de sua aplicação em sala de aula depende diretamente dos interesses de quem a aplica e de que cada uma das turmas em que se está sendo um determinado projeto possui suas especificidades e diferenças, o professor, ao fazer uso da SD que será apresentada tem a total liberdade de adicionar, retirar ou alterar a SD de acordo com os seus critérios ou objetivos que deseja atingir com a utilização dele.

Como forma de tornar o produto educacional eficaz, capaz de entregar seu valor completo e possível de ser aplicado é necessário que a sequência seja trabalhada em sala de aula ao longo de sua aplicação. Para isso, durante sua construção alguns pontos devem ser observados. É importante que uma SD tenha clareza nos conteúdos que serão aprendidos e os problemas que ela pode resolver. Além disso, é importante também que analise as características cognitivas dos alunos e que seja construída em sincronia com os programas, horários e cronogramas da instituição em que ele está sendo estudado. Devido ao fato da quantidade de aulas de física semanais serem poucas frente a quantidade de conteúdos que devem ser ministrados optou-se por em forma de aulas complementar que poderiam ser ministradas em um total de 15 horas-aulas, cada uma destas com duração de aproximadamente 50 minutos, incluindo-se nestas aulas as avaliações programadas para cada unidade.

Durante a elaboração da SD foram adicionadas aulas destinada a realização de avaliações que tem a finalidade de observar as consequências da aplicação da SD no processo de ensino-aprendizagem em comparação ao modelo de ensino tradicional e ao final do programa uma aula de auto avaliação com intuito de observar se os objetivos propostos para o produto foram alcançados.

A seguir temos o modelo de sequência didática que poderá ser utilizada.

## **AULA 01 – APRESENTAÇÃO DO TEMA PARA OS ALUNOS**

**OBJETIVO:** Fomentar a curiosidade dos alunos e desejo pela busca da compreensão dos fenômenos físicos da ótica.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Na primeira unidade do trabalho é feita uma abordagem sobre os principais tópicos que serão estudados na Ótica Física. Nesta unidade, é importante que o professor reforce as diferenças encontradas entre a maneira que a luz é tratada e seus fenômenos são analisados segundo a Ótica Geométrica e a Ótica Física. Como sugestão, o professor poderia iniciar a unidade apresentando aos alunos a competição que perdurou muitos anos entre os cientistas que defendiam que a luz possuía um comportamento ondulatório, e os que acreditavam ter a luz um comportamento corpuscular. O professor poderá apresentar inicialmente algumas situações do nosso cotidiano onde ocorrem fenômenos inerentes a Ótica Física e partindo de a apresentação desse fenômeno questionar os alunos sobre o que eles acreditam estar acontecendo naquela situação

**DESENVOLVIMENTO:** Após a apresentação da unidade inicial do produto o professor poderá utilizar os vídeos complementares para ajudar a enriquecer e apresentar aos alunos as peculiaridades de cada um dos modelos defendidos e suas peculiaridades. Após isso, poderá ser aberta uma discussão coletiva onde os alunos poderão expressar suas opiniões sobre esse estranho comportamento para a luz.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos entendam que embora os cientistas tenham buscado explicações diferentes para o comportamento da luz (modelo corpuscular e modelo ondulatório) ambos os modelos são capazes de explicar o seu comportamento e que, dependendo da maneira como ela está sendo observada, se comportará de modo diferente.

**AVALIAÇÃO:** Será exigido aos alunos que ao final da aula elaboram um resumo sobre o tema da aula.

#### **Sugestão de vídeo complementar**

[https://www.youtube.com/watch?v=oSUHXeiaQ98&t=97s&ab\\_channel=UniversoNarrado](https://www.youtube.com/watch?v=oSUHXeiaQ98&t=97s&ab_channel=UniversoNarrado) – O que é a Luz: Onda ou Partícula?

[https://www.youtube.com/watch?v=J1yIApZtLos&ab\\_channel=TED-Ed](https://www.youtube.com/watch?v=J1yIApZtLos&ab_channel=TED-Ed) – A luz é uma partícula ou uma onda? – Colm Kelleher

## **AULA 02 – INTERFERÊNCIA LUMINOSA (CONCEITOS INICIAIS)**

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito de interferência luminosa e sobre os tipos de interferências possíveis de serem observados.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Na segunda unidade do trabalho será apresentado um dos fenômenos inerente à luz, o da interferência luminosa. Quando foi apresentado aos alunos os principais fenômenos da ondulatória, entre estes estava a interferência de ondas. Sendo a luz um exemplo de onda eletromagnética, a interferência é então um fenômeno que está de modo intimamente ligado à luz.

Eventualmente, pode ser interessante o professor antes de aprofundar esta unidade fazer uma revisão sobre os conceitos estudados na parte de ondulatória sobre a interferência de ondas na seção “INTERFERÊNCIA DE ONDAS”, onde são apresentados os tipos de interferência que uma onda está sujeita. Faz-se uma abordagem descritiva sobre cada um dos tipos de interferência possíveis e sobre as principais características que podem ser notadas em cada uma destas. Para auxiliar os alunos no entendimento dos conceitos relacionados aos tipos de interferência existentes, o professor pode utilizar o *link* de sugestão de experimento virtual que poderá ser realizado em sala. Quando não possível a apresentação do experimento virtual, o professor poderá demonstrá-lo utilizando uma corda e pedindo para que os próprios alunos participem.

**DESENVOLVIMENTO:** Após a apresentação da segunda unidade do produto o professor poderá usar os experimentos que foram utilizados em sala de aula como ponto

de partida para questionar os alunos sobre a relação entre aquele fenômeno e a que acontece com os raios luminosos ao se superporem. Seria interessante que o professor abrisse uma discussão coletiva onde os alunos poderão expressar sua opinião sobre esse o que aconteceria com os raios luminosos nesta situação.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos entendam que pelo fato da luz possuir um comportamento ondulatório, fenômenos inerentes às ondas podem ocorrer com a luz.

**AValiação:** Será exigido aos alunos que ao final da aula elaboram um resumo sobre o tema da aula.

**Sugestão de experimento virtual:** [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string) – Onda em Corda.

### **AULA 03 – INTERFERÊNCIA LUMINOSA (EXPERIMENTAÇÃO)**

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito de interferência luminosa e sobre as condições para ocorrência de interferência.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos deverão estar organizados em grupos para que possam discutir entre eles os experimentos observados.

**INTRODUÇÃO:** Na seção “CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DA INTERFERÊNCIA” é descrito quais são as condições que são necessárias para que seja possível observamos a interferência luminosa entre duas ou mais fontes luminosas. Embora em nosso dia-a-dia possamos observar inúmeros casos onde ocorrem o encontro de duas ou mais fontes luminosas em um mesmo ponto do espaço, nem sempre isso acaba resultando em um padrão de interferência.

É interessante que nesta seção o professor dê uma atenção maior ao tópico “COERÊNCIA DAS FONTES”, é de extremo valor que os alunos saibam a importância da coerência entre fontes; este fator é algo primordial para que seja possível observar a interferência luminosa. Para isto o professor pode explicar o processo de produção de luz em um bulbo de uma lâmpada e mostrar que embora lâmpadas diferentes sejam capazes de produzir luz, a maneira como ela é produzida por cada uma das fontes não é semelhante.

A seção “YOUNG E A EXPERIÊNCIA DA DUPLA FENDA” é a seção mais importante da unidade, sendo assim é importante que o professor dê uma atenção maior para ele. Um dos responsáveis por demonstrar que a luz possuía um comportamento ondulatório foi Thomas Young através do seu experimento da dupla fenda.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula, seria interessante que o professor a iniciasse apresentando aos alunos o experimento do Espelho de Lloyd da maneira descrita no produto e que os alunos fossem levados a discutir em seus grupos como poderia ser explicado o fenômeno observado e anotassem. Após, seria aberto uma discussão coletiva onde seria levantado pontos importantes das análises e das explicações propostas por eles. Com base em suas respostas o professor irá corrigindo aqueles que apresentem problemas conceituais e aperfeiçoando ideias que se assemelham ao que realmente está ocorrendo.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos compreendam quais são as condições necessárias para a ocorrência da interferência luminosa e que sejam capazes de identificar situações onde ela poderá acontecer, ou não.

**AValiação:** Os alunos serão analisados através das anotações e registros feitos ao longo da aula sobre o fenômeno observado.

#### **AULA 04 – INTERFERÊNCIA LUMINOSA (CONCEITUAL)**

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito de interferência luminosa e sobre as condições para ocorrência de interferência.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos deverão estar organizados em grupos para que possam discutir e ajudarem na resolução dos problemas propostos.

**INTRODUÇÃO:** Durante a seção de interferência luminosa é feita a descrição matemática das condições que são necessárias para a ocorrência da interferência construtiva e para a interferência destrutiva. Também é demonstrado como podemos calcular as distâncias entre cada uma das franjas (brilhantes e escuras) e suas relações com alguns parâmetros relacionados ao experimento: distância entre fendas, distância entre o anteparo e as fendas e a relação com o comprimento de onda da luz utilizada. Nesta aula será apresentada aos alunos como obter as equações necessárias para resolução de problemas envolvendo estes tópicos.

Para introduzir a seção seguinte o professor poderá realizar o experimento da bolha de sabão, ou da mancha de óleo e repetir os procedimentos realizados na aula anterior. A seção: “INTERFERÊNCIA DEVIDO A DIFERENÇA DE CAMINHOS ÓTICOS” é uma continuação da seção anterior, neste, serão apresentadas situações além da apresentada pelo experimento de Young, onde é possível serem observados padrões de interferência luminosa.

Em “MUDANÇA DE FASE EM UMA REFLEXÃO LUMINOSA”, descreve-se o motivo pelo qual em apenas algumas situações são possível observar fenômenos de interferência. É apresentada uma abordagem teórica e matemática para justificar a ocorrência do fenômeno e para que seja possível identificar as condições para a sua ocorrência.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula, serão apresentadas aos alunos as equações que podem ser utilizadas para solucionar questões sobre a interferência da luz. É importante que o professor forneça aos alunos tempo suficiente para que, em grupo, eles possam discutir e analisar as respostas encontradas para os problemas propostos da seção exercícios propostos, antes de iniciar a sua resolução e que durante a resolução estimule os alunos a participarem e colaborarem entre eles.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos compreendam as equações apresentadas para a interferência luminosa e que saibam como elas podem ser utilizadas. Além de compreenderem a mudança que a luz sofre após ser transmitida em um meio diferente daquele de origem.

**AValiação:** Os alunos podem ser analisados por meio das anotações e registros feitos ao longo da aula sobre o fenômeno observado e através da resolução dos exercícios propostos.

#### **AULA 05 – INTERFERÊNCIA LUMINOSA (EXERCÍCIOS)**

**OBJETIVO:** Exercitar os conhecimentos dos alunos sobre conceitos relacionados à interferência luminosa.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Como parte do processo de ensino-aprendizagem a realização de exercícios sejam eles teóricos, ou matemáticos, configura-se como uma ferramenta que poderá ser utilizado para analisar dificuldades e dúvidas que ficaram com relação ao tema apresentado.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula serão analisadas as dificuldades e erros conceituais dos alunos com relação ao assunto abordado. É interessante que o professor resolva os exercícios com os alunos, mas que antes solicite que os mesmos tentem buscar soluções ou respostas para aqueles problemas que foram propostos antes de resolvê-los.

**CONCLUSÃO:** É importante que o professor anote todas as dúvidas e dificuldades sobre aquele assunto para que possa ao final da sequência analisar o que pode ser melhorado e quais pontos devem ser continuados ou não.

**AValiação:** A avaliação será feita através da capacidade dos alunos de resolução de situações problemas e capacidade de analisar e explicar os fenômenos que estão ocorrendo.

#### **AULA 06 – INTERFERÊNCIA LUMINOSA (AValiação)**

**OBJETIVO:** Avaliar os conhecimentos dos alunos sobre conceitos relacionados à interferência luminosa.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Os processos avaliativos são partes importantes de um processo de ensino-aprendizagem, são através deles que os professores e alunos identificam os pontos fortes e fracos de um processo de ensino-aprendizagem, se os objetivos foram alcançados ou não.

**DESENVOLVIMENTO:** As atividades avaliadas devem ser desenvolvidas com base no acompanhamento realizado pelo professor da turma sobre o entendimento deles sobre aquele assunto e tipo de objetivos que se deseja alcançar.

**CONCLUSÃO:** Como parte integrante do processo de ensino-aprendizagem, as avaliações constituem parte importante do processo.

**AVALIAÇÃO:** Recomenda-se que seja realizado uma atividade formativa, através dela o processo de construção do conhecimento dos alunos poderá ser analisado.

## **AULA 07 – DIFRAÇÃO LUMINOSA (EXPERIMENTAL)**

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito da difração luminosa e as condições para que ela ocorra.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos deverão estar organizados em grupos para que possam discutir e ajudarem na resolução dos problemas propostos.

**INTRODUÇÃO:** Na terceira unidade do trabalho será apresentado mais um dos fenômenos inerentes à luz, o da difração luminosa. Assim como foi feito na unidade anterior, nesta primeira leitura deverá ser apresentado um pouco sobre as descobertas realizadas por Francesco Grimaldi ao observar um feixe de luz que adentrava uma sala por um pequeno orifício.

É importante que ao se apresentar esta unidade aos alunos o professor faça a distinção entre o fenômeno da interferência e da difração luminosa, que embora eles aparentem serem semelhantes cada um deles possui suas características.

A seção “DIFRAÇÃO OCORRIDA EM UMA FENDA ÚNICA” trata das condições necessárias para que a difração luminosa ocorra. Para facilitar o entendimento dos alunos é dado como sugestão para explicação do fenômeno o que ocorre com o som ao encontrar um obstáculo à sua frente. O professor pode utilizar situações do cotidiano do aluno para ilustrar a ocorrência do fenômeno. Caso o professor deseje uma explicação mais aprofundada sobre o tema pode ser interessante comentar sobre o Princípio de Huygens.

Em “PADRÃO DE DIFRAÇÃO EM UMA FENDA ÚNICA” são apresentados os padrões de difração que são obtidos ao fazer a luz passar por uma e por duas fendas. É possível notar através das imagens as diferenças que existem na largura das faixas para cada uma das situações.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula, seria interessante que o professor a iniciasse apresentando aos alunos o experimento da difração da luz em uma lâmina, ou da difração em um fio de cabelo da maneira descrita no produto e que os alunos fossem levados a discutir em seus grupos como poderia ser explicado o fenômeno observado e fizessem anotações. Após, seria aberto uma discussão coletiva onde seriam levantados pontos importantes das análises e das explicações propostos por eles. Com base em suas respostas o professor irá corrigindo aqueles que apresentem problemas conceituais e aperfeiçoando ideias que se assemelham ao que realmente está ocorrendo.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos compreendam quais são as condições necessárias para a ocorrência da difração luminosa e que sejam capazes de identificar situações onde ela poderá acontecer, ou não.

**AVALIAÇÃO:** Os alunos serem analisados através das anotações e registros feitos ao longo da aula sobre o fenômeno observado.

**Sugestão de vídeo complementar:**

[https://www.youtube.com/watch?v=DYYGFb36IvE&ab\\_channel=FisicaUniversit%C3%A1ria](https://www.youtube.com/watch?v=DYYGFb36IvE&ab_channel=FisicaUniversit%C3%A1ria) - Tema 13 - Fenômenos Associados a Propagação Ondulatória | Experimentos - Figuras de difração

**AULA 08 – DIFRAÇÃO LUMINOSA (CONCEITUAL)**

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito da difração da luminosa e condições.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos deverão estar organizados em grupos para que possam discutir e ajudarem na resolução dos problemas propostos.

**INTRODUÇÃO:** Nesta aula será feita uma descrição matemática de como podem ser encontradas as posições de cada uma das faixas em relação ao centro do anteparo e as distâncias entre franjas, além de como a intensidade do brilho de cada uma das faixas muda à medida que vamos nos distanciando do centro.

Nas seções “PADRÃO DE DIFRAÇÃO EM UMA FENDA DUPLA” e “PADRÃO DE DIFRAÇÃO EM UMA FENDA DUPLA” temos uma descrição de como a interferência de dupla fenda e a difração estão relacionadas umas com a outra. Ao observamos a ocorrência desses dois fenômenos somados temos o padrão que é apresentada pela imagem no início da unidade.

Por fim em “REDE DE DIFRAÇÃO” mostramos como a difração pode ser útil para análises ópticas e como a densidade de fendas afeta os padrões observados. Também é feita uma descrição matemática.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula, serão apresentadas aos alunos as equações que podem ser utilizadas para solucionar questões sobre a difração da luz. É importante que o professor forneça aos alunos tempo suficiente para que, em grupo, eles possam discutir e analisar as respostas encontradas para os problemas propostos da seção exercícios propostos, antes de iniciar a resolução delas e que durante a resolução estimule os alunos a participarem e colaborarem com a resolução. Caso o professor julgue interesse poderá apresentar aos alunos o experimento da rede de difração utilizando CD's e pedir para eles tentem reproduzi-lo.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos compreendam quais são as condições necessárias para a ocorrência da difração da luz e que sejam capazes de identificar situações onde ela poderá acontecer, ou não.

**AVALIAÇÃO:** Os alunos serão analisados por meio das anotações e registros feitos ao longo da aula sobre o fenômeno observado e através da resolução dos exercícios propostos.

## **AULA 09 – DIFRAÇÃO LUMINOSA (EXERCÍCIOS)**

**OBJETIVO:** Exercitar os conhecimentos dos alunos sobre conceitos relacionados a difração luminosa.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Como parte do processo de ensino-aprendizagem a realização de exercícios sejam eles teóricos, ou matemáticos, configura-se como uma ferramenta que poderá ser utilizado para analisar dificuldades e dúvidas que ficaram com relação ao tema apresentado.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula serão analisadas as dificuldades e os erros conceituais dos alunos com relação ao assunto abordado. É interessante que o professor resolva os exercícios com os alunos, mas que antes solicite que os mesmos tentem buscar soluções ou respostas para aqueles problemas que foram propostos antes de resolve-los.

**CONCLUSÃO:** É importante que o professor anote todas as dúvidas e dificuldades sobre aquele assunto para que possa ao final da sequência analisar o que pode ser melhorado e quais pontos devem ser continuados ou não.

**AValiação:** A avaliação será feita através da capacidade dos alunos de resolução de situações problemas e capacidade de analisar e explicar os fenômenos que estão ocorrendo.

## **AULA 10 – DIFRAÇÃO LUMINOSA (AValiação)**

**OBJETIVO:** Avaliar os conhecimentos dos alunos sobre conceitos relacionados a difração luminosa.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Os processos avaliativos são partes importantes de um processo de ensino-aprendizagem, são através deles que os professores e alunos identificam os pontos fortes e fracos de um processo de ensino-aprendizagem, se os objetivos foram alcançados ou não.

**DESENVOLVIMENTO:** As atividades avaliadas devem ser desenvolvidas com base no acompanhamento realizado pelo professor da turma sobre o entendimento deles sobre aquele assunto e tipo de objetivos que se deseja alcançar.

**CONCLUSÃO:** Como parte integrante do processo de ensino-aprendizagem, as avaliações constituem parte importante do processo.

**AValiação:** Recomenda-se que seja realizada uma atividade formativa, através dela o processo de construção do conhecimento dos alunos poderá ser analisado.

## AULA 11 – POLARIZAÇÃO (EXPERIMENTAL)

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito da polarização luminosa e condições de ocorrência.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos deverão estar organizados em grupos para que possam discutir e ajudarem na resolução dos problemas propostos.

**INTRODUÇÃO:** O quarto e último capítulo do trabalho é dedicado a analisar o fenômeno da polarização da luz. Para um melhor entendimento do fato é interessante ser feita uma revisão sobre as classificações e características das ondas. É importante que nessa unidade o aluno seja capaz de identificar as condições onde irão ocorrer ou não o fenômeno.

Em “POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO” é apresentado um dos casos onde podemos observar a polarização da luz. É explicado como a luz pode ser polarizada ao passar por um filtro, bem como as condições para que isso ocorra.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula, seria interessante que o professor a iniciasse apresentando aos alunos o experimento Lei de Malus e a Intensidade Luminosa da maneira descrita no Produto Educacional e que os alunos fossem levados a discutir em seus grupos como poderia ser explicado o fenômeno observado e fizessem anotações. Após, seria aberto uma discussão coletiva onde seriam levantados pontos importantes das análises e das explicações propostas por eles. Com base em suas respostas o professor irá corrigindo aqueles que apresentem problemas conceituais e aperfeiçoando ideias que se assemelham ao que realmente está ocorrendo.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos compreendam quais são as condições necessárias para a ocorrência da polarização da luz e que sejam capazes de identificar situações onde ela poderá acontecer, ou não.

**AValiação:** Os alunos serão analisados por meio das anotações e registros feitos ao longo da aula sobre o fenômeno observado e através da resolução dos exercícios propostos.

**Sugestão de vídeo complementar:**

[https://www.youtube.com/watch?v=hR\\_nnYuTi4&ab\\_channel=FisicaUniversit%C3%A1ria-Laborat%C3%B3rio+Virtual+|+%C3%93ptica+-+Polariza%C3%A7%C3%A3o+01](https://www.youtube.com/watch?v=hR_nnYuTi4&ab_channel=FisicaUniversit%C3%A1ria-Laborat%C3%B3rio+Virtual+|+%C3%93ptica+-+Polariza%C3%A7%C3%A3o+01)

## **AULA 12 – POLARIZAÇÃO (CONCEITUAL)**

**OBJETIVO:** Entendimento sobre o conceito da polarização luminosa e condições.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos deverão estar organizados em grupos para que possam discutir e ajudarem na resolução dos problemas propostos.

**INTRODUÇÃO:** Nesta aula será feita uma análise matemática sobre a intensidade luminosa que é transmitida pela lente, onde é possível constatar que está depende diretamente dos ângulos entre os planos polarizados dos filtros.

Na seção “POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO” é feita uma descrição de uma outra situação onde a luz pode ser polarizada. Existe uma situação bem específica na reflexão da luz, quanto há o chamado ângulo de Brewster, que faz com que o raio luminoso que foi refletido seja polarizado em relação ao raio incidente.

A unidade mostra também algumas situações onde podemos notar a polarização de uma onda luminosa já polarizada. Como a onda refletida é uma onda polarizada, ao utilizarmos um filtro polarizador ele acabará eliminando os raios que foram refletidos naquela superfície, deixando assim a imagem mais confortável.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula, serão apresentadas aos alunos as equações que podem ser utilizadas para solucionar questões sobre a polarização da luz. É importante que o professor forneça aos alunos tempo suficiente para que, em grupos, eles possam discutir e analisar as respostas encontradas para os problemas propostos da seção exercícios propostos, antes de iniciar a sua resolução e que durante a resolução estimule os alunos a participarem e colaborarem entre si. Caso o professor julgue interessante poderá apresentar aos alunos situações onde podemos ter luz polarizada por reflexão.

**CONCLUSÃO:** É importante que os alunos compreendam quais são as condições necessárias para a ocorrência da polarização da luz e que sejam capazes de identificar situações onde ela poderá acontecer, ou não.

**AVALIAÇÃO:** Os alunos serão analisados por meio das anotações e registros feitos ao longo da aula sobre o fenômeno observado e através da resolução dos exercícios propostos.

### **AULA 13 – POLARIZAÇÃO (EXERCÍCIOS)**

**OBJETIVO:** Exercitar os conhecimentos dos alunos sobre conceitos relacionados a polarização luminosa.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Como parte do processo de ensino-aprendizagem a realização de exercícios sejam eles teóricos, ou matemáticos configura-se como uma ferramenta que poderá ser utilizada para analisar dificuldades e dúvidas que ficaram com relação ao tema apresentado.

**DESENVOLVIMENTO:** Nesta aula serão analisadas as dificuldades e erros conceituais dos alunos com relação ao assunto abordado. É interessante que o professor resolva os exercícios com os alunos, mas que antes solicite que os mesmos tentem buscar soluções ou respostas para aqueles problemas que foram propostos antes de resolve-los.

**CONCLUSÃO:** É importante que o professor anote todas as dúvidas e dificuldades sobre aquele assunto para que possa ao final da sequência analisar o que pode ser melhorado e quais pontos devem ser continuados ou não.

**AVALIAÇÃO:** A avaliação será feita através da capacidade dos alunos de resolução de situações problemas e capacidade de analisar e explicar os fenômenos que estão ocorrendo.

#### **AULA 14 – POLARIZAÇÃO (AVALIAÇÃO)**

**OBJETIVO:** Avaliar os conhecimentos dos alunos sobre conceitos relacionados à polarização luminosa.

**ORGANIZAÇÃO DA TURMA:** Os alunos poderão estarem organizados em grupos ou da maneira que o professor preferir.

**INTRODUÇÃO:** Os processos avaliativos são partes importantes de um processo de ensino-aprendizagem, são através deles que os professores e alunos identificam os pontos fortes e fracos de um processo de ensino-aprendizagem, se os objetivos foram alcançados ou não.

**DESENVOLVIMENTO:** As atividades avaliadas devem ser desenvolvidas com base no acompanhamento realizado pelo professor da turma sobre o entendimento deles sobre aquele assunto e tipo de objetivos que se deseja alcançar.

**CONCLUSÃO:** Como parte integrante do processo de ensino-aprendizagem, as avaliações constituem parte importante do processo.

**AVALIAÇÃO:** Recomenda-se que seja realizado uma atividade formativa, através dela o processo de construção do conhecimento dos alunos poderá ser analisado.

## **AULA 15 – AUTO-AVALIAÇÃO**

Nesta aula será realizada uma avaliação por parte dos alunos sobre as contribuições que foram dadas ao ensino de física através da aplicação do produto educacional. A avaliação será realizada através de um questionário contendo respostas subjetivas e contando com a opinião dos discentes.

### **4.3 Sugestões de experimentos**

Ao longo das unidades é possível encontrar as seções “SUGESTÕES DE EXPERIMENTOS”, elas fazem parte de cada uma das unidades e funcionam como um complemento a abordagem teórica que é feito sobre os assuntos estudados. Como foi mencionado na fundamentação teórica das teorias da aprendizagem.

Uma das maneiras que temos de estimular os processos de aprendizagem é através da experimentação. Experimentos são ferramentas que podem ser utilizadas para desenvolver habilidades importantes para o aluno como a capacidade de observar os fenômenos ao seu redor, os identificar, escolher, formular e testar as hipóteses para explicar aquele fato bem como diversos outros. Dessa maneira, cada uma unidade apresenta um roteiro de prática que pode ser utilizado pelo professor para enriquecer e

trazer fenômenos naturais para a sala de aula deixando as aulas mais interessantes e enriquecedoras para os alunos.

Durante a elaboração dos experimentos tomou-se o cuidado para que fossem oferecidos aos professores práticas que pudessem ser de fácil acesso, assim, as práticas fazem uso de matérias de baixo custo (pedaços de vidro, fios de cabelo, CD, laser). Optou-se por utilizar este tipo de matérias por saber que em muitas das escolas não temos a disposição dos professores um laboratório que possibilite a realização destes tipos de práticas e os elevados custos para a aquisição de experimentos.

Os experimentos propostos em cada uma das unidades têm como objetivo sugerir atividade que podem ser utilizadas em sala de aula ou em laboratórios. Tendo elas a abrangência de meras demonstrações ou constatação de leis e fenômenos, até atividades que possuam um teor mais investigativo onde o aluno é estimulado a fazer observações, escolher, testar e formular hipóteses para aquele fenômeno.

#### **4.3.1 O Espelho de Lloyd**

Elaborado por Humprey Lloyd esse experimento tem como objetivo representar de maneira simplificada os padrões de interferência luminosa obtido para a luz. É interessante destacar que diferente do experimento de Thomas Young (Dupla fenda), não são necessárias duas fontes luminosas, ou uma fenda dupla para a formação dos padrões de interferência, pois uma das ondas luminosas toma um caminho direto e outra por reflexão toma outro caminho de maneira a se encontrarem um ponto e produzirem ali um padrão de interferência.

Figura 1: Representação do experimento apresentado por Lloyd com fonte virtual.

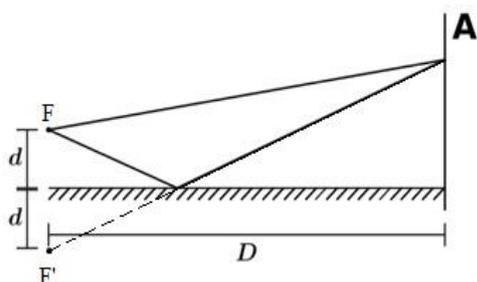


Figura 2: Padrão de interferência luminosa obtida através do vidro transparente.



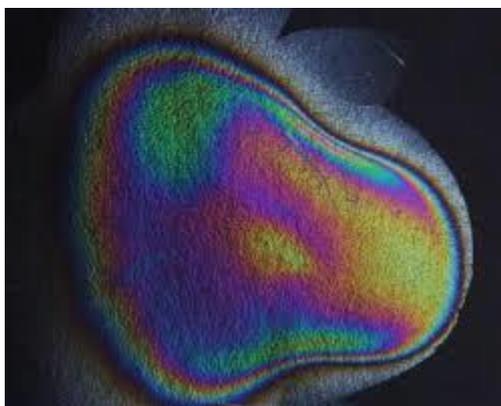
Fonte: Autor

Fonte:  
<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v34n4/a10v34n4.pdf> -  
 Adaptado

### 4.3.2 Interferência em Películas Delgadas

Padrões de interferência luminosa também são possíveis de serem observados em locais inesperados, dada uma superfície, que sobre ela tenha uma película extremamente fina, a depender de sua espessura pode ser que um padrão de interferência semelhante ao apresentado nesse experimento possa ser observado.

Figura 3: Padrões de interferência formado em manchas de óleo.



Fonte: [https://hu.m.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Interferencia\\_lakkretegen2.jpg](https://hu.m.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Interferencia_lakkretegen2.jpg)

### 4.3.3 Difração da luz em uma lâmina

A difração sofrida pela luz pode ser demonstrada caso façamos ela através um obstáculo que tenha dimensões próximas do seu comprimento de onda. Com o auxílio de uma lamina coberta por tinta escura, para dificultar a passagem da luz, ao fazermos uma pequena fenda e fazer a luz passar por ela é possível observamos a formação de padrões

de difração da luz. Vale destacar que, se forem feitas duas fendas, uma ao lado da outra, praticamente superpostas, iremos obter um padrão de interferência luminosa.

Figura 4: Lâmina de vidro com uma e duas fendas.



Fonte: Autor

#### 4.3.4 Difração em fio de cabelo

Uma maneira análoga de demonstrarmos a difração sofrida pela luz ao passar por uma fenda é utilizando um fio de cabelo. É possível notar que ao fazer incidir sobre um fio de cabelo totalmente tracionado um feixe de um laser, haverá a formação de um padrão de difração luminosa como o observado em uma fenda de uma lâmina.

Figura 5: Padrão de difração obtido pelo experimento.



Fonte: Autor

#### 4.3.5 Rede de difração utilizando CD's

Possuindo importância fundamental para a realização de análises ópticas, as redes de difração ao serem atravessadas por luz branca acaba por produzir um efeito bastante

interessante da difração luminosa. Esse efeito é observado quando a luz branca atravessa a uma das faces que compõem um CD, ou de um DVD.

Figura 6: Padrão de difração obtida através do experimento.



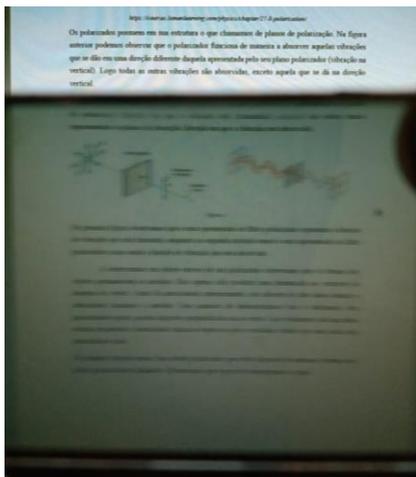
Fonte: Autor

#### 4.3.6 Lei de Malus e a Intensidade Luminosa

Uma das principais características da polarização da luz é uma diminuição na intensidade da luz transmitida através do meio polarizador. Essa intensidade de luz que é transmitida pelo meio pode ser calculada através da Lei de Malus e verificada experimentalmente através do experimento apresentado.

Figura 7: Imagem vista através de um filtro polarizador.

Figura 8: Imagem vista através de um filtro polarizador girado 90°.



Fonte: Autor

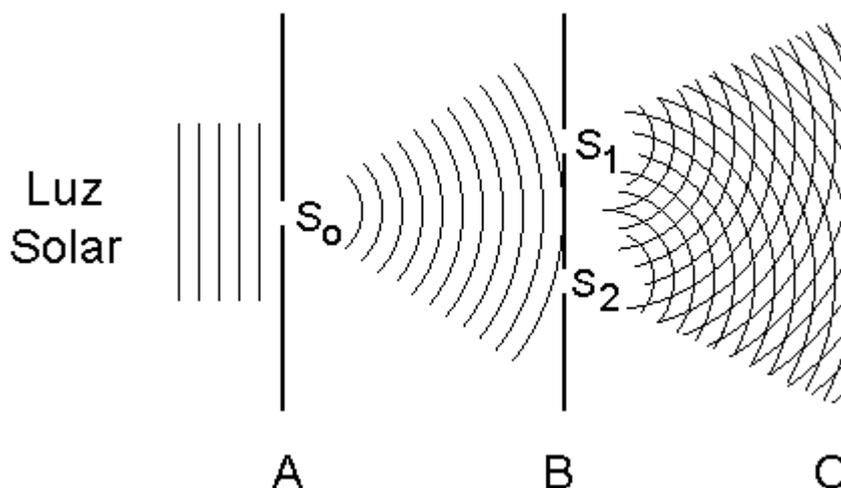


## 4.4 Exercícios propostos

Assim como cada todas as unidades contam com sugestões de experimentos, ao final de cada uma delas temos também a seção de exercícios propostos. Nestas seções são sugeridos exercícios para uma melhor fixação dos conteúdos abordados. Durante a escolha dos exercícios tomou-se o cuidado de separa-los de modo a selecionar aqueles que tanto fazem uma abordagem mais teórica, como aqueles que exigem um domínio matemático sobre os conteúdos que foram abordados.

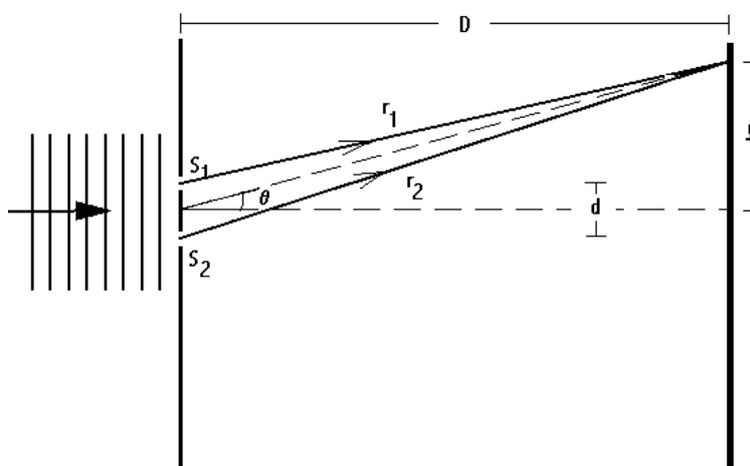
### 4.4.1 Exercícios propostos de interferência luminosa

1. Na experiência de fenda dupla, de Young, usando, em laboratório, uma fonte de luz monocromática, por que o anteparo A na figura abaixo é necessário?



2. Se a fonte de luz é um feixe de laser, não necessitamos do equivalente da tela A da figura acima. Por quê?

3. Cobrindo-se uma das fendas da figura abaixo, que alteração resultará na intensidade luminosa do centro do anteparo?



5. Somos banhados continuamente pela radiação eletromagnética proveniente do Sol, dos sinais de rádio e TV, das estrelas e de outros corpos celestes. Por que estas ondas não interferem umas nas outras?

6. Por que uma película (bolha de sabão, mancha de óleo, etc.) tem que ser "delgada" para que apresente efeitos de interferência? Será que ela precisa mesmo ser delgada? O que significa delgada?

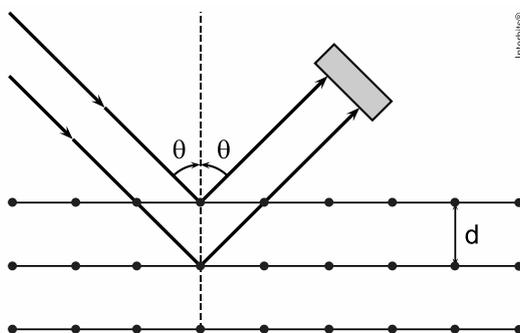
7. Janelas comuns de armazéns e residências refletem a luz vinda de suas superfícies planas interior e exterior. Por que então não vemos efeitos de interferência?

8. Um automóvel dirige a luz de seus faróis para o lado de um celeiro. Por que não se produzem franjas de interferência na região onde a luz proveniente dos dois feixes se combinam?

9. Uma película de água e sabão sustentada por uma espira de arame no ar parece escura em sua parte mais fina quando vista pela luz refletida. Por outro lado, uma fina camada de óleo flutuando na água parece clara em sua parte mais fina quando vista, da mesma forma, de cima, no ar. Explique estes fenômenos.

10. A experiência de Young é executada com luz azul-esverdeada de comprimento de onda 500 nm. A distância entre as fendas é 1,20 mm e a tela de observação está a 5,40 m das fendas. Qual é o espaçamento entre as franjas claras?

11. Com um certo material, cujas camadas atômicas interdistam de uma distância  $d$ , interage um feixe de radiação que é detectado em um ângulo  $\theta$  conforme a figura. Tal experimento é realizado em duas situações: (I) o feixe é de raios X monocromáticos, com sua intensidade de radiação medida por um detector, resultando numa distribuição de intensidade em função de  $\theta$ , com valor máximo para  $\theta = \alpha$ , e (II) o feixe é composto por elétrons monoenergéticos, com a contagem do número de elétrons por segundo para cada ângulo medido, resultando no seu valor máximo para  $\theta = \beta$ . Assinale a opção com possíveis mudanças que implicam a alteração simultânea dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  medidos.



a) Aumenta-se a intensidade do feixe de raio X e diminui-se a velocidade dos elétrons.

- b) Aumenta-se a frequência dos raios X e triplica-se o número de elétrons no feixe.
- c) Aumentam-se o comprimento de onda dos raios X e a energia cinética dos elétrons.
- d) Dobram-se a distância entre camadas  $d$  (pela escolha de outro material) e o comprimento de onda dos raios X. Além disso, diminui-se a velocidade dos elétrons pela metade.
- e) Diminui-se a intensidade dos raios X e aumenta-se a energia dos elétrons.

12. A figura I, abaixo, representa esquematicamente o experimento de Young. A luz emitida pela fonte  $F$ , ao passar por dois orifícios, dá origem a duas fontes de luz  $F_1$  e  $F_2$ , idênticas, produzindo um padrão de interferência no anteparo  $A$ . São franjas de interferência, compostas de faixas claras e escuras, decorrentes da superposição de ondas que chegam no anteparo.

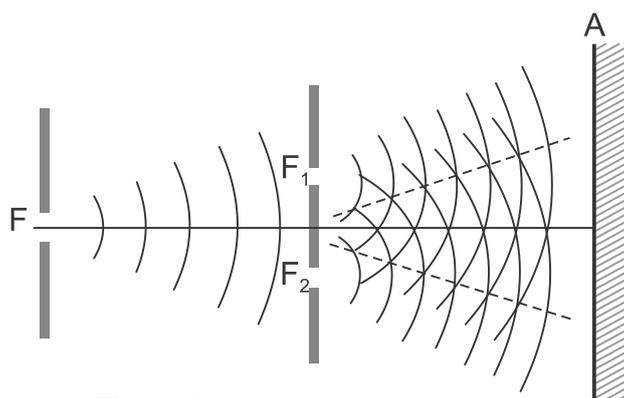


Figura I

A figura II, abaixo, representa dois raios de luz que atingem o anteparo no ponto  $P$ . A onda oriunda do orifício  $F_1$  percorre uma distância maior que a onda proveniente do orifício  $F_2$ . A diferença entre as duas distâncias é  $\Delta L$ .

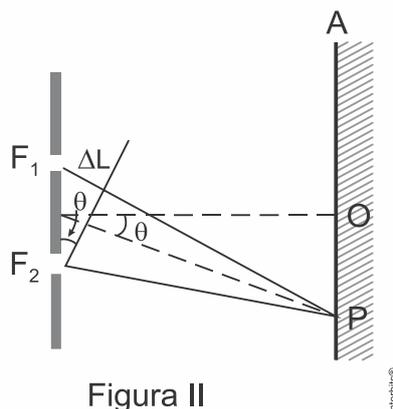


Figura II

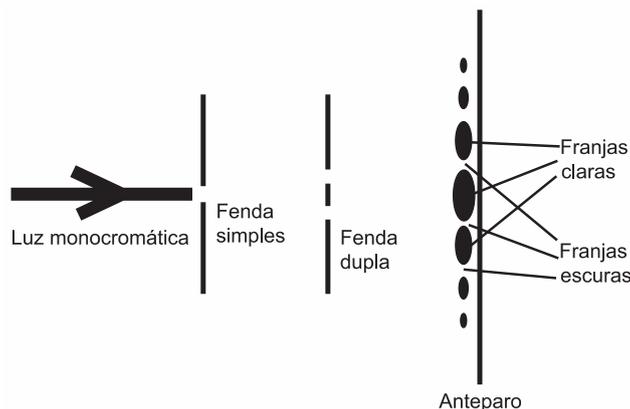
Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do enunciado abaixo, na ordem em que aparecem.

Se, no ponto P, há uma franja escura, a diferença  $\Delta L$  deve ser igual a um número \_\_\_\_\_ de comprimentos de onda.

No ponto central O, forma-se uma franja \_\_\_\_\_ decorrente da interferência \_\_\_\_\_ das ondas.

- a) inteiro – escura – destrutiva
- b) inteiro – escura – construtiva
- c) inteiro – clara – construtiva
- d) semi-inteiro – escura – destrutiva
- e) semi-inteiro – clara – construtiva

13. O debate a respeito da natureza da luz perdurou por séculos, oscilando entre a teoria corpuscular e a teoria ondulatória. No início do século XIX, Thomas Young, com a finalidade de auxiliar na discussão, realizou o experimento apresentado de forma simplificada na figura. Nele, um feixe de luz monocromático passa por dois anteparos com fendas muito pequenas. No primeiro anteparo há uma fenda e no segundo, duas fendas. Após passar pelo segundo conjunto de fendas, a luz forma um padrão com franjas claras e escuras.



SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n. 1, 2007 (adaptado).

Com esse experimento, Young forneceu fortes argumentos para uma interpretação a respeito da natureza da luz, baseada em uma teoria

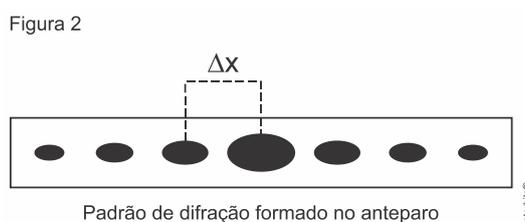
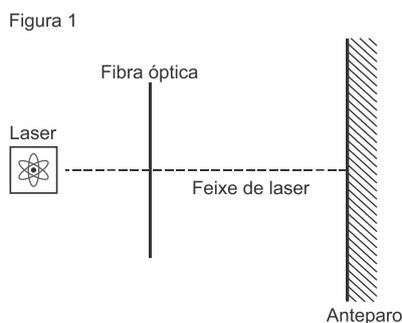
- a) corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e refração.
- b) corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e reflexão.
- c) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e polarização.
- d) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer interferência e reflexão.
- e) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e interferência.

14. *As fibras ópticas são feitas de vidro óptico extremamente puro. Costumamos achar que uma janela de vidro é transparente. Entretanto, quanto mais espesso for o vidro, menos transparente ele será em razão das impurezas nele contidas. O vidro de uma fibra óptica possui, porém, menos impurezas que o vidro usado em janelas. Segue a descrição da qualidade do vidro produzido por uma companhia: se você estivesse sobre um oceano feito de quilômetros de núcleo sólido de fibra de vidro, poderia ver claramente o fundo. Fazer fibras ópticas requer as seguintes etapas: elaborar um cilindro de vidro pré-formado; estirar as fibras a partir da pré-forma; e testar as fibras.*

Fonte: <http://tecnologia.hsw.uol.com.br/fibras-opticas5.htm>, acessado em: 14 de julho de 2016.

Durante a fase de estiramento das fibras, é necessário haver um controle da espessura dos fios de fibra óptica fabricados. Para isso, suponha que uma montagem experimental é

configurada, utilizando-se um laser com comprimento de onda de 650 nm que incide sobre o fio de fibra óptica, com um revestimento opaco, conforme ilustra a Figura 1. Após passar pelo fio, o feixe de laser forma um padrão de difração em um anteparo instalado a 2,0 m de distância do fio. A representação esquemática desse padrão está mostrada na Figura 2.

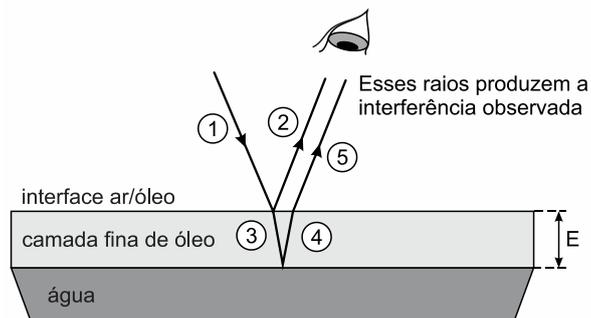


Sabendo-se que a separação entre os máximos de intensidade luminosa,  $\Delta x$ , é 1,0 cm, qual é o valor do diâmetro do fio?

- a) 65  $\mu\text{m}$
- b) 130  $\mu\text{m}$
- c) 260  $\mu\text{m}$
- d) 390  $\mu\text{m}$
- e) 520  $\mu\text{m}$

15. Certos tipos de superfícies na natureza podem refletir luz de forma a gerar um efeito de arco-íris. Essa característica é conhecida como iridescência e ocorre por causa do fenômeno da interferência de película fina. A figura ilustra o esquema de uma fina camada iridescente de óleo sobre uma poça d'água. Parte do feixe de luz branca incidente (1) reflete na interface ar/óleo e sofre inversão de fase (2), o que equivale a uma mudança de meio comprimento de onda. A parte refratada do feixe (3) incide na interface óleo/água e

sofre reflexão sem inversão de fase (4). O observador indicado enxergará aquela região do filme com coloração equivalente à do comprimento de onda que sofre interferência completamente construtiva entre os raios (2) e (5), mas essa condição só é possível para uma espessura mínima da película. Considere que o caminho percorrido em (3) e (4) corresponde ao dobro da espessura  $E$  da película de óleo.



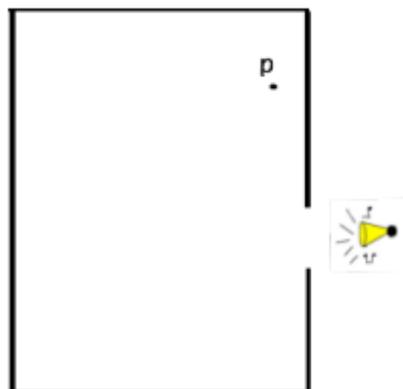
Disponível em: <http://2011.igem.org>. Acesso em: 18 nov. 2014 (adaptado).

Expressa em termos do comprimento de onda ( $\lambda$ ), a espessura mínima é igual a

- a)  $\frac{\lambda}{4}$ .
- b)  $\frac{\lambda}{2}$ .
- c)  $\frac{3\lambda}{4}$ .
- d)  $\lambda$ .
- e)  $2\lambda$ .

### 5.3.2 Exercícios propostos de difração luminosa

1. É possível ouvir sons atrás de um canto de parede, como mostrado na figura, porém não é possível ver atrás do canto. Como você pode explicar essa afirmação?



2. Um fio de cabelo é colocado entre duas lâminas de vidro planas, com 8 cm de comprimento. Essa montagem é iluminada por luz de comprimento de onda 600 nm e contam-se 121 franjas escuras, contadas a partir do ponto de contato entre as lâminas. Qual o diâmetro do fio de cabelo?

3. Uma fenda de largura  $a$  é iluminada com luz branca.

a) Para que valor de  $a$  o primeiro mínimo para a luz vermelha, com  $\lambda = 650$  nm, aparece em  $\theta = 15^\circ$ ?

b) Qual é o comprimento de onda  $\lambda'$  da luz cujo primeiro máximo secundário está em  $15^\circ$ , coincidindo assim com o primeiro mínimo para a luz vermelha?

4. Está sendo realizado um experimento de difração por uma fenda usando uma luz de comprimento de onda  $\lambda$ . O que aparece, em uma tela distante, em um ponto no qual a diferença entre as distâncias percorridas por raios que deixam as extremidades superior e inferior da fenda é igual a

a)  $5\lambda$

b)  $4,5\lambda$

5. A distância entre o primeiro e o quinto mínimo da figura a de difração de uma fenda é 0,35 mm com a tela a 40 cm de distância da fenda quando é usada uma luz com um comprimento de onda de 550 nm.

a) Determine a largura da fenda.

b) Calcule o ângulo  $\theta$  do primeiro mínimo de difração.

6. Um papel com um pequeno orifício é colocado no trajeto de um feixe de *laser*. O resultado que se observa no anteparo sobre o qual a luz incide após passar pelo orifício mostra um padrão de máximos e mínimos de intensidade luminosa. O fenômeno responsável por esse padrão é chamado de

- a) refração.
- b) difração.
- c) dispersão.
- d) interferência.
- e) reflexão.

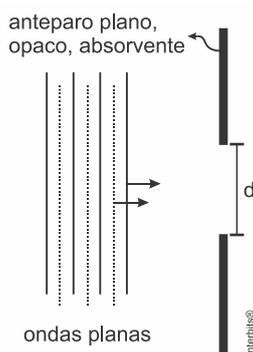
7. Considere as afirmações abaixo, sobre o fenômeno da difração.

- I. A difração é um fenômeno ondulatório que ocorre apenas com ondas sonoras.
- II. A difração que ocorre quando uma onda atravessa uma fenda é tanto mais acentuada quanto menor for a largura da fenda.
- III. A difração que ocorre quando uma onda atravessa uma fenda é tanto mais acentuada quanto maior for o comprimento de onda da onda.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas I e III.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

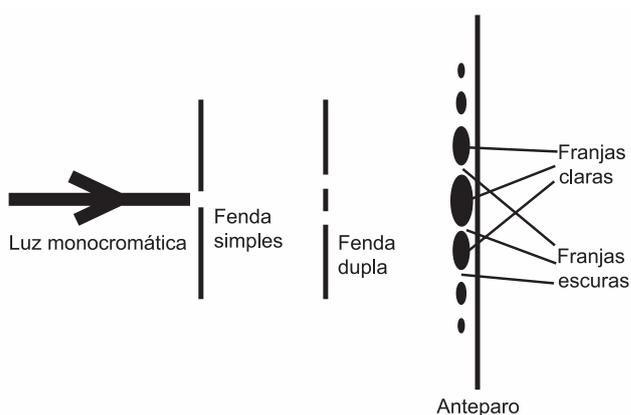
8. Analise a figura abaixo.



Considere duas ondas planas, uma de luz visível e outra de som audível, oscilando com comprimentos de onda iguais a  $\lambda_L = 10^{-4}$  cm e  $\lambda_S = 1,7$  cm, respectivamente. No mesmo instante, ambas incidem perpendicularmente sobre um mesmo lado do anteparo plano, opaco e bom absorvente acústico mostrado na figura acima. Atravessando o orifício circular de diâmetro  $d$  pode-se afirmar que, na região do outro lado do anteparo:

- apenas a onda sonora pode ser detectada se  $d \ll 1,7$  cm, devido à difração.
- apenas a onda luminosa pode ser detectada se  $d \ll 1,7$  cm, devido à refração.
- a propagação das duas ondas é aproximadamente retilínea se  $d \gg 1,7$  cm.
- a propagação das duas ondas é aproximadamente esférica se  $d \gg 1,7$  cm.
- nenhuma das ondas pode ser plana.

9. O debate a respeito da natureza da luz perdurou por séculos, oscilando entre a teoria corpuscular e a teoria ondulatória. No início do século XIX, Thomas Young, com a finalidade de auxiliar na discussão, realizou o experimento apresentado de forma simplificada na figura. Nele, um feixe de luz monocromática passa por dois anteparos com fendas muito pequenas. No primeiro anteparo há uma fenda e no segundo, duas fendas. Após passar pelo segundo conjunto de fendas, a luz forma um padrão com franjas claras e escuras.



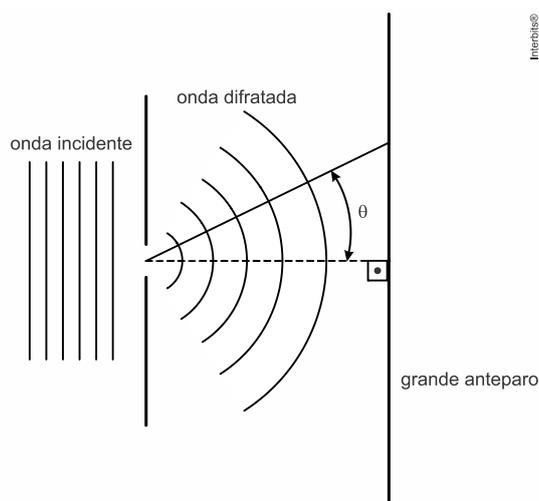
SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n. 1, 2007 (adaptado).

Com esse experimento, Young forneceu fortes argumentos para uma interpretação a respeito da natureza da luz, baseada em uma teoria

- corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e refração.

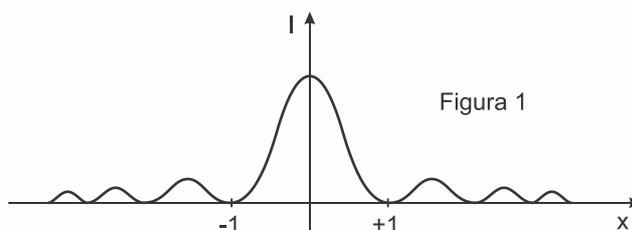
- b) corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e reflexão.  
 c) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e polarização.  
 d) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer interferência e reflexão.  
 e) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e interferência.

10.



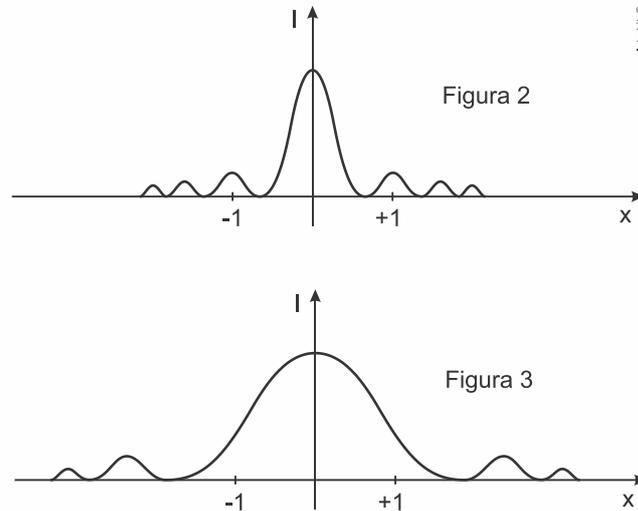
Uma fenda é iluminada com luz monocromática cujo comprimento de onda é igual a 510 nm. Em um grande anteparo, capaz de refletir toda a luz que atravessa a fenda, são observados apenas cinco mínimos de intensidade de cada lado do máximo central. Sabendo que um dos mínimos encontra-se em  $\theta$ , tal que  $\sin(\theta) = \frac{3}{4}$  e  $\cos(\theta) = \frac{\sqrt{7}}{4}$ , determine a largura da fenda.

11. Uma figura de difração é obtida em um experimento de difração por fenda simples quando luz monocromática de comprimento de onda  $\lambda_1$  passa por uma fenda de largura  $d_1$ . O gráfico da intensidade luminosa  $I$  em função da posição  $x$  ao longo do anteparo onde essa figura de difração é projetada, está apresentado na figura 1 abaixo.



Alterando-se neste experimento apenas o comprimento de onda da luz monocromática para um

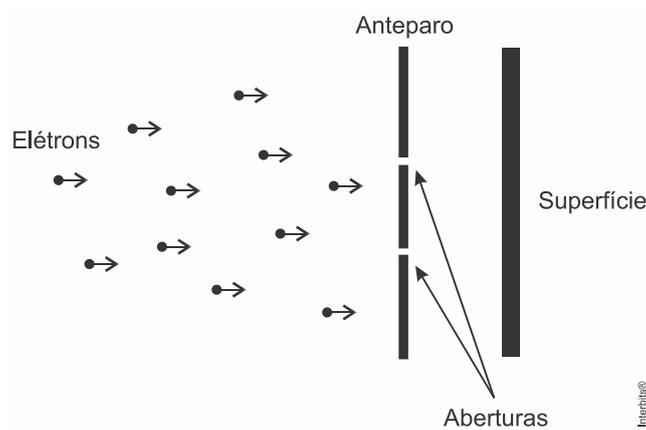
valor  $\lambda_2$ , obtém-se o gráfico apresentado na figura 2. E alterando-se apenas o valor da largura da fenda para um valor  $d_2$ , obtém-se o gráfico da figura 3.



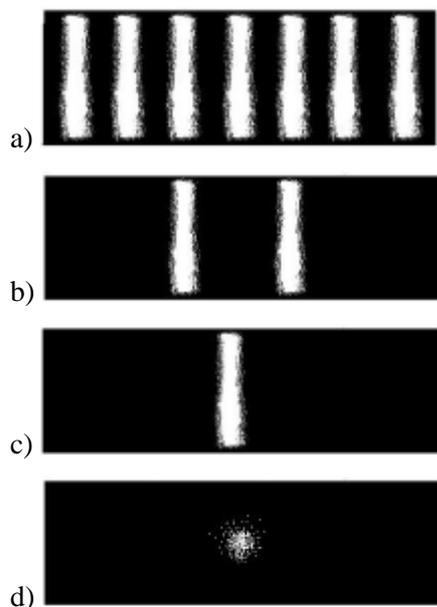
Nessas condições, é correto afirmar que

- a)  $\lambda_2 > \lambda_1$  e  $d_2 > d_1$
- b)  $\lambda_2 > \lambda_1$  e  $d_2 < d_1$
- c)  $\lambda_2 < \lambda_1$  e  $d_2 > d_1$
- d)  $\lambda_2 < \lambda_1$  e  $d_2 < d_1$

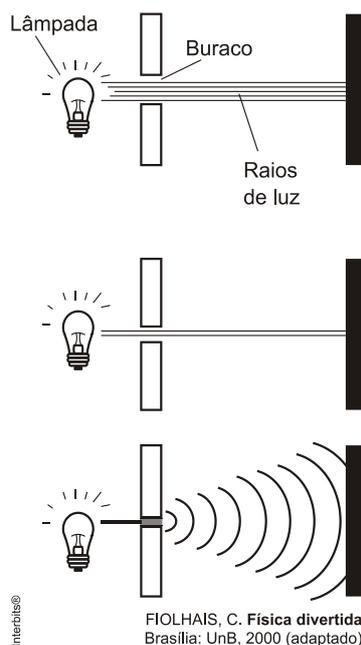
12. Um feixe de elétrons incide sobre uma superfície, demarcando os lugares onde a atinge. Todavia, há um anteparo com duas aberturas entre a fonte emissora de elétrons e a superfície, conforme representa o esquema a seguir.



Atualmente, sabe-se que a radiação tem um comportamento dual, ou seja, ora se assemelha a partículas, ora a ondas. Considerando que o diâmetro das aberturas é muito menor do que o comprimento de onda radiação incidente, que tipo de resultado será demarcado na superfície, levando em conta o comportamento ondulatório do feixe de elétrons?



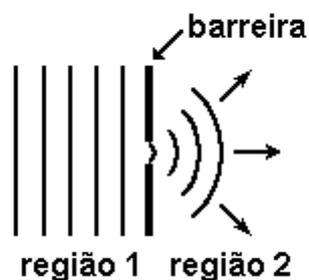
13. Ao diminuir o tamanho de um orifício atravessado por um feixe de luz, passa menos luz por intervalo de tempo, e próximo da situação de completo fechamento do orifício, verifica-se que a luz apresenta um comportamento como o ilustrado nas figuras. Sabe-se que o som, dentro de suas particularidades, também pode se comportar dessa forma.



Em qual das situações a seguir está representado o fenômeno descrito no texto?

- a) Ao se esconder atrás de um muro, um menino ouve a conversa de seus colegas.
- b) Ao gritar diante de um desfiladeiro, uma pessoa ouve a repetição do seu próprio grito.
- c) Ao encostar o ouvido no chão, um homem percebe o som de uma locomotiva antes de ouvi-lo pelo ar.
- d) Ao ouvir uma ambulância se aproximando, uma pessoa percebe o som mais agudo do que quando aquela se afasta.
- e) Ao emitir uma nota musical muito aguda, uma cantora de ópera faz com que uma taça de cristal se despedace.

14. A figura representa esquematicamente as frentes de onda de uma onda reta na superfície da água, propagando-se da região 1 para a região 2. Essas regiões são idênticas e separadas por uma barreira com abertura.

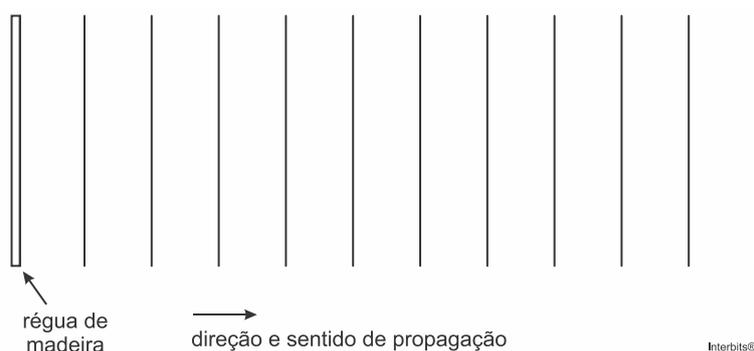


A configuração das frentes de onda observada na região 2, que mostra o que aconteceu com a onda incidente ao passar pela abertura, caracteriza o fenômeno da

- a) absorção.
- b) difração.
- c) dispersão.
- d) polarização.
- e) refração.

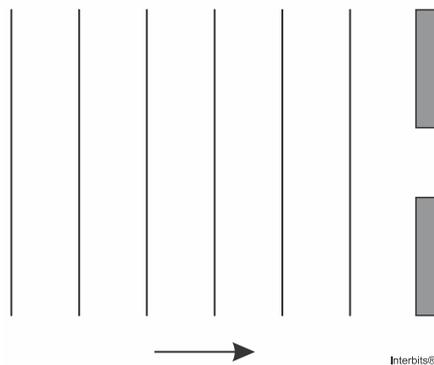
TEXTO PARA A PRÓXIMA QUESTÃO:

Para se estudar as propriedades das ondas num tanque de água, faz-se uma régua de madeira vibrar regularmente, tocando a superfície da água e produzindo uma série de cristas e vales que se deslocam da esquerda para a direita.



Retirando-se uma certa quantidade de água do tanque, a velocidade das ondas torna-se menor.

15. Observe a figura.



Nessa figura, estão esquematizadas duas barreiras verticais separadas por uma distância aproximadamente igual ao comprimento de onda das ondas.

Após passas pela abertura, a onda apresenta modificação

- a) em sua forma e em seu comprimento de onda.
- b) em sua forma e em sua velocidade.
- c) em sua velocidade e em seu comprimento de onda.
- d) somente em sua forma.
- e) somente em sua velocidade.

### 5.3.3 Exercícios propostos de polarização da luz

1. Ondas eletromagnéticas são criadas a partir da oscilação de campos elétricos e magnéticos. Uma fonte luminosa, como o sol ou uma lâmpada, emite luz (onda eletromagnética) que oscila em várias direções. O fenômeno conhecido como polarização da luz acontece quando a onda eletromagnética oscila somente em uma direção. Os filtros polaroides são materiais que permitem a passagem da luz em apenas um plano de oscilação e a luz que passa por eles é chamada de luz polarizada.

Com base nessas informações, responda aos itens a seguir.

- a) Considere que uma loja esteja com um anúncio de óculos com lentes polarizadoras, ou seja, óculos com filtros polaroides.

Descreva de que forma, ali mesmo na loja, ou seja, mesmo sem recursos técnicos, seria possível

comprovar se os óculos do anúncio realmente possuem filtros polaroides.

Observação: um esquema pode ajudar a justificar sua resposta.

b) Uma forma de determinar a intensidade luminosa de uma fonte é dividindo a sua potência pela área iluminada:

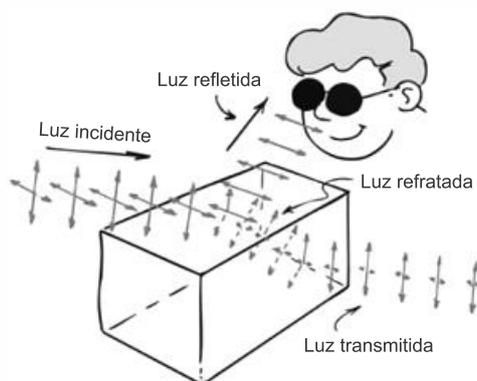
$$I = \frac{P}{A}$$

Considere uma lâmpada emitindo ondas eletromagnéticas esféricas em todas as direções, com potência total de 48 W.

Determine a intensidade luminosa a uma distância de 2 m da lâmpada. Utilize  $\pi = 3$ .

2. Leia o texto e responda à questão a seguir.

### Lentes Polarizadas



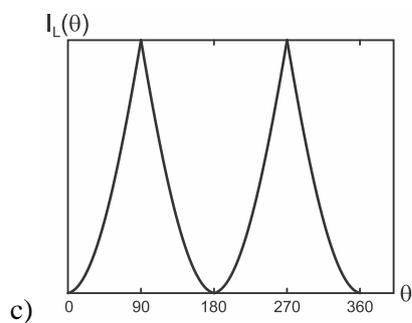
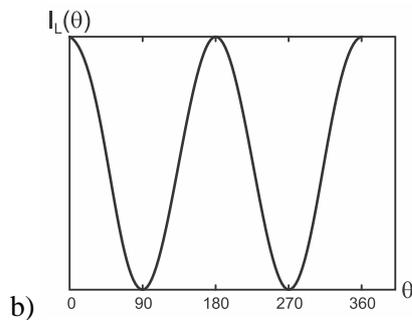
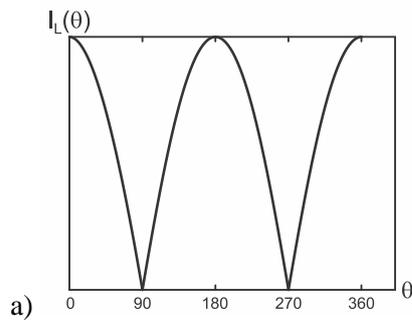
“Boa parte da luz refletida em superfícies não metálicas é polarizada. O brilho do vidro ou da água é um bom exemplo. A não ser para incidência perpendicular, o raio refletido contém mais vibrações paralelas à superfície refletora, enquanto o feixe transmitido contém mais vibrações em ângulos retos com as vibrações da luz refletida. O brilho das superfícies refletoras pode ser diminuído consideravelmente usando-se óculos escuros com lentes polaroides”.

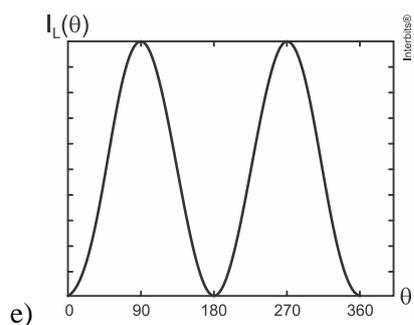
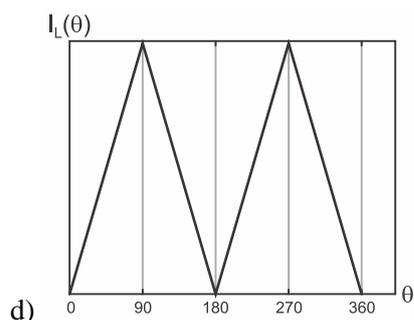
Fonte: HEWITT, Paul. *Física Conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Um motorista de automóvel, buscando filtrar a luz refletida pelo asfalto, deseja comprar um óculos com lente polarizada. Para tanto, o eixo de polarização mais adequado é o plano

- a) vertical para as duas lentes.
- b) horizontal para as duas lentes.
- c) vertical para a lente esquerda e plano horizontal para a lente direita.
- d) horizontal para a lente esquerda e plano vertical para a lente direita.

3. Um indivíduo instalou uma fonte de luz monocromática linearmente polarizada na roda do seu carro, irradiando em direção ortogonal à roda e paralela ao solo. O veículo está em movimento retilíneo em velocidade constante. Um detector linearmente polarizado desloca-se, acompanhando o eixo da roda, na mesma velocidade e sentido do carro. O gráfico da intensidade luminosa ( $I_L$ ) captada pelo detector, em função do ângulo ( $\theta$ ), em graus, entre os planos de polarização da luz e do detector, é:





4. Um professor do curso de Materiais de uma faculdade apresentou aos alunos a seguinte citação:

“As fibras ópticas podem ser usadas para guiar a luz ao longo de um determinado caminho. A ideia é fazer um raio de luz percorrer uma fibra transparente, ricocheteando entre as suas paredes. Desde que o ângulo de incidência do raio na parede da fibra seja sempre maior que o ângulo crítico, o raio permanecerá sempre dentro dela mesmo que ela esteja curva”.

KIRK, Tim. Physics for the IB Diploma. Oxford University Press, 2003. Livre tradução.

Em seguida, pediu para que os alunos respondessem, de maneira assertiva, à qual conceito físico a citação se refere.

A resposta correta esperada pelo professor é

- a) difração.
- b) polarização.
- c) ângulo limite.
- d) espalhamento.
- e) dispersão luminosa.

5. Em relação à natureza e propriedades da luz, assinale o que for correto.

01) Quando a luz passa através de uma abertura, cuja dimensão é da ordem do seu comprimento

de onda, pode-se observar o efeito da difração da luz.

02) Um raio de luz, ao incidir na interface de dois meios de diferentes índices de refração, sempre será refratado.

04) Radiação infravermelha apresenta uma frequência maior do que a frequência da luz visível.

08) O efeito de interferência, observado em ondas luminosas, é propriedade exclusiva de ondas eletromagnéticas.

16) O fato de a luz apresentar o efeito de polarização é uma indicação de que ela é uma onda transversal.

6. Com relação ao fenômeno da polarização da luz, assinale o que for correto.

01) Luz polarizada, ao passar através de um polarizador, pode tornar-se não polarizada.

02) A polarização é um fenômeno que ocorre somente em ondas longitudinais.

04) A intensidade de uma luz não polarizada, ao passar através de um polarizador, tem seu valor reduzido.

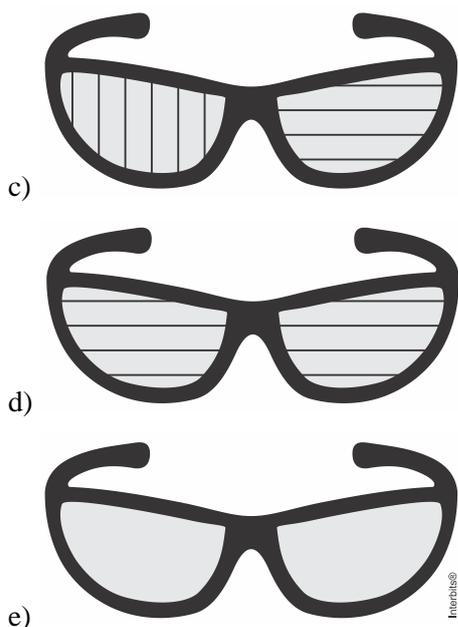
08) Luz não polarizada, ao passar através de dois polarizadores, pode ter sua intensidade reduzida a zero.

16) Luz polarizada não apresenta o efeito de interferência, apenas o de difração.

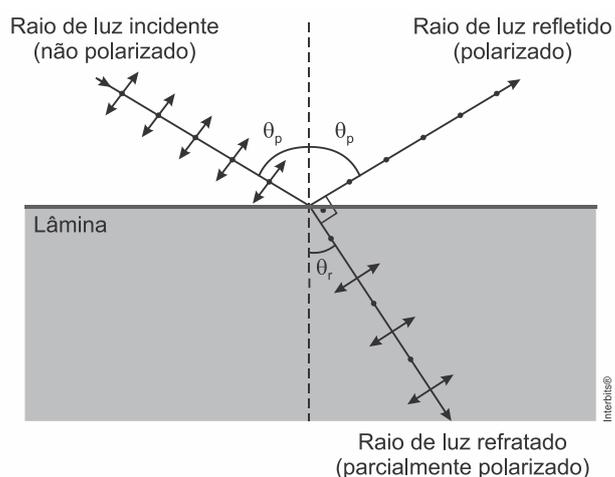
7. Nas rodovias, é comum motoristas terem a visão ofuscada ao receberem a luz refletida na água empoçada no asfalto. Sabe-se que essa luz adquire polarização horizontal. Para solucionar esse problema, há a possibilidade de o motorista utilizar óculos de lentes constituídas por filtros polarizadores. As linhas nas lentes dos óculos representam o eixo de polarização dessas lentes.

Quais são as lentes que solucionam o problema descrito?





8. A fotografia feita sob luz polarizada é usada por dermatologistas para diagnósticos. Isso permite ver detalhes da superfície da pele que não são visíveis com o reflexo da luz branca comum. Para se obter luz polarizada, pode-se utilizar a luz transmitida por um polaroide ou a luz refletida por uma superfície na condição de Brewster, como mostra a figura. Nessa situação, o feixe da luz refratada forma um ângulo de  $90^\circ$  com o feixe da luz refletida, fenômeno conhecido como Lei de Brewster. Nesse caso, o ângulo da incidência  $\theta_p$ , também chamado de ângulo de polarização, e o ângulo de refração  $\theta_r$  estão em conformidade com a Lei de Snell.



Considere um feixe de luz não polarizada proveniente de um meio com índice de refração igual a 1, que incide sobre uma lâmina e faz um ângulo de refração  $\theta_r$  de  $30^\circ$ .

Nessa situação, qual deve ser o índice de refração da lâmina para que o feixe refletido seja polarizado?

- a)  $\sqrt{3}$
- b)  $\frac{\sqrt{3}}{3}$
- c) 2
- d)  $\frac{1}{2}$
- e)  $\frac{\sqrt{3}}{2}$

9. Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do enunciado abaixo, na ordem em que aparecem.

A luz é uma onda eletromagnética formada por campos elétricos e magnéticos que variam no tempo e no espaço e que, no vácuo, são \_\_\_\_\_ entre si. Em um feixe de luz polarizada, a direção da polarização é definida como a direção \_\_\_\_\_ da onda.

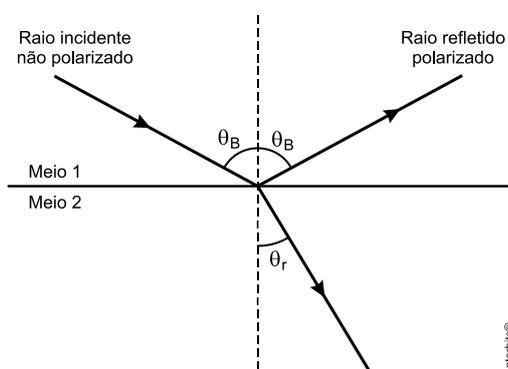
- a) paralelos - do campo elétrico
- b) paralelos - do campo magnético
- c) perpendiculares - de propagação
- d) perpendiculares - do campo elétrico
- e) perpendiculares - do campo magnético

10. O efeito de imagem tridimensional no cinema e nos televisores 3D é obtido quando se expõe cada olho a uma mesma imagem em duas posições ligeiramente diferentes. Um modo de se conseguir imagens distintas em cada olho é através do uso de óculos com filtros polarizadores.

a) Quando a luz é polarizada, as direções dos campos elétricos e magnéticos são bem definidas. A intensidade da luz polarizada que atravessa um filtro polarizador é dada por  $I = I_0 \cos^2 \theta$ , onde  $I_0$  é a intensidade da luz incidente e  $\theta$  é o ângulo entre o campo elétrico  $\vec{E}$  e a direção de polarização do filtro. A intensidade luminosa, a uma distância  $d$  de uma fonte que emite luz polarizada, é dada por  $I_0 = \frac{P_0}{4\pi d^2}$ , em que  $P_0$  é a potência da fonte. Sendo  $P_0 = 24 \text{ W}$ , calcule a

intensidade luminosa que atravessa um polarizador que se encontra a  $d = 2$  m da fonte e para o qual  $\theta = 60^\circ$ .

b) Uma maneira de polarizar a luz é por reflexão. Quando uma luz não polarizada incide na interface entre dois meios de índices de refração diferentes com o ângulo de incidência  $\theta_B$ , conhecido como ângulo de Brewster, a luz refletida é polarizada, como mostra a figura abaixo. Nessas condições,  $\theta_B + \theta_r = 90^\circ$ , em que  $\theta_r$  é o ângulo do raio refratado. Sendo  $n_1 = 1,0$  o índice de refração do meio 1 e  $\theta_B = 60^\circ$ , calcule o índice de refração do meio 2.



#### 4.5 Aplicação do produto educacional

O produto educacional não pode ser aplicado em sua totalidade devido à pandemia, uma vez que exigia a presença de estudantes em sala de aula e ainda não é possível saber quando isso ocorrerá. De qualquer maneira, foi possível aplicar parte do Produto Educacional em turmas de estudantes, mais especificamente, os tópicos de Óptica Física e de Interferência [seção 4.4.1]. Como complementação, através de avaliação virtual, apresentou-se o Produto Educacional a um grupo de professores, que fizeram uma análise qualitativa do mesmo [seção 4.4.2].

##### 4.5.1 Aplicação dos tópicos óptica física e interferência do produto educacional

O produto educacional proposto e desenvolvido ao longo do trabalho foi aplicado e trabalhado com turmas de 2ª e 3ª série do ensino médio da EEFM Dom Antônio de

Almeida Lustosa situado no município de Fortaleza, no estado do Ceará durante os primeiros meses do ano de 2020 no período que antedeu a pandemia em nosso país. É importante destacar que, durante a aplicação do produto educacional o mesmo teve de ser interrompido devido a suspensão das aulas regulares por conta da pandemia. Desta forma, a aplicação integral do produto acabou sendo prejudicada dada a necessidade, do produto, de que houve a realização em sala de aula de experimentos. Contudo, antes desse período foi possível realizar a aplicação da primeira e da segunda unidade do capítulo (Óptica Física e Interferência Luminosa).

Da forma que o produto foi planejado o conteúdo abordado por ele deveria ser trabalhado dentro de cada uma das séries com uma carga-horária de 15 horas-aula, ocorrendo semanalmente uma ou duas aulas que seriam ministradas de maneira complementar a carga horária dos alunos e a depender da profundidade de conhecimento que professor deseja-se trabalhar poderia ter uma duração de 20 horas-aula.

Durante a primeira semana de aplicação do produto educacional foi feito a apresentação da temática para os alunos e mencionado a importância daquele tema para situações do nosso dia-a-dia. A metodologia utilizada para a aplicação do produto foi a Teoria da Aprendizagem por Descoberta proposta por Bruner onde as aulas teriam como ponto de partida a apresentação de um dos experimentos propostos pelo produto educacional e a partir da observação daquele fenômeno seria solicitado aos alunos que propusessem explicações para o que estaria ocorrendo.

Durante as aulas observou-se que os alunos das turmas de 2ª série inicialmente apresentaram mais dificuldade para apresentarem propostas de explicações para o fato do que em comparação aos alunos da 3ª série. Acredita-se que a facilidade apresentada pelos alunos da 3ª série se dá pelo fato de eles já terem estudado aquela temática no final do ano da série anterior. É importante destacarmos que da forma que estão organizados os conteúdos ao longo do ensino médio, a parte de Interferência Luminosa é apresentada normalmente aos alunos apenas no segundo semestre da 2ª série. Logo, aquilo que estava sendo apresentado para eles seria algo totalmente novo.

Após ser realizado a apresentação do experimento do Espelho de Lloyd aos alunos, foram selecionadas algumas propostas de explicação para a ocorrência do fenômeno da interferência, como as que seguem:

- “Eu acho que essas linhas estão assim porque a luz fica acendendo e apagando, daí acaba formando essas linhas que a gente tá vendo. ”
- “Professor, eu sei que tem alguma coisa a ver com essa luz que tá batendo no espelho, mas não sei explicar o que é, porque quando a luz não bate no espelho não fica igual, fica diferente. ”
- “A gente viu isso no ano passado, mas não lembro bem, tem a ver com aquela experiência com o senhor mostrou pra gente das cordas. ”

Em seguida, após serem ouvido as respostas dos alunos com relação ao fato, foi ministrada uma aula sobre interferência luminosa. Durante a aula foi possível observar através dos questionamentos levantados por parte dos alunos e através de seus comentários que eles haviam compreendido a relação daquele assunto com a experiência que havia sido apresentado no início da aula.

Devido a maneira como foi organizado a aplicação dos produtos a aula seguinte seria destinada à apresentação de um outro experimento e apresentação de expressões matemáticas para a determinação de diversas grandezas no estudo da interferência luminosa e resolução das questões dos exercícios proposto.

#### **4.5.2 Opinião de professores de física sobre o produto educacional**

O produto educacional da maneira como foi proposto surge como ferramenta de formação continuada para os professores e fornecedor de uma sequência didática possível de ser trabalhada em sala de aula em turmas do ensino médio. Como foi comentado anteriormente, ao longo da aplicação do produto educacional, devido ao cenário de pandemia enfrentado e suspensão das aulas presenciais, não foi possível aplicar em sua totalidade o produto educacional.

Entretanto, mesmo havendo a impossibilidade da aplicação do produto educacional com os alunos em sala de aula como havia sido planejado. Optou-se por dar um outro foco a análise do produto educacional. Ciente de que a utilização dos experimentos em sala de aula seria uma parte fundamental e importante do produto

educacional não haveria sentido que este fosse aplicado de maneira remotamente haja vista a proposta apresentada.

Deste modo, foi realizado uma análise junto a professores de física do ensino médio sobre a importância e validade do produto educacional além das contribuições ele poderia trazer para o ensino de ótica física no ensino médio e sua formação continuada.

A análise do produto que será apresentada a seguir foi realizada com a colaboração de três professores de Física que lecionam em turmas de Ensino Médio em colégios de Fortaleza e região metropolitana, sendo o primeiro professor da rede particular de ensino graduado no curso de bacharelado e licenciatura em Física o segundo professor da rede particular de ensino graduando do curso de licenciatura em Física e o terceiro professor da rede estadual do Ceará graduado em licenciatura em Física. Os professores em questão receberam os nomes de Professor 1, Professor 2 e Professor 3 e após uma série de conversas e lerem o produto educacional puderam expressar suas opiniões sobre o mesmo.

Em um primeiro momento, os professores foram questionados sobre suas formações e sobre quando foi a última vez que participaram de um curso de capacitação, aperfeiçoamento ou reciclagem em suas áreas.

Relato dos Professores:

**Professor 1:** *Minha formação inicial foi em Física bacharelado, mas após ter tido a oportunidade de trabalhar em escolas lecionando física, acabei concluído o curso de bacharelado e posteriormente o curso de licenciatura, tendo então formação nas áreas. A última vez que estive em sala de aula foi durante o curso de licenciatura. Como tenho muitas aulas nos colégios, o tempo que me sobra aproveito para realizar preparar aulas, corrigir provas e fazer minhas atividades.*

**Professor 2:** *Atualmente estou terminando o curso de licenciatura em Física, como comecei a trabalhar assim que entrei na faculdade, acabei atrasando um pouco meu curso. Vou fazendo as disciplinas consigo conciliar com a minha rotina.*

**Professor 3:** *Tenho formação em licenciatura em Física, faz um “tempinho” que me formei, mas sempre gostei de estudar. Fiz meu mestrado e sempre que posso “tô”*

*fazendo algo. Meu último curso que realizei foi um curso de programação que fiz pela internet. Aprendi bastante coisa.*

Em um segundo momento, os professores foram questionados sobre o que eles pensavam sobre curso de capacitação ou aperfeiçoamento em determinados assuntos da física.

Relato dos Professores:

**Professor 1:** *Entendo que eles possuem sua importância, mas como possuo as duas graduações (bacharelado e licenciatura) acredito que não sejam tão importantes assim, já que vi praticamente toda a física e um pouco mais com muita profundidade. Acho que você fazer uma leitura aqui, ou ali já é o suficiente.*

**Professor 2:** *Sei que existem dos mais diversos assuntos por aí, gostaria de ter mais tempo para poder fazer alguns. Tem uns bens legais.*

**Professor 3:** *É sempre importante a gente se manter atualizado, ainda mais nós professores. É aquela coisa o que a gente passa muito tempo ser “vê” a gente esquece. Então sempre que posso faço um curso aqui, ou ali.*

Os professores participantes da pesquisa também foram questionados sobre as experiências que tiveram com óptica física e se já trabalharam esse assunto em sala de aula.

Relato dos Professores:

**Professor 1:** *Bem, nas turmas avançadas a gente costuma sempre vê esses assuntos, interferência, difração, polarização a gente dá até uma “esticada”. Agora nas turmas regulares a gente “vê” de uma maneira bem superficial, a gente dá um enfoque maior a parte teórica e dos fenômenos.*

**Professor 2:** *Nas turmas que trabalho não costumo “dar” esse conteúdo, mas confesso que não lembro muita coisa não.*

**Professor 3:** *A gente costuma “dá” isso nas turmas, mas por conta do Enem que vem cobrando recentemente, agora a gente “vê” bem rápido, duas ou três aulas e pronto.*

Em um quarto momento os professores foram questionados sobre o uso de experimentos em sala de aula. Se utilizavam, ou não e o qual a receptividade dos alunos.

**Professor 1:** *No colégio a gente até tem um laboratório, agora não tenho muito tempo para trazer experimentos para sala de aula, temos de ver muitos conteúdos em um curto tempo. Noto que quando eles veem uma experiência, mesmo que seja um vídeo, ou algo na internet eles ficam bastante curiosos, prestam até mais atenção. Se tivesse mais aulas traria alguns.*

**Professor 2:** *Eu tento trazer um experimento em cada um dos bimestres, mas é difícil de fazer eles, não sei fazer eles direito, tem que parar, estudar como que faz para não dá errado na hora, tenho que tirar um tempo pra estudar eles. Quando eu trago tem uns que gostam, outros nem tanto, mas eles sempre adoram, dizem que deixa a aula mais legal, por isso eu tento trazer um em cada um dos bimestres.*

**Professor 3:** *Sempre que posso trago um experimento para sala de aula, quando era estudante tive um professor que sempre trazia um experimento em suas aulas e aquilo sempre me fascinava. Então sempre que posso trago um experimento para mostrar para eles. Eles sempre adoram, ficam perguntando o porquê daquilo está acontecendo. Aproveito para pegar o “gancho” e ensinar diversas coisas para eles.*

Após esse primeiro momento de conversa, foi apresentado aos professores a proposta do produto educacional e realizado mais um momento de conversa onde poderiam expressar suas opiniões acerca do produto.

Inicialmente foi pedido para que os professores analisassem o que achavam da parte teórica apresentada no material.

Relato dos professores:

**Professor 1:** *Olhando a proposta do material, ele apresenta de uma forma direta e resumida alguns pontos sobre a ótica física, tem alguns pontos que poderiam ter um aprofundamento maior, como a parte de fontes coerentes, por exemplo.*

**Professor 2:** *Confesso que durante a disciplina de ótica não vi esse assunto, entendo um pouco do assunto porque como é cobrado no ENEM e tem nos livros do ensino médio a gente tem que estudar, mas não sei muito. Lendo o material dá para aprender um pouco sobre a parte de ótica física.*

**Professor 3:** *Fazia bastante tempo que não via nada sobre ótica física, como tenho poucas aulas para dar esse conteúdo a gente opta por focar na parte teórica e acaba deixando para lá as equações. Para quem já estudou esse assunto o material é interessante pois ajuda a lembrar os tópicos importantes, mas para quem nunca viu ótica física, também é interessante pois ajuda a dar uma boa base.*

Posteriormente, pediu-se que eles expressassem suas opiniões sobre a seção de experimentos apresentados no trabalho.

Relato dos professores:

**Professor 1:** *Gostei muito também da parte de experimentos, aquele do espelho de Lloyd nunca tinha ouvido falar, achei bem legal pois com materiais simples a gente pode levar para a sala de aula diversos experimentos.*

**Professor 2:** *Já tinha visto alguns dos experimentos nos livros do ensino médio, agora tinha uns diferentes que acho que posso levar para a sala de aula para mostrar para os alunos quando eu tiver dando esse assunto, não são tão difíceis de fazer e tenho certeza que os alunos vão gostar.*

**Professor 3:** *Os experimentos são interessantes pois todos usam materiais de baixo custo, isso é legal, pois as vezes a gente costuma criar a ideia de que para trazer experimentos para sala de aula a gente precisa de um laboratório caríssimo, mas não é bem assim. As vezes os experimentos mais simples são aqueles que chamam mais atenção dos alunos.*

Por fim, foi pedido para que os professores expressam suas considerações finais sobre o produto educacional.

Relato dos professores:

**Professor 01:** *Como havia comentado antes gostei do material, principalmente a parte dos experimentos, acredito que organizando ele para que ele seja ministrado em um curso complementar e com uma carga horária um pouco maior, da forma como ele foi proposto é possível obter bons resultados com os alunos, dá para conseguir tirar bons frutos daí.*

**Professor 02:** *Embora eu não costume dar esse assunto poderia sim utilizar o material para me auxiliar nas aulas sobre o tema, aprendi algumas coisas que via nos*

*livros, mas não tinham uma explicação tão clara quando a do material. Os experimentos já até salvei alguns para que possa usar depois quando tiver vendo esse assunto. Enfim, utilizaria esse material sem nenhum problema.*

**Professor 03:** *O material é bom, me ajudou a lembrar algumas coisas que não via a bastante tempo, além de auxiliar quem tem dificuldade nesse assunto. Vale a pena tirar um tempo para ler ele e utilizar em sala de aula. Tenho certeza que com os experimentos os alunos irão gostar muito mais desse assunto e se sentirão muito mais interessados a estudar.*

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do restante do produto educacional acabou sendo extremamente prejudicada por conta do cenário da pandemia enfrentado e devido a suspensão das aulas presenciais. Uma vez que o produto havia sido organizado e elaborado para ser aplicado em sala de aula e demonstrassem através dos experimentos de baixo custo os temas abordados para aqueles que tiveram pouquíssimas oportunidades de terem tido aulas experimentais pudessem presenciar fatos no mínimo fascinantes não foi possível.

Todavia, foi possível notar durante as aulas o empenho e compromisso dos alunos em participarem das aulas, ao se utilizar o produto educacional e seguir a metodologia proposta por ele os alunos pareciam estarem mais interessados e curiosos que em relação as aulas regulares que eles tinham.

Como modo de analisar e avaliar o produto educacional em sua totalidade o trabalho contou com a participação de professores que puderam expressar suas opiniões e apresentar contribuições para o trabalho que foi realizado. Esta análise e avaliação é importante de ser feita pois nos leva a verificar a aceitação do produto bem como os limites de sua validade, mesmo este não sendo possível de ser aplicado em sua totalidade. Escutando aqueles que podem fazer uso dele temos a oportunidade de avaliar a qualidade do trabalho e verificar sua receptividade.

Apesar de estarmos distantes de solucionarmos todos os problemas relacionados ao ensino de Física, e da formação dos professores, o produto educacional apresentado tem como objetivo ajudar os professores a desenvolver melhor suas práticas escolares em sala de aula em meio a diferentes cenários e os fornece um material que os permita visitar temas já visto antes e para alguns fornecer embasamento para um melhor entendimento do assunto. É fato que o ensino de Física através de experimento tem sua parcela de contribuição para uma melhora no ensino-aprendizagem dos alunos e que pode ser utilizado como ferramenta pelos professores não somente do Ensino Médio, mas de vários outros graus de ensino.

Este trabalho buscou concentrar os principais problemas observados atualmente e já apontado por diversas pesquisadoras e propor soluções para estas apresentando um material que possibilite sanar se não todas, mas boa parte dos problemas encontrados no ensino de Ótica Física.



## REFERÊNCIAS

BONADIMAN, Hélio.; NONENMACHER, Sandra E. B. **O gostar e o aprender no ensino de Física: Uma proposta metodológica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, RS, v. 24, n. 2, p. 194-223, ago. 2007.

ARAÚJO, M. S. T. & ABIB, M. L. V. S. **Atividades experimentais no ensino de física: Diferentes enfoques, diferentes finalidades.** Revista brasileira de ensino de física, Vol. 25, n. 2, junho, 2003.

GASPAR, Alberto; MONTEIRO, Isabel Cristina de Castro. **ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DE DEMONSTRAÇÕES EM SALA DE AULA: UMA ANÁLISE SEGUNDO O REFERENCIAL DA TEORIA DE VYGOTSKY.** Investigações em Ensino de Ciências, SP, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2005.

VASCONCELLOS, S. J. L.; VASCONCELLOS, C. T. D. V. **Uma análise das duas revoluções cognitivas.** Psicologia em Estudo, v. 12, n. 2, p. 385-391, maio/ago., 2007. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413737220007000200020&Ing=ES&nrm=iso&tIng=ES](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413737220007000200020&Ing=ES&nrm=iso&tIng=ES).

MARQUES, R. (2004) **A Pedagogia de Jerome Bruner.** Consultado no endereço: [http://www.eses.pt/usr/ramiro/docs/etica\\_pedagogia/A%20Pedagogia%20de%20Jerome Bruner.pdf](http://www.eses.pt/usr/ramiro/docs/etica_pedagogia/A%20Pedagogia%20de%20Jerome%20Bruner.pdf).

BRUNER, J.S. (1973). **O processo da Educação.** São Paulo: National.

FERREIRA, Kelly; ANGELI, Mirian; DE SOUZA, Maria Alice Veiga Ferreira. Jerome Seymour Bruner: cognitivismo em ação. In: SOUZA, M. A. V. F.; SAD, L. A.; THIENGO, E. R. **Aprendizagem em diferentes perspectivas: uma introdução.** Vitória, ES: Ifes, 2015. Disponível em: <https://sites.google.com/site/ifesgepeme/producoes-cientificas/livros> .

PRÄSS, A. R. (2012). **Teorias de aprendizagem.** (n.l.): ScriniaLibris.com. Retirado de [http://www.fisica.net/monografias/Teorias\\_de\\_Aprendizagem.pdf](http://www.fisica.net/monografias/Teorias_de_Aprendizagem.pdf)

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem.** 2. ed. São Paulo: EPU, 1999.

Resnick, R., Halliday, D., Walker, J., **Fundamentos de Física**, volume 4. 10. Ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.

PAIS, LUIZ Carlos. **Didática da Matemática: uma análise da influência francesa.**  
Belo Horizonte: Autêntica, 2002.

## APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL**  
**EM ENSINO DE FÍSICA**



## Produto Educacional

**TÓPICOS EM ÓTICA FÍSICA PARA**  
**PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO**



## **ORIENTAÇÃO PARA OS PROFESSORES SOBRE O USO DO PRODUTO EDUCACIONAL**

Ao longo do Ensino Médio o conteúdo de Ótica que é ministrado tem normalmente a seguinte ordem:

- a) Princípios da Ótica Geométrica
- b) Fenômenos Óticos (Reflexão, Refração e Superposição)
- c) Espelhos Planos e Esféricos
- d) Lentes Esféricas
- e) Ótica da Visão
- f) Instrumentos Óticos (Lupa, Luneta, Telescópio)
- g) Ótica Física (Interferência, Difração e Polarização)**

Desta maneira, é interessante que no início dos tópicos de Ótica Física o professor apresente o conteúdo programático aos seus alunos e fazendo uma breve abordagem sobre as diferenças que serão observados entre o tópico e os vistos anteriormente.

O trabalho que será apresentado à frente encontra-se dividido em quatro unidades: a primeira unidade irá tratar sobre a Ótica Física de maneira geral, o segundo sobre a Interferência da Luz, o Terceiro sobre a Difração da Luz e o quarto e último que será sobre a Polarização da Luz. Cada uma dessas unidade contará com uma explanação teórica, sugestões de experimentos e atividades práticas que podem ser utilizados para demonstração do assunto e exercícios propostos sobre cada um dos assuntos que serão abordados.

Cada umas das unidades foram elaboradas de maneira que o os conteúdos pudessem ser entendidos de modos qualitativa e quantitativa pelo seu leitor. Ao longo do material optou-se por não apresentar uma Matemática de nível tão elevado por acreditar que é muito mais importante para leito o entendimento dos fenômenos que estão sendo

analizados. Entretanto a Matemática utilizada é suficiente para que sejam possíveis solucionar problemas matemáticos relacionados ao tema quando forem solicitados.

## **UNIDADE 01 – ÓPTICA FÍSICA**

Na primeira unidade do trabalho é feita uma abordagem sobre os principais tópicos que serão estudados na Ótica Física. Nesta unidade, é importante que o professor reforce as diferenças encontradas entre a maneira que a luz é tratada e seus fenômenos são analisados segundo a Ótica Geométrica e a Ótica Física. Como sugestão, o professor poderia iniciar a unidade apresentando aos alunos a competição que perdurou muitos anos entre os cientistas que defendiam que a luz possuía um comportamento ondulatório, e os que acreditam ter a luz um comportamento corpuscular.

## UNIDADE 02 – INTERFERÊNCIA LUMINOSA

Na segunda unidade do trabalho será apresentado um dos fenômenos inerente a luz, o da interferência luminosa. Quando foi apresentado aos alunos os principais fenômenos da ondulatória, entre estes estava a interferência de ondas. Sendo a luz um exemplo de onda eletromagnética, a interferência é então um fenômeno que está de modo íntimo ligada à luz.

Pode ser que seja interessante ao professor antes de aprofundar esta unidade fazer uma revisão sobre os conceitos estudados na parte de ondulatória sobre a interferência de ondas na seção “INTERFERÊNCIA DE ONDAS”, são apresentados os tipos de interferência que uma onda está sujeita. É feita uma abordagem descritiva sobre cada um dos tipos de interferência possíveis e sobre as principais características que pode serem notas em cada uma destas.

Na seção “CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DA INTERFERÊNCIA” é descrito quais são as condições que são necessárias para que seja possível observamos a interferência luminosa entre duas ou mais fontes luminosas. Embora em nosso dia-a-dia possamos observar inúmeros casos onde ocorrem o encontro de duas ou mais fontes luminosas em um mesmo ponto do espaço, nem sempre isso acaba resultando em um padrão de interferência.

É interessante que nesta seção o professor de uma atenção maior ao tópico “COERENCIA DAS FONTES”, é de extremo valor que os alunos saibam a importância da coerência entre fontes este fator é algo primordial para que seja possível observar a interferência luminosa. Para isto o professor pode explicar o processo de produção de luz em um bulbo de uma lâmpada e mostra que embora lâmpadas diferentes sejam capazes de produzir luz, a maneira como ela é produzida por cada uma das fontes não é semelhante.

A seção “YOUNG E A EXPERIÊNCIA DA DUPLA FENDA” é a seção mais importante da unidade, sendo assim é importante que o professor dê uma atenção maior para ele. Um dos responsáveis por demonstrar que a luz possuía um comportamento ondulatório foi Thomas Young através do seu experimento da dupla fenda.

Nessa seção o professor irá encontrar uma descrição de como Young conseguiu demonstrar que a luz apresenta padrões de interferências que coincidem aos padrões observado em ondas. Durante a seção também é feita a descrição matemática das condições que são necessárias para a ocorrência da interferência construtiva e para a interferência destrutiva. Também é demonstrado como podemos calcular as distâncias entre cada uma das franjas (brilhantes e escuras) e suas relações com alguns parâmetros relacionados ao experimento: distância entre fendas, distância entre o anteparo e as fendas e a relação com o comprimento de onda da luz utilizada.

A seção seguinte “INTERFERÊNCIA DEVIDO A DIFERENÇA DE CAMINHOS ÓTICOS” é uma continuação da seção anterior, neste, serão apresentadas situações além da apresentada pelo experimento de Young onde é possível serem observados padrões de interferência luminosa.

Em “MUDANÇA DE FASE EM UMA REFLEXÃO LUMINOSA”, descreve-se o motiva para o qual em apenas algumas situações são possíveis observar fenômenos da interferência. É apresentado uma abordagem teórica e matemática para justificar a ocorrência do fenômeno e para que seja possível identificar as condições para a sua ocorrência.

## UNIDADE 03 – DIFRAÇÃO LUMINOSA

Na terceira unidade do trabalho será apresentado mais um dos fenômenos inerentes a luz, o da difração luminosa. Assim como foi feito na unidade anterior, nesta primeira leitura é apresentado um pouco sobre as descobertas realizadas por Francesco Grimaldi ao observar um feixe de luz que adentrava uma sala por um pequeno orifício.

É importante que ao apresentar esta unidade aos alunos o professor faça a distinção entre o fenômeno da interferência e da difração luminosa, que embora eles aparentem serem semelhantes cada um deles possui suas características.

Na seção “DIFRAÇÃO OCORRIDA EM UMA FENDA ÚNICA” trata das condições necessárias para que a difração luminosa ocorra, para facilitar o entendimento dos alunos é dado como sugestão para explicação do fenômeno o que ocorre com o som ao encontrar um obstáculo à sua frente. O professor pode utilizar situações do cotidiano do aluno para ilustrar a ocorrência do fenômeno. Caso o professor deseje uma explicação mais aprofundada sobre o tema pode ser interessante comentar sobre o Princípio de Huygens.

Em “PADRÃO DE DIFRAÇÃO EM UMA FENDA ÚNICA” é apresentado os padrões de difração que são obtidos ao fazer a luz passar por um e por duas fendas. É possível notar através das imagens as diferenças que existem em a largura das faixas para cada uma das situações. Nesta seção é feita uma descrição matemática de como pode ser encontrado as posições de cada uma das faixas em relação ao centro do anteparo e as distâncias entre franjas, além de como a intensidade do brilho de cada uma das faixas muda à medida que vamos nos distanciando do centro.

Nas seções “PADRÃO DE DIFRAÇÃO EM UMA FENDA DUPLA” e “PADRÃO DE DIFRAÇÃO EM UMA FENDA DUPLA” temos uma descrição de como a interferência de dupla fenda e a difração estão relacionadas umas com a outra. Ao observamos a ocorrência desses dois fenômenos somados temos o padrão que é apresentada pela imagem no início da unidade.

Por fim em “REDE DE DIFRAÇÃO” mostramos como a difração pode ser útil para análises ópticas e como densidade de fendas afeta os padrões observados. Também é feita uma descrição matemática.

## UNIDADE 04 – POLARIZAÇÃO DA LUZ

Na quarta e último capítulo do trabalho é dedicado a analisar o fenômeno da polarização da luz. Para um melhor entendimento do fato é interessante ser feita uma revisão sobre as classificações e características das ondas. É importante que nessa unidade o aluno seja capaz de identificar as condições onde irão ocorrer ou não o fenômeno.

Em “POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO” é apresentado um dos casos onde podemos observar a polarização da luz. É explicado como a luz pode ser polarizada ao passar por um filtro, bem como as condições para que isso ocorra. Também é feita uma análise matemática sobre a intensidade luminosa que é transmitida pela lente, onde é possível constatar que está depende diretamente dos ângulos entre os planos polarizados dos filtros.

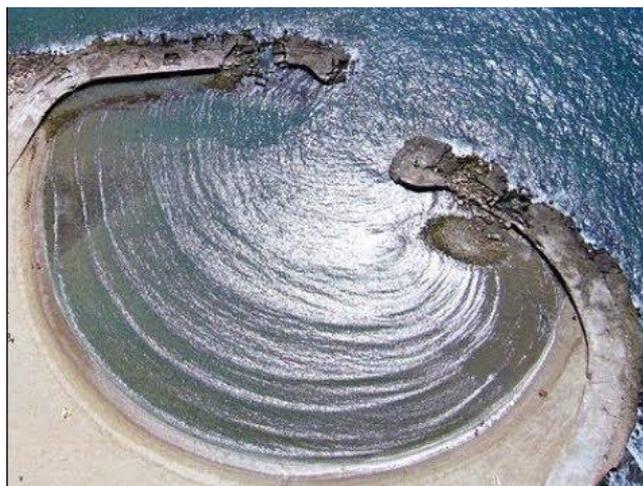
Na seção “POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO” é feita uma descrição de uma outra situação onde a luz pode ser polarizada. Existe uma situação bem específica na reflexão da luz, quanto há o chamado ângulo de Brewster, que faz com que o raio luminoso que foi refletido seja polarizado em relação ao raio incidente.

A unidade mostra também algumas situações onde podemos notar a polarização de uma onda luminosa já polariza. Como a onda refletida é uma onda polarizada, ao utilizarmos um filtro polarizador ele acabará eliminando os raios que foram refletidos naquela superfície, deixando assim a imagem mais confortável.

## 1 ÓPTICA FÍSICA

No estudo da ótica geométrica, o comportamento da luz pode ser analisado por meio de conceitos geométricos e a partir desses conceitos é possível descrever a maneira na qual a luz se propagava, através de raios luminosos. Esses caminhos tomados pela luz eram percursos representados por segmentos de retas orientadas e obedeciam às leis da reflexão e refração. Porém, as leis que regem a ótica geométrica possuem sua validade apenas quando o comprimento de onda da onda que está sendo analisada é muito menor que as dimensões das fendas ou barreiras encontradas ao longo de seu deslocamento. Quando isto não acontece, assumirmos que a luz tem um caráter ondulatório é suficiente para explicarmos fenômenos ocorridos. Cada um destes fenômenos pode ser descrito sob a luz do que nós chamamos de ótica física.

Figura 9: Difração formada em uma baía



Fonte: <https://i.ytimg.com/vi/v53ARvT-eU0/hqdefault.jpg>

A ótica física é uma parte da ótica conhecida por estudar as propriedades fundamentais da luz e sua maneira de interagir com a matéria. Fenômenos como a reflexão, refração, difração, polarização e interferência podem ser analisando sobre o ponto de vista da ótica física. Através dela também é possível realizamos estudos sobre uma propriedade quântica mecânica de pacotes individuais de luzes conhecidos como fótons.

Quando se estudam os fenômenos ondulatórios, observa-se que ondas mecânicas podem sofrerem superposição e em decorrência dessa superposição produzirem um padrão de interferência que dependendo de suas fases pode ser construtiva, ou destrutiva. Como a luz também é uma onda, neste caso, uma onda eletromagnética, esta deve apresentar também padrões de interferências quando tais ondas são superpostas. Nos próximos tópicos iremos abordar quais são as condições para que tais padrões sejam observáveis e como podemos demonstrar de maneira práticas estes padrões utilizando matérias de fácil acesso.

## 2 INTERFERÊNCIA DA LUZ

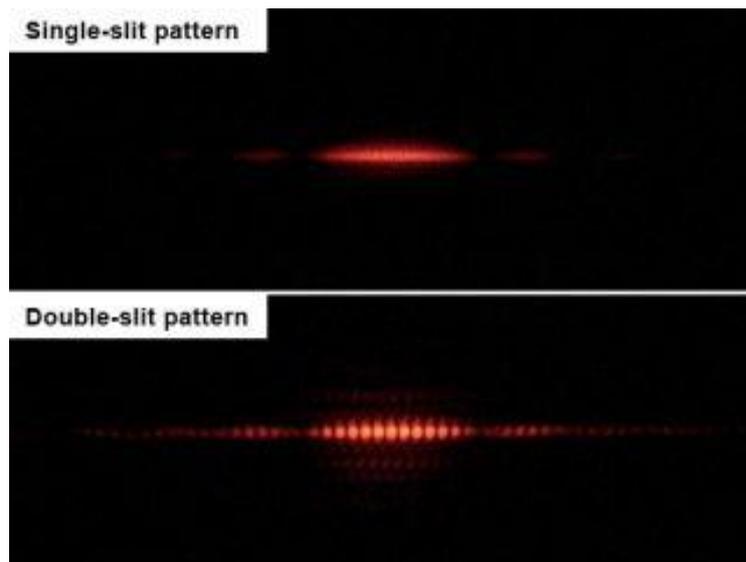
### 2.1 Distribuição energética na interferência luminosa

Quando falamos do termo interferência estamos nos referindo a uma situação onde duas ou mais ondas se sobrepõem no espaço. Ocorrendo essa superposição de onda teremos que a onda resultante produzida por esse encontro pode ser entendida por meio do princípio da superposição de ondas. Segundo o princípio da superposição, temos:

Quando duas, ou mais ondas se sobrepõem em um determinado ponto do espaço, temos que o resultado obtido é uma onda cuja amplitude pode ser calculada através da soma das amplitudes de cada uma dessas ondas, é como se cada uma daquelas ondas estivesse presente sozinhas naquele mesmo ponto do espaço e cada uma tivesse sua contribuição na formação de uma nova onda.

Ao analisarmos a distribuição energética produzida por uma fonte pontual de luz, notamos que a energia ali se encontra distribuída de uma maneira uniforme. Porém ao fazermos a mesma análise energética, mas agora tomando como objeto de estudo duas fontes luminosas pontuais e coerentes que se encontram lado-a-lado é observado que a energia se encontra distribuída de uma maneira não uniforme. Entretanto, é possível observar que a energia ali presente se distribui de uma maneira a seguir um padrão, haverá regiões onde a energia é máxima e haverá regiões onde a energia é mínima, e ainda assim a energia total daquele sistema se mantém a mesma.

Figura 10: Padrão de interferência formada por uma e duas fendas.



Fonte: <https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/cSjkhATB5ZJLFce2YCh8T-320-80.jpg>

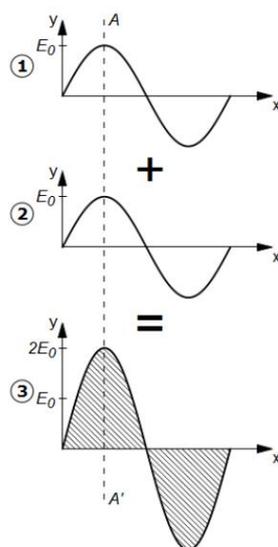
Esse padrão observável nessa situação onde temos duas fontes luminosas coerentes lado-a-lado se trata de um caso específico de superposição da luz denominada interferência luminosa.

## 2.2 Interferência de ondas

Na interferência é possível termos a ocorrência de três tipos de situações:

**Interferência Construtiva:** Para a ocorrência de uma interferência construtiva é necessário que ao superpormos as ondas presentes naquela região do espaço estas produzam uma onda resultante cuja amplitude seja maior que a amplitude de cada uma das ondas individualmente.

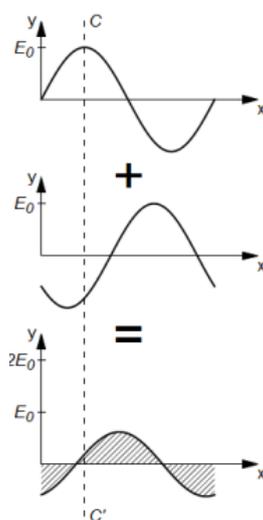
Figura 11: Interferência construtiva resultante da superposição de ondas.



Fonte: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28756/1/2017\\_tese\\_marmiranda.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28756/1/2017_tese_marmiranda.pdf)

Interferência parcialmente destrutiva: Para a ocorrência de uma interferência parcialmente destrutiva é necessário que ao superpormos as ondas presentes naquela região do espaço estas produzam uma onda resultante cuja amplitude seja menor que a amplitude de cada uma individualmente.

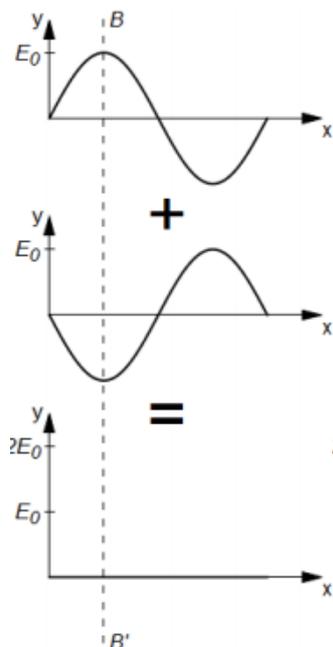
Figura 12: Interferência parcialmente construtiva resultante da superposição de ondas.



Fonte: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28756/1/2017\\_tese\\_marmiranda.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28756/1/2017_tese_marmiranda.pdf)

Interferência totalmente destrutiva: Para a ocorrência de uma interferência totalmente destrutiva é necessário que ao superpormos as ondas presentes naquela região do espaço estas produzam uma onda resultante cuja amplitude é nula.

Figura 13: Interferência totalmente destrutiva resultante da superposição de ondas.



Fonte: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28756/1/2017\\_tese\\_marmiranda.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28756/1/2017_tese_marmiranda.pdf)

## 2.3 Condições para a ocorrência da interferência

Embora saibamos que duas fontes de luzes são capazes de produzir uma interferência quando são colocadas lado-a-lado, observamos que esse fenômeno não é observável em todos os casos. Para que seja possível a observância do fenômeno da interferência algumas condições devem ser observadas.

### 2.3.1 Coerência das fontes:

Quando se deseja produzir um padrão de interferência utilizando fontes luminosas é necessário que as fontes utilizadas sejam fontes ditas coerentes. Ao dizermos que as fontes luminosas são coerentes estamos fazendo referência a uma característica da onda que denominamos fase. Para fontes ditas coerentes teremos que a diferença de fase entre

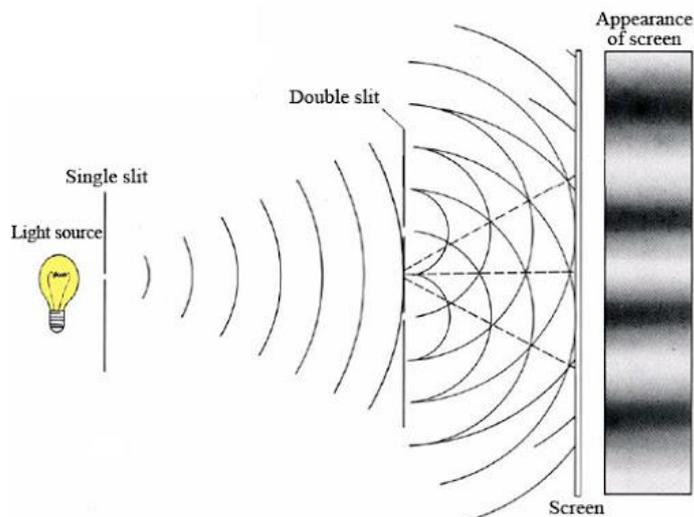
as ondas é constante. Fontes serão ditas não coerentes quando a diferença de fase entre as ondas for mutável, variar no decorrer do tempo.

Ao observarmos as ondas mecânicas, é possível termos duas ondas produzidas por fontes diferentes apresentando uma diferença de fase constante entre elas. Porém, ao tomarmos duas fontes luminosas produzidas por fontes diferentes não haverá como ocorrer a coerência entre essas fontes, isto decorre da maneira no qual a luz é emitida.

Em lâmpadas convencionais (lâmpada de filamento) a luz é emitida através da excitação dos átomos que compõem a lâmpada devido a passagem de uma corrente elétrica por aqueles átomos. Um átomo ao ser excitado desta maneira começa a irradiar energia de maneira contínua até que tenha perdido toda a energia adquirida inicialmente, retornando assim ao seu estado de equilíbrio. Esse processo de emissão dura um intervalo de tempo da ordem de  $10^{-8}$  segundos. Os vários átomos que vão compor a fonte luminosa irão emitir também luz de maneira a não possuírem uma fase constante em relação a outras fontes do mesmo tipo. Surge daí a dificuldade de se observar fenômenos associados a interferência utilizando este tipo de fonte.

Contudo, embora duas fontes de luz comum não possam ser utilizadas para produzirem padrões de interferência, utilizando um artifício experimental é possível obtermos um sistema que faz uso de uma fonte comum de luz e que possui duas fontes pontuais de luz coerentes. O mais notório cientista responsável por isso foi *Thomas Young*, com seu experimento da dupla fenda. *Young* fez uso de uma fonte comum de luz e a partir desta conseguiu obter duas fontes pontuais de luz coerentes, para isto, *Young* fez a seguinte construção:

Figura 14: Representação do experimento de interferência de dupla fenda.



Fonte: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/2Btq6SSxueRyh9rX\\_oMJzPhink6g4Go2-0ZVtwz72lsOO4Pf7qNvw\\_4J\\_G5hIYf6GI7nkEQQ\\_QKmMyxGIZVrWF6IG3HZa1CWshUeHP2FfZqFvliP5THTwC1Jg65UxHwjxFzKTgXvzpz1C8LqCX-peplY](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/2Btq6SSxueRyh9rX_oMJzPhink6g4Go2-0ZVtwz72lsOO4Pf7qNvw_4J_G5hIYf6GI7nkEQQ_QKmMyxGIZVrWF6IG3HZa1CWshUeHP2FfZqFvliP5THTwC1Jg65UxHwjxFzKTgXvzpz1C8LqCX-peplY)

Ao fazer a luz proveniente da lâmpada passar pela primeira fenda e logo em seguida por um plano contendo duas fendas, esta primeira fenda se comporta como uma fonte luminosa para as duas fendas subsequentes. Com essa construção passamos a ter duas fontes pontuais de luz coerente, haja vista que uma mudança na fase da luz proveniente da lâmpada proporcionará a mesma mudança na fase das fontes luminosas. Uma maneira mais prática de solucionarmos o problema relacionado a coerência entre fontes luminosas seria utilizando um *Laser*. Devido a maneira como é produzida a luz nesses dispositivos temos uma fonte coerente de luz, mesmo utilizando dois *Lasers* lado-a-lado.

### 2.3.2 Frequência e Comprimento de onda

Ao assumirmos que as fontes luminosas são coerentes teremos que as ondas ali representadas terão a mesma frequência. Logo, podemos dizer que duas fontes coerente possuem a mesma frequência.

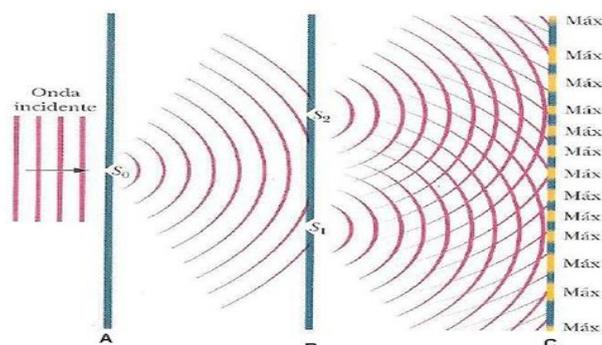
## 2.4 Young e a Experiência da Dupla Fenda

Um dos primeiros a demonstrar a os padrões de interferência luminosa foi o físico, médico e egiptólogo inglês Thomas Young, por volta do ano de 1801. Young também teve contribuições fundamentais para diversos segmentos da física e outras áreas.

O efeito da interferência pode ser entendido como um fenômeno característicos das ondas, onde ao se combinarem, as ondas podem gerarem um incremento, ou uma atenuação de sua forma inicial. Esse fenômeno não pode ser explicado adequadamente com a aproximação de raios luminosos. Por meio de uma analogia ao comportamento das ondas formadas na água ao entrar em canal estreito, Young afirmou que: “se entrarem no canal de tal forma que as elevações de um coincidem com as do outro, produzirão como resultado elevações maiores; mas se as elevações coincidem com as depressões do outro, preencherão exatamente essas depressões, e a superfície da água permanecerá em repouso. Afirmando agora que resultados semelhantes ocorrem quando duas porções de luz se juntam, e é o que chamo a lei geral da interferência da luz”.

Para demonstrar isto, Young produziu um experimento com a luz onde é possível verificar a existência de padrões de interferência que se assemelham ao comportamento apresentado por ondas. Por meio de seu experimento, Young pode afirmar que a luz possuía um comportamento ondulatório. Ao experimento foi dado o nome de Experimento da Dupla Fenda de Young. Como condição para a ocorrência da interferência era necessário que Young possuísse fontes de luz ditas coerentes, ou seja, que possuíssem entre si uma relação de fase constante, caso contrário não seria possível notar nenhum efeito de interferência, isto é, teria fontes incoerentes. Young fez então com que a luz solar incidisse em um pequeno orifício  $S_0$ , aberto em um anteparo A, fazendo assim com que a luz sofresse uma difração e incidisse sobre dois outros orifícios  $S_1$  e  $S_2$  localizado em um anteparo B, a luz que emerge das duas fendas é coerente porque uma única fonte produz o feixe luminoso original e as duas fendas servem apenas para separar o feixe original em duas partes. Ao passar pelos novos orifícios a luz sofre uma nova difração, onde temos agora duas ondas que passam a se propagar de forma esférica, e superpostas, pelo espaço até atingirem um anteparo C, produzindo nele uma configuração de interferência como mostrado na Figura 07.

Figura 15: Representação esquemática do experimento da dupla fenda tal como idealizado por Thomas Young.



Fonte: <http://player.slideplayer.com.br/7/1785924/data/images/img13.jpg>.

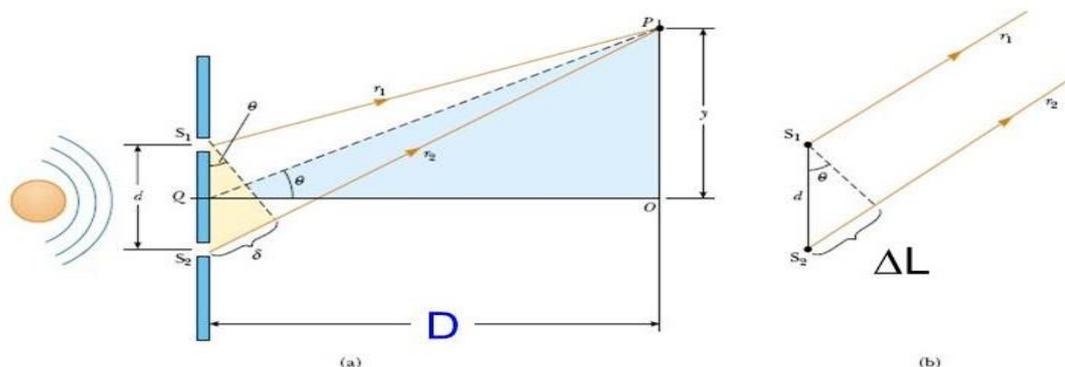
As luzes originadas dessas duas fendas produzem um padrão visível no anteparo C; o padrão consiste em uma série de faixas paralelas brilhantes e escuras chamadas de franjas. Quando as ondas luminosas de  $S_1$  e  $S_2$  chegam a um ponto no anteparo em fase acabam por produzir naquele local uma interferência construtiva, aparecendo assim uma franja brilhante naquele local. Quando as ondas luminosas provenientes das duas fendas chegam ao anteparo com fases diferentes acabam por produzir ali uma interferência destrutiva, o resultado obtido é uma franja escura.

Da experiência de Young podemos obter uma descrição quantitativa construído a partir da figura 08.

Figura 16: Representação geométrica do experimento de dupla fenda.

Figura (a) – Construção geométrica para descrever a experiência de Young da dupla fenda.

Figura (b) – Ampliação da região compreendida pelas duas fontes.



Fonte: [http://www.pbx-brasil.com/FisQuan/Notas/Area01/oticaFisica/figuras/Experimento\\_de\\_Young\\_matematica.png](http://www.pbx-brasil.com/FisQuan/Notas/Area01/oticaFisica/figuras/Experimento_de_Young_matematica.png).

Assumindo que tenhamos um anteparo posicionado a uma distância perpendicular  $D$  das fendas  $S_1$  e  $S_2$ , que estão separadas por uma distância  $d$ . Considerando um ponto  $P$  localizado no anteparo. O ângulo  $\theta$  é medido a partir de uma linha perpendicular ao anteparo partindo do ponto médio entre as fendas e de uma linha do ponto médio ao ponto  $P$ . Identificamos  $r_1$  e  $r_2$  como sendo as distâncias que as ondas percorrem entre a fenda e o anteparo. Se considerarmos a fonte como sendo monocromática, as ondas que são difratadas nos orifícios  $S_1$  e  $S_2$  terão o mesmo comprimento de onda, a mesma amplitude e estão em fase, logo, temos fontes coerentes. Na posição  $P$  a intensidade da luz observado será o resultado da superposição da luz proveniente das duas fendas. A partir do modelo geométrico do triângulo menor na figura (b) é possível observarmos que uma das ondas da fenda inferior percorre uma distância maior do que uma onda da fenda superior. Essa distância é o que chamaremos de diferença de percurso. Se  $D$  é muito maior do que  $d$ , as duas trajetórias estão muito próximas de serem paralelas. Adotando um modelo no qual as duas trajetórias são exatamente paralelas, teremos a partir da figura 08 (b) que:

$$\Delta L = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \quad (2.1)$$

Essa diferença de percurso será a responsável por termos franjas brilhantes, ou franjas escuras se formando no ponto  $P$ .

Se no ponto  $P$  tivermos uma franja brilhante, teremos que a diferença de percurso tem valor igual a zero, ou a um múltiplo inteiro do comprimento de onda, as duas ondas estarão em fase e no ponto  $P$  teremos uma interferência construtiva. Para termos franjas brilhantes temos que:

$$\Delta L = d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2.2)$$

onde  $m$  é um número inteiro chamado de ordem. A franja brilhante central em  $\theta = 0$ , ( $m = 0$ ) é chamada de máximo de ordem zero. O primeiro máximo em qualquer um dos lados para o qual  $m = \pm 1$  é chamado de máximo de primeira ordem, e assim por diante.

Se no ponto  $P$  tivermos uma franja escura, teremos que a diferença de percurso tem valor igual a um múltiplo ímpar de meio comprimentos de onda, as duas ondas que

chegam a P estão  $180^\circ$  fora de fase e no ponto P teremos uma interferência destrutiva. Para termos franjas escuras temos que:

$$\Delta L = d \operatorname{sen} \theta = \left( m + \frac{1}{2} \lambda \right) \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2.3)$$

Com essas equações temos informações para identificarmos as posições angulares das franjas. Inicialmente adotamos que o valor de  $D \gg d$ , se supormos que  $d \gg \lambda$ ; isto é, a distância entre as duas fendas é muito maior do que o comprimento de onda teremos que  $\theta$  é pequeno para as primeiras franjas e, assim, podemos utilizar a aproximação de ângulos pequenos  $\operatorname{sen} \theta \approx \operatorname{tg} \theta$ . A partir do modelo geométrico do triângulo OPQ na anterior observamos que:

$$\operatorname{sen} \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{y}{D} \quad (2.4)$$

Usando esse resultado e substituindo o valor encontrado para as franjas brilhantes temos que:

$$y_{\text{brilhante}} = \frac{m \lambda D}{d} \quad (2.5)$$

e para as franjas escuras teremos:

$$y_{\text{escuras}} = \left( m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda D}{d} \quad (2.6)$$

onde por meio destas equações conseguimos localizar as posições lineares medidas ao longo do anteparo.

## 2.5 Interferência devido a diferença de caminhos óticos

Embora tenhamos como produzir padrões de interferência luminosa utilizando o experimento da dupla fenda de Young, uma maneira alternativa para observarmos esses padrões é por meio de uma diferença produzida através de filmes finos.

Figura 17: Padrões de interferência luminosa visto em diferentes situações.



Fonte: [http://fap.if.usp.br/~vannucci/2014\\_FisicaIV\\_EngEletrica\\_Aula%205.pdf](http://fap.if.usp.br/~vannucci/2014_FisicaIV_EngEletrica_Aula%205.pdf)

As cores que vemos formadas em manchas de óleo, ou em bolhas de sabão flutuando sobre a superfície da água são exemplos de interferência luminosa em películas finas, ou delgadas onde as cores mais brilhantes representam aqueles comprimentos de onda que interferiram construtivamente. Essa interferência ocorre devido a luz ser refletida em diferentes superfícies da película formada sobre a água, este efeito é conhecido como interferência em filmes finos ou películas delgadas.

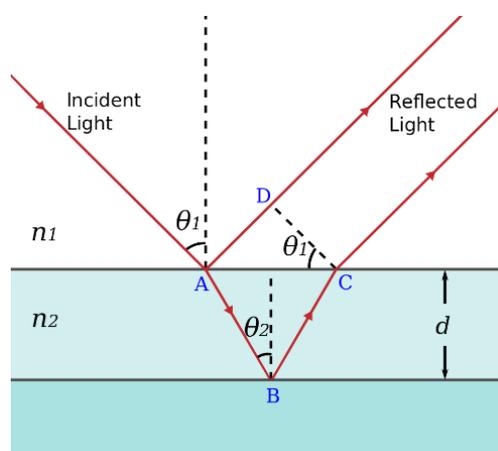
Os efeitos produzidos pela interferência luminosa são perceptíveis quando a luz interage com algo que tenha dimensões da mesma ordem do comprimento de onda da luz produzida. Uma película delgada trata-se de uma superfície que possui espessura menor do que algumas vezes o comprimento de onda associado a luz.

É interessante observar que quando analisamos o padrão de interferência formado pelas películas da anterior, observamos que diferentes películas irão produzir padrões de cores diferentes. Isto ocorre, pois, cada cor está indiretamente associado a um comprimento de onda  $\lambda$  e para que ocorra interferência existe uma relação de dependência entre o comprimento de onda e o tamanho do objeto envolvido na situação. Logo, para

películas diferentes é esperado que sejam formados padrões diferentes de interferência luminosa.

Para entendermos como ocorre a reflexão em uma película fina, tomemos como exemplo a figura 10 que representa o comportamento da luz ao incidir sobre essa película. Podemos notar que ao incidir sobre o filme, a luz sofre reflexão nas partes superior e inferior da superfície. O raio de luz que incidiu sobre o filme é parcialmente refletido na superfície superior, sendo o restante da luz transmitida para o interior do filme. A luz que foi transmitida após percorrer um caminho óptico igual a duas vezes a espessura do filme e ter sido refletida na parte inferior da superfície retorna ao meio do qual foi emitida.

Figura 18: Reflexão de raios luminoso ao incidirem em uma película fina.



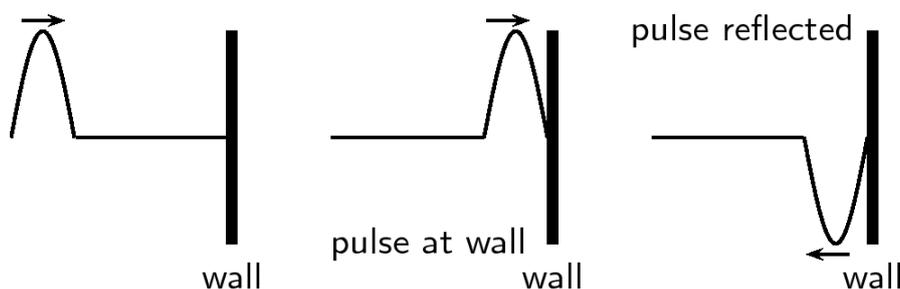
Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film\\_interference#/media/File:Thin\\_film\\_interference.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_interference#/media/File:Thin_film_interference.svg)

Como podemos notar, o raio que atravessou o filme percorreu uma distância maior que o raio refletido na primeira superfície, essa diferença de caminhos percorrido pelos dois raios luminosos pode ter produzido ou não uma defasagem entre os dois raios luminosos. Porém, para filmes de espessura muito pequena, como é o caso observado das bolhas de sabão e manchas de óleo, a diferença de caminhos é insignificante ao ponto de não produzir uma defasagem entre as duas ondas luminosas. A resposta para explicar a interferência observada neste tipo de situação decorre do fato de a luz ao ser refletida sofre uma mudança de fase.

## 2.6 Mudança de fase em uma reflexão luminosa

Em nossos estudos sobre os fenômenos ondulatórios, foi analisado a reflexão, que ocorria em ondas mecânicas e eletromagnéticas. Observando a reflexão sofrida por ondas mecânicas, como aquelas produzidas em uma corda, tínhamos uma situação onde após a reflexão o pulso que foi emitido sofria uma defasagem em  $180^\circ$  em relação ao pulso inicial, como representado na figura 11.

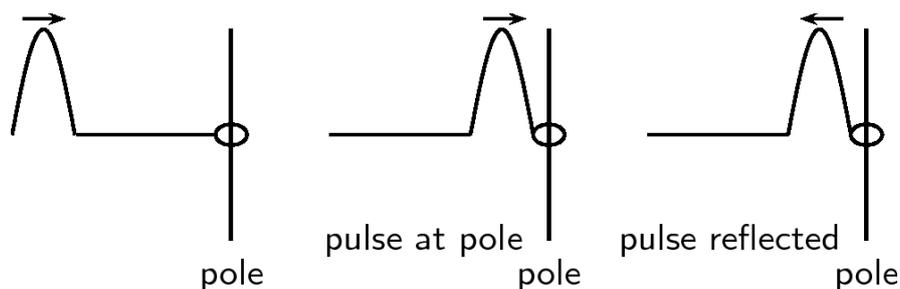
Figura 19: Reflexão de um pulso que se propaga em uma corda com uma de suas extremidades fixas.



Fonte: <https://www.jobilize.com/course/section/investigation-reflection-of-a-pulse-from-a-fixed-end-by-openstax>

Isto ocorria para o caso onde uma das extremidades da corda fosse fixa. Caso a extremidade fosse livre para se mover, o pulso refletido não sofria uma defasagem, retornando com a mesma fase inicial.

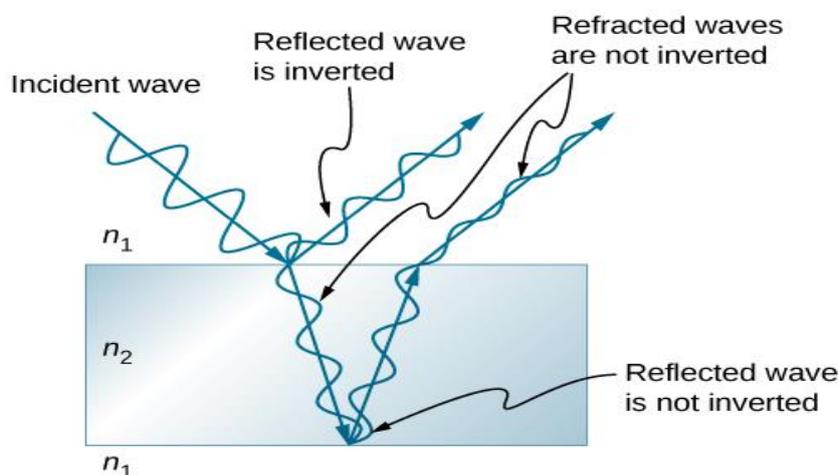
Figura 20: Reflexão de um pulso que se propaga em uma corda com uma de suas extremidades livres.



Fonte: <https://www.jobilize.com/course/section/investigation-reflection-of-a-pulse-from-a-fixed-end-by-openstax>

Se tratando de ondas eletromagnéticas, como a luz, também temos o mesmo efeito sendo produzido. Porém para que a luz sofra uma defasagem em relação a sua fase inicial é necessário que ela sofra uma mudança em seu meio de propagação de tal maneira que ela passe a se propagar em um meio cujo índice de refração seja maior que o índice do meio de origem. Quando isso ocorre temos uma inversão de fase igual a  $180^\circ$  ou  $\pi$  radianos em sua fase.

Figura 21: Reflexão de uma onda em uma película delgada.



Fonte: <https://bityli.com/6xnCK>

Para o caso de a luz estar passando para um meio onde o índice de refração é menor do que o meio de origem não ocorrerá uma defasagem em sua fase inicial. A mudança de fase devido a reflexão é equivalente a  $\pm \lambda/2$  do caminho óptico percorrido pela luz no interior da película. Assim, os raios de luz refletidos nas superfícies representados na figura anterior apresentando uma defasagem de  $\lambda/2$ .

Se os raios luminosos apresentam uma diferença de fase de  $\lambda/2$ , ocorre uma interferência destrutiva para todos os comprimentos de onda, assim, a bolha de sabão é totalmente escura. A espessura da bolha e a diferença entre os caminhos ótico entre os dois raios são fatores que influenciam diretamente a interferência ali produzida. Para o caso de um raio de luz incidir perpendicularmente à superfície, haverá uma diferença de caminhos percorrido pelos dois raios de  $2d$ , onde  $d$  é a espessura da película. Quando esta distância é um múltiplo inteiro, ou múltiplo de metade do comprimento de onda no meio, interferência construtiva ou destrutiva é observada.

Para calcularmos o comprimento de onda no outro meio podemos utilizar a relação que segue

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (2.7)$$

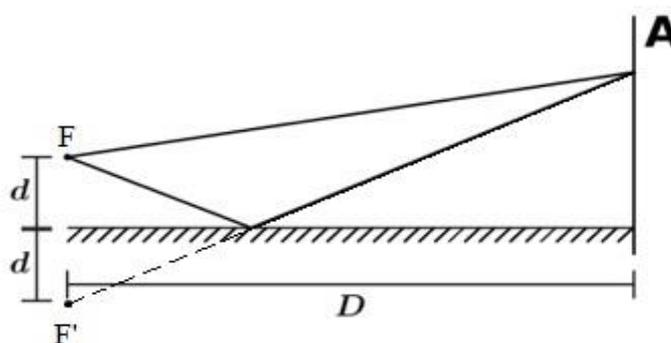
onde  $\lambda$  é o comprimento de onda no vácuo e  $n$  representa o índice de refração do meio.

## 2.7 Sugestão de experimento para interferência luminosa

### 2.7.1 O espelho de “Lloyd”.

Produzido por *Humphrey Lloyd*, o espelho de Lloyd é um modelo simplificado para se obter padrões de interferência luminosa utilizando apenas uma única fonte de luz.

Figura 22: Representação do experimento apresentado por Lloyd com fonte virtual.



Fonte: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v34n4/a10v34n4.pdf> - Adaptado

Na figura 14 temos uma representação de seu experimento, onde no ponto F temos uma fonte luminosa, um espelho plano e um anteparo, a fonte luminosa é colocada em direção ao espelho de modo que as ondas possam atingirem o espelho e chegarem ao ponto A. Como sendo uma propriedade dos espelhos planos, teremos a formação de uma imagem virtual (F') na mesma vertical que passa pela fonte luminosa e a mesma distância (d) de um ponto comum a ambos. Assim, a onda pode atingir o ponto P tanto pela trajetória direta FA como pela trajetória indireta envolvendo a reflexão no espelho F'A. O raio refletido atinge o anteparo como se fosse originado em uma fonte em A' localizado sob o espelho. O que realmente acontece na prática é a formação de padrões de interferências, contudo eles aparecem de forma invertida quando comparados ao de Young e apenas na metade superior, por conta do espelho. Isso ocorre porque as fontes em F e em F' diferem em  $\pi$  rad ( $180^\circ$ ) ou  $\lambda/2$  na fase. Essa mudança de fase de  $\pi$  rad é produzida na reflexão.

### **Material necessário para a prática**

- Laser diodo
- Peça de vidro transparente (também pode ser utilizado um pedaço de espelho)
- Fita adesiva

### **Montagem do Experimento e Procedimento**

A montagem do experimento é feita do seguinte modo, inicialmente deveremos retirar a ponta do laser, tendo o cuidado para não danificar o aparelho, para que tenhamos uma fonte luminosa divergente. Uma vez retirado a ponta do laser, precisaremos fazer com que ele fique ligado continuamente, isto pode ser feito utilizando pedaços de fita, pregador, ou qualquer tipo de material que mantenha o botão do laser pressionado. Com o espelho, ou vidro apoiado em uma mesa, ou em alguma superfície de modo que ele não seja afetado por possíveis vibrações, deveremos colocar o laser distante do espelho e apontarmos o laser em direção a ele. Recomendasse que o ângulo formado entre o laser e

a normal do espelho seja um ângulo com grande valor haja vista que para grandes ângulos de incidência quase toda a luz é refletida.

Figura 23: Material utilizado para a experiência (vidro transparente e laser).



Fonte: Autor.

Ao direcionarmos o conjunto para um anteparo separado a alguma distância poderemos observar a formação de padrões de interferência, conforme a Figura 15

Figura 24: Padrão de interferência luminosa obtida através do vidro transparente.



Fonte: Autor

### 2.7.2 Interferência em películas delgadas

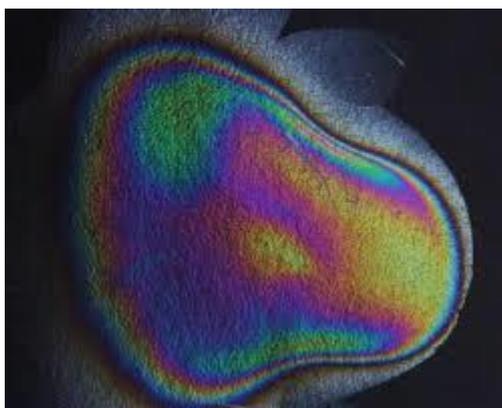
### Material necessário para a prática

- Água
- Bacia
- Sabão ou óleo diesel (pequena quantidade)

### Montagem do Experimento e Procedimento

A montagem do experimento é feito da maneira que se segue. Inicialmente deve ser observado se existe alguma impureza ou sujeira presentes na água ou recipiente, caso existam, deverão ser retirados/limpos. Em um local aberto, onde ocorre a incidência de raios luminosos deverá ser colocado o recipiente e em seu interior adicionado a água até que se tenha preenchido completamente a base do recipiente. Sobre a água devem ser pingadas pequenas gotas de óleo diesel.

Figura 25: Padrões de interferência formado em manchas de óleo.



Fonte: [https://hu.m.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Interferencia\\_lakkretegen2.jpg](https://hu.m.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Interferencia_lakkretegen2.jpg)

Espera-se que após este processo seja possível observar a formação de manchas coloridas, conforme apresentado pela figura 17.

Figura 26: Padrões de interferência luminosa formada em uma bolha de sabão.



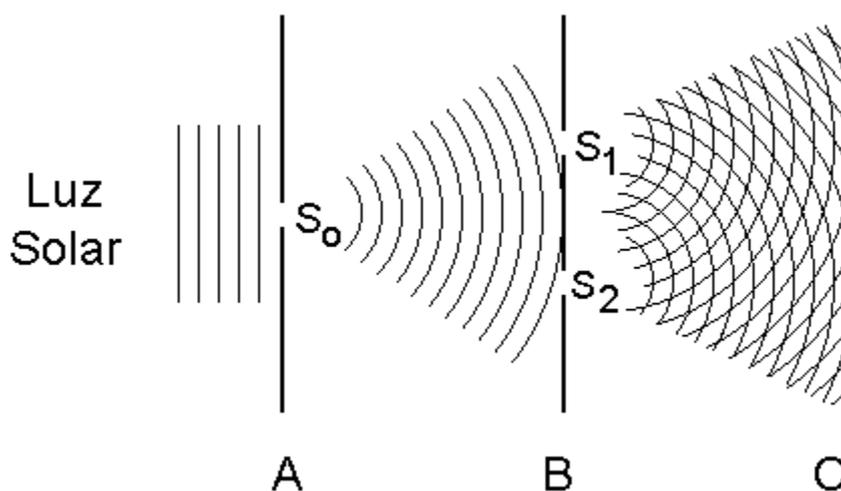
Fonte: <https://www.tecnologia-informatica.com/el-mejor-editor-de-fotos/> - Adaptado

Para o caso de serem utilizadas bolhas de sabão, o sabão pode ser misturado junto a água presente no recipiente.

Para facilitar a formação de bolhas de sabão pode ser utilizado um canudo de plástico para formar as bolhas.

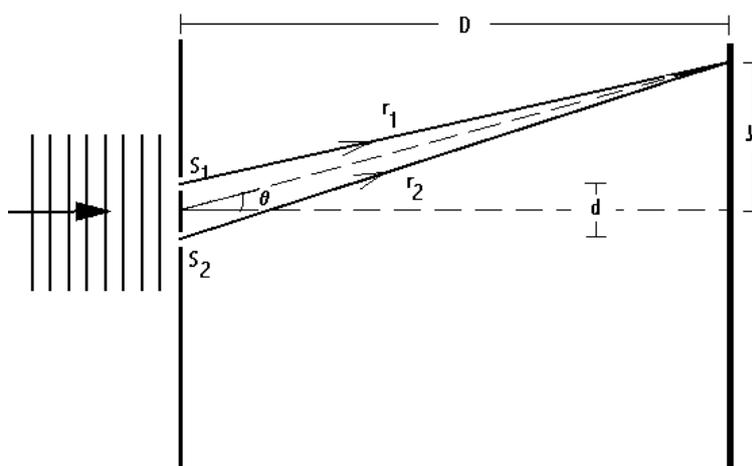
## 2.8 Exercícios propostos

1. Na experiência de fenda dupla, de Young, usando, em laboratório, uma fonte de luz monocromática, por que o anteparo A na figura abaixo é necessário?



2. Se a fonte de luz é um feixe de laser, não necessitamos do equivalente da tela A da figura acima. Por quê?

3. Cobrindo-se uma das fendas da figura abaixo, que alteração resultará na intensidade luminosa do centro do anteparo?



5. Somos banhados continuamente pela radiação eletromagnética proveniente do Sol, dos sinais de rádio e TV, das estrelas e de outros corpos celestes. Por que estas ondas não interferem umas nas outras?

6. Por que uma película (bolha de sabão, mancha de óleo, etc.) tem que ser "delgada" para que apresente efeitos de interferência? Será que ela precisa mesmo ser delgada? O que significa delgada?

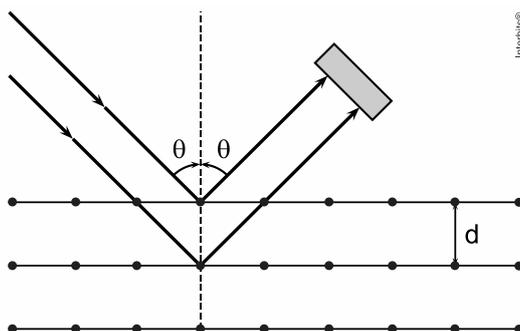
7. Janelas comuns de armazéns e residências refletem a luz vinda de suas superfícies planas interior e exterior. Por que então não vemos efeitos de interferência?

8. Um automóvel dirige a luz de seus faróis para o lado de um celeiro. Por que não se produzem franjas de interferência na região onde a luz proveniente dos dois feixes se combinam?

9. Uma película de água e sabão sustentada por uma espira de arame no ar parece escura em sua parte mais fina quando vista pela luz refletida. Por outro lado, uma fina camada de óleo flutuando na água parece clara em sua parte mais fina quando vista, da mesma forma, de cima, no ar. Explique estes fenômenos.

10. A experiência de Young é executada com luz azul-esverdeada de comprimento de onda 500 nm. A distância entre as fendas é 1,20 mm e a tela de observação está a 5,40 m das fendas. Qual é o espaçamento entre as franjas claras?

11. Com um certo material, cujas camadas atômicas interdistam de uma distância  $d$ , interage um feixe de radiação que é detectado em um ângulo  $\theta$  conforme a figura. Tal experimento é realizado em duas situações: (I) o feixe é de raios X monocromáticos, com sua intensidade de radiação medida por um detector, resultando numa distribuição de intensidade em função de  $\theta$ , com valor máximo para  $\theta = \alpha$ , e (II) o feixe é composto por elétrons monoenergéticos, com a contagem do número de elétrons por segundo para cada ângulo medido, resultando no seu valor máximo para  $\theta = \beta$ . Assinale a opção com possíveis mudanças que implicam a alteração simultânea dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  medidos.



- Aumenta-se a intensidade do feixe de raio X e diminui-se a velocidade dos elétrons.
- Aumenta-se a frequência dos raios X e triplica-se o número de elétrons no feixe.
- Aumentam-se o comprimento de onda dos raios X e a energia cinética dos elétrons.
- Dobram-se a distância entre camadas  $d$  (pela escolha de outro material) e o comprimento de onda dos raios X. Além disso, diminui-se a velocidade dos elétrons pela metade.
- Diminui-se a intensidade dos raios X e aumenta-se a energia dos elétrons.

12. A figura I, abaixo, representa esquematicamente o experimento de Young. A luz emitida pela fonte  $F$ , ao passar por dois orifícios, dá origem a duas fontes de luz  $F_1$  e  $F_2$ , idênticas, produzindo um padrão de interferência no anteparo  $A$ . São franjas de

interferência, compostas de faixas claras e escuras, decorrentes da superposição de ondas que chegam no anteparo.

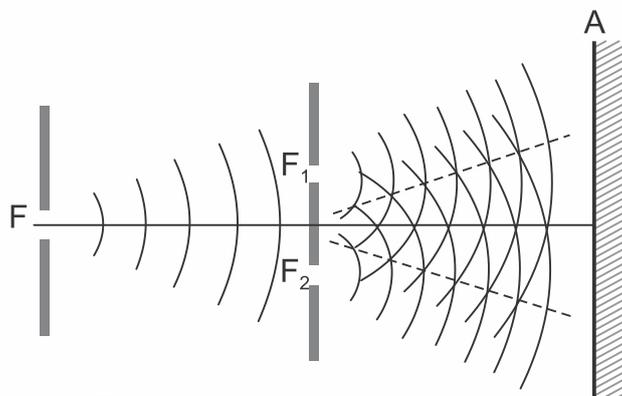


Figura I

A figura II, abaixo, representa dois raios de luz que atingem o anteparo no ponto P. A onda oriunda do orifício  $F_1$  percorre uma distância maior que a onda proveniente do orifício  $F_2$ . A diferença entre as duas distâncias é  $\Delta L$ .

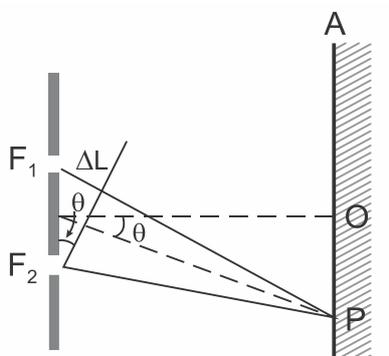


Figura II

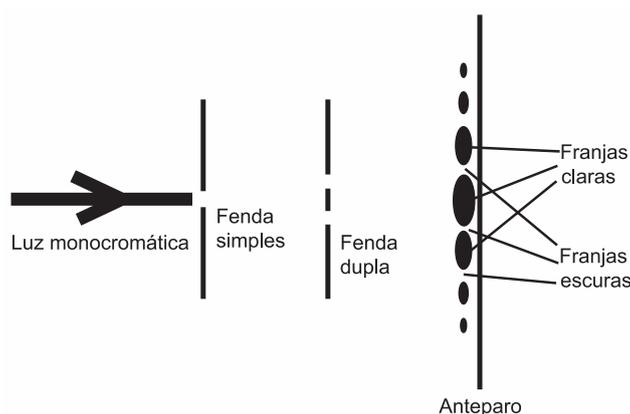
Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do enunciado abaixo, na ordem em que aparecem.

Se, no ponto P, há uma franja escura, a diferença  $\Delta L$  deve ser igual a um número \_\_\_\_\_ de comprimentos de onda.

No ponto central O, forma-se uma franja \_\_\_\_\_ decorrente da interferência \_\_\_\_\_ das ondas.

- a) inteiro – escura – destrutiva
- b) inteiro – escura – construtiva
- c) inteiro – clara – construtiva
- d) semi-inteiro – escura – destrutiva
- e) semi-inteiro – clara – construtiva

13. O debate a respeito da natureza da luz perdurou por séculos, oscilando entre a teoria corpuscular e a teoria ondulatória. No início do século XIX, Thomas Young, com a finalidade de auxiliar na discussão, realizou o experimento apresentado de forma simplificada na figura. Nele, um feixe de luz monocromática passa por dois anteparos com fendas muito pequenas. No primeiro anteparo há uma fenda e no segundo, duas fendas. Após passar pelo segundo conjunto de fendas, a luz forma um padrão com franjas claras e escuras.



SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n. 1, 2007 (adaptado).

Com esse experimento, Young forneceu fortes argumentos para uma interpretação a respeito da natureza da luz, baseada em uma teoria

- a) corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e refração.
- b) corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e reflexão.
- c) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e polarização.
- d) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer interferência e reflexão.

e) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e interferência.

14. *As fibras ópticas são feitas de vidro óptico extremamente puro. Costumamos achar que uma janela de vidro é transparente. Entretanto, quanto mais espesso for o vidro, menos transparente ele será em razão das impurezas nele contidas. O vidro de uma fibra óptica possui, porém, menos impurezas que o vidro usado em janelas. Segue a descrição da qualidade do vidro produzido por uma companhia: se você estivesse sobre um oceano feito de quilômetros de núcleo sólido de fibra de vidro, poderia ver claramente o fundo. Fazer fibras ópticas requer as seguintes etapas: elaborar um cilindro de vidro pré-formado; estirar as fibras a partir da pré-forma; e testar as fibras.*

Fonte: <http://tecnologia.hsw.uol.com.br/fibras-opticas5.htm>, acessado em: 14 de julho de 2016.

Durante a fase de estiramento das fibras, é necessário haver um controle da espessura dos fios de fibra óptica fabricados. Para isso, suponha que uma montagem experimental é configurada, utilizando-se um laser com comprimento de onda de 650 nm que incide sobre o fio de fibra óptica, com um revestimento opaco, conforme ilustra a Figura 1. Após passar pelo fio, o feixe de laser forma um padrão de difração em um anteparo instalado a 2,0 m de distância do fio. A representação esquemática desse padrão está mostrada na Figura 2.

Figura 1

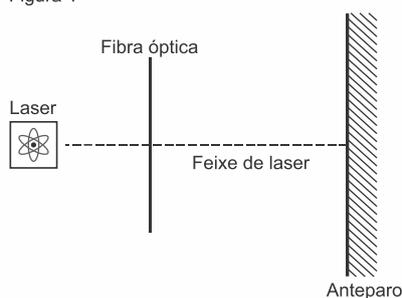
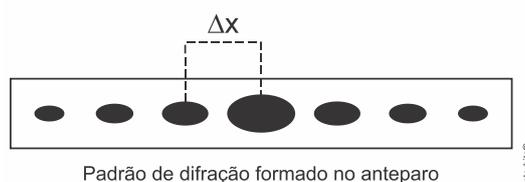


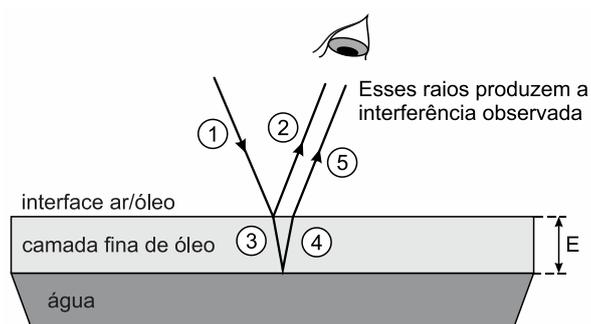
Figura 2



Sabendo-se que a separação entre os máximos de intensidade luminosa,  $\Delta x$ , é 1,0 cm, qual é o valor do diâmetro do fio?

- a) 65  $\mu\text{m}$
- b) 130  $\mu\text{m}$
- c) 260  $\mu\text{m}$
- d) 390  $\mu\text{m}$
- e) 520  $\mu\text{m}$

15. Certos tipos de superfícies na natureza podem refletir luz de forma a gerar um efeito de arco-íris. Essa característica é conhecida como iridescência e ocorre por causa do fenômeno da interferência de película fina. A figura ilustra o esquema de uma fina camada iridescente de óleo sobre uma poça d'água. Parte do feixe de luz branca incidente (1) reflete na interface ar/óleo e sofre inversão de fase (2), o que equivale a uma mudança de meio comprimento de onda. A parte refratada do feixe (3) incide na interface óleo/água e sofre reflexão sem inversão de fase (4). O observador indicado enxergará aquela região do filme com coloração equivalente à do comprimento de onda que sofre interferência completamente construtiva entre os raios (2) e (5), mas essa condição só é possível para uma espessura mínima da película. Considere que o caminho percorrido em (3) e (4) corresponde ao dobro da espessura  $E$  da película de óleo.



Disponível em: <http://2011.igem.org>. Acesso em: 18 nov. 2014 (adaptado).

Expressa em termos do comprimento de onda ( $\lambda$ ), a espessura mínima é igual a

- a)  $\frac{\lambda}{4}$ .
- b)  $\frac{\lambda}{2}$ .

c)  $\frac{3\lambda}{4}$ .

d)  $\lambda$ .

e)  $2\lambda$ .

### 3 DIFRAÇÃO DA LUZ

Considerado por alguns pesquisadores como sendo um dos primeiros físicos a sugerir a ideia de que a luz possuía um comportamento ondulatório, *Francesco Grimaldi* foi o responsável por descobrir e analisar um fenômeno associado à luz chamado difração.

O experimento produzido por Grimaldi para descobrir este fenômeno é descrito por *Florian Cajori* em seu livro *History of Physics* ((New York: Macmillan, 1898, p. 88). Ele introduziu um feixe de luz em uma sala escura. A sombra formada por um objeto colocado diante do feixe de luz foi projetada sobre uma superfície clara. Para a sua surpresa, ele encontrou a sombra mais ampla do que a projeção geométrica da mesma; além disso, era delimitada por uma, duas, e às vezes três faixas coloridas.

Figura 27: Padrões de difração da luz observado através de uma pequena fenda.



Fonte: <https://wondersphysics.wiscweb.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/219/2017/05/Difrnbw2.jpg>

No tópico sobre interferência da luz, vimos que é necessário que existam duas fontes de luz para que a interferência ele ocorra. Porém, ao observamos o padrão para a sombra projetada na parede no experimento produzido por *Grimaldi*, temos apenas uma única fonte de luz e ainda sim é possível observamos um padrão que representa o mesmo tipo de padrão observável para a interferência luminosa. Como pode isso acontecer? A chave para entendermos o porquê destes padrões serem observáveis está no *Princípio de Huygens*.

Segundo, Huygens:

Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo  $t$ , a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias. (Fundamentos da Física, Volume 2, 10. Ed – Rio de Janeiro: LTC, 2016, p.180)

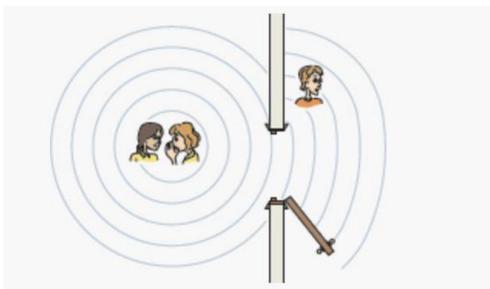
Sendo assim, ao analisarmos o feixe luminoso utilizado por *Grimaldi* originado de uma fenda não temos apenas uma onda, mas sim um número infinito de pontos que se comportam como fontes de ondas secundárias. Essas ondas ao encontrarem um obstáculo se espalham podendo interagirem umas com as outras, resultando assim em um padrão de interferência mesmo sem a presença de uma segunda fonte luminosa. Este tipo de interferência é chamado de difração.

Uma outra maneira de entendermos a difração é assumindo que as fendas, como as utilizadas na interferência luminosa, possuem uma largura que é finita. Quando estudamos a interferência produzida por duas fendas foi possível analisar a posição de cada uma das fendas em relação a um determinado eixo. Entretanto, as larguras destas eram consideradas insignificantes e desprezadas para efeito de cálculo. Contudo, dependendo do tamanho da largura das fendas, cada ponto ao longo da abertura pode ser considerado uma fonte pontual de luz. Analisando objetos encontrados ao nosso redor, observamos que a grande maioria possui aberturas finitas, ou do contrário nenhuma luz poderia penetrar naquele objeto. É devido a difração da luz que existem limitações relacionados a à capacidade de observamos imagem ou objeto, tais limitações serão comentadas posteriores.

### **3.1 Difração ocorrida em uma fenda única**

Quando uma onda passa por uma fenda (abertura), a direção de propagação dessa onda tende a sofrer uma mudança. Exemplo dessa mudança em sua direção de propagação é observável quando uma onda sonora atinge os ouvidos de um ouvinte que se encontra no interior de uma sala com a porta aberta. Embora, não necessariamente o ouvinte consiga vê a fonte que está produzindo aquele som, este consegue ouvir o som emitido por ela.

Figura 28: Difração de uma onda sonora ao encontrar uma fenda.



Fonte: <https://i.pinimg.com/originals/af/23/e6/af23e6fd81e636d79422495af0a62c1a.jpg>

De maneira análoga, temos as ondas do mar se propagando do oceano em direção a terra, ao passarem por uma abertura (obstáculo), um quebra mar por exemplo, sofrem uma mudança em sua direção de propagação.

Figura 29: Difração de ondas em uma baía.

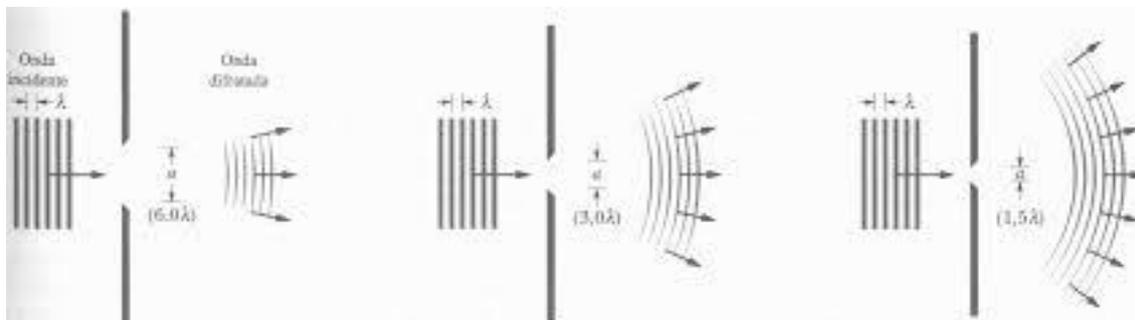


Fonte: <https://culturacientifica.com/app/uploads/2019/01/difracci%C3%B3n-1.jpg>

Os dois casos apresentados anteriormente são exemplos de difração de ondas, que pode ser entendida também como um desvio sofrido na direção de propagação de uma onda ao passar por um obstáculo. Para que esses desvios em sua direção de propagação sejam possíveis de serem observados é necessário que uma condição ocorra, qual seja, a de que o comprimento da onda produzida seja da mesma ordem de grandeza do obstáculo (fenda) que ela encontra. Quando tomamos como exemplo a luz visível, temos que o seu comprimento de onda está entre 370 nm e 750 nm, sendo assim, para que tenhamos um desvio na trajetória da luz é necessário que ela encontre um obstáculo com a mesma ordem de tamanho. Como é de se esperar, a grande maioria dos objetos que a luz atinge

possui dimensões muito maiores que a do seu comprimento de onda, sendo assim a difração sofrida por ela não é tão significativa.

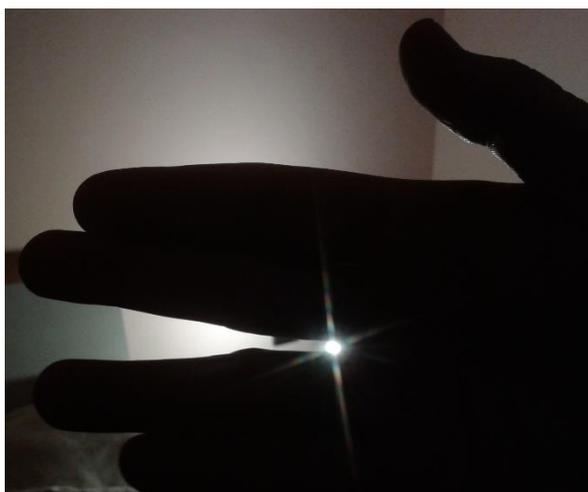
Figura 30: Difração de ondas em diferentes fendas.



Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQsEsjpNufEtx483lSkjZR\\_JajwCaHxtjFzvg&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQsEsjpNufEtx483lSkjZR_JajwCaHxtjFzvg&usqp=CAU)

Todavia, existem situações onde a difração ocorre, para isso devemos ter um obstáculo pequeno o suficiente para que a luz possa ser difratada. Um exemplo simples que podemos utilizar para observar esse fenômeno é utilizando uma de nossas mãos. Ao olharmos para uma lâmpada com os dedos praticamente fechados é possível observarmos a luz sendo difratada, veremos linhas claras e escuras através deles.

Figura 31: Difração luminosa entre as frestas formada pelos dedos.



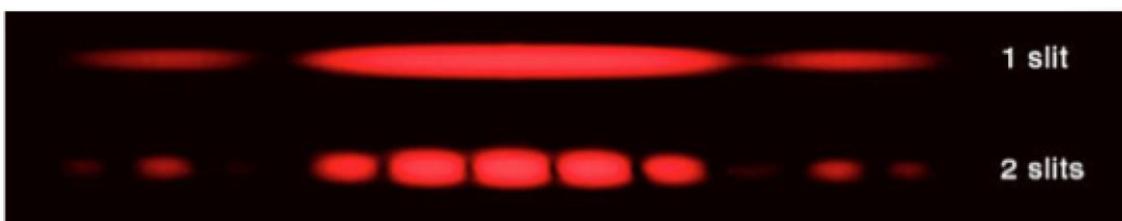
Fonte:

[https://www.researchgate.net/profile/Umberto\\_Prisco/publication/271213250\\_Diffraction\\_through\\_a\\_finger\\_slit/data/54c27dfa0cf2911c7a489404/prisco-1.jpg](https://www.researchgate.net/profile/Umberto_Prisco/publication/271213250_Diffraction_through_a_finger_slit/data/54c27dfa0cf2911c7a489404/prisco-1.jpg)

### 3.2 Padrão de difração em uma fenda única

O padrão de difração formado em uma única fenda quando analisado, apresenta uma diferença em relação ao padrão observado quando temos duas fendas sendo difratadas pela luz. A figura 24 representa o padrão encontrado para uma única fenda e para duas fendas.

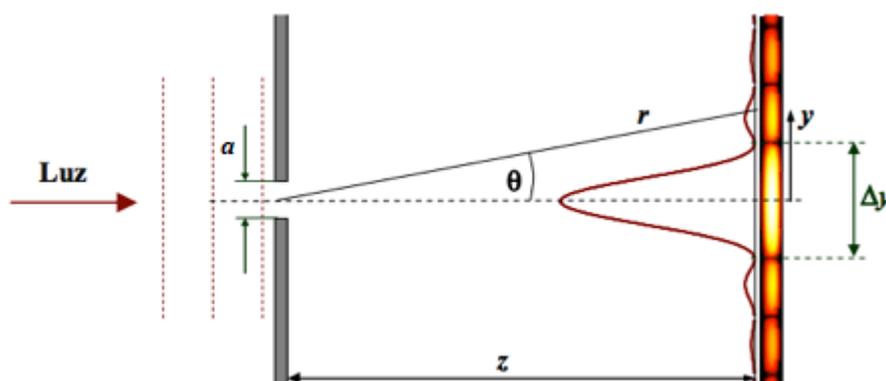
Figura 32: Padrões de difração em uma e duas fendas.



Fonte: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1645095/mod\\_page/content/7/fig\\_3\\_4.png](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1645095/mod_page/content/7/fig_3_4.png)

É possível notar que o padrão observável para uma única fenda apresenta em seu centro um máximo que tem uma largura maior e que rapidamente perde sua intensidade quando comparado aos outros máximos em cada um de seus lados. Já o padrão observado para duas fendas produz máximos uniformemente espaçados na região central e lentamente sua intensidade diminui em cada um dos lados.

Figura 33: Padrão de difração em uma fenda.



Fonte: [https://eadcampus.spo.ifsp.edu.br/pluginfile.php/136016/mod\\_label/intro/fenda1.png](https://eadcampus.spo.ifsp.edu.br/pluginfile.php/136016/mod_label/intro/fenda1.png)

Para determinarmos as posições angulares das franjas escuras produzidas pela difração pode ser útil usar a expressão:

$$a \cdot \text{sen}\theta = m \cdot \lambda, \text{ para } m = 1, 2, 3 \dots (\text{mínimos}) \quad (3.1)$$

onde  $a$  representa a largura da fenda,  $\theta$  é o ângulo relativo a direção original do raio luminoso e  $m$  é a ordem da franja encontrada.

Para determinarmos a distância entre duas franjas escuras, iremos fazer a seguinte aproximação, para ângulos  $\theta$  muito pequenos teremos que

$$\text{sen}\theta \approx \theta \quad (3.2)$$

Ao fazermos isto, teremos que a distância entre duas franjas escuras, pode ser obtida através da expressão:

$$\Delta\theta = (m_2 - m_1) \cdot \frac{\lambda}{a} \quad (3.3)$$

E para o caso de duas franjas adjacentes, a expressão anterior fica:

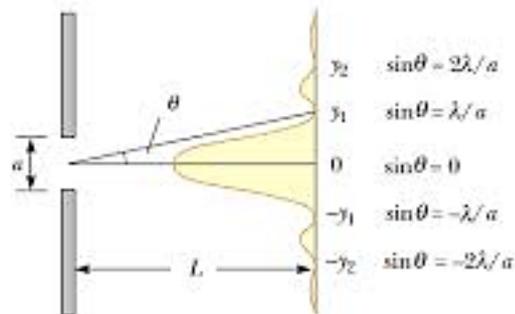
$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{a} \quad (3.4)$$

Com essas equações temos informações para identificarmos as posições angulares das franjas escuras e distâncias entre elas. Para determinarmos a posição das franjas em relação ao centro do anteparo, usaremos a aproximação abaixo para o triângulo PQR formado na figura.

$$\text{sen } \theta \approx \text{tg } \theta \approx \theta = \frac{y}{z} \quad (3.5)$$

Figura 34: Construção geométrica para a difração.





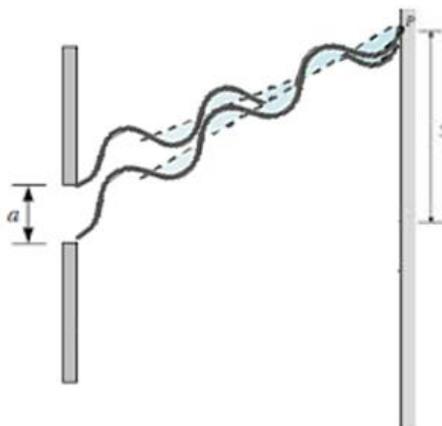
Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTo\\_WpAmSqnltEJ\\_1dJ3iTR6qGIEGFrDo4zPQ&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTo_WpAmSqnltEJ_1dJ3iTR6qGIEGFrDo4zPQ&usqp=CAU)

Em termos práticos para calcularmos a intensidade luminosa produzida pelo padrão descrito anteriormente usaremos a expressão

$$I = I_0 \cdot \left( \frac{\text{sen}(\phi / 2)}{\phi / 2} \right)^2 \quad (3.8)$$

com  $I_0$  igual a intensidade luminosa da franja central e  $\phi$  representando a diferença de fase entre o raio luminoso do topo da fenda e o da base da fenda.

Figura 36: Raios luminosos atingindo um anteparo.



Fonte: Autor

### 3.3 Difração ocorrida em uma fenda dupla

Em nosso estudo sobre a interferência de dupla fenda de Young, nós ignoramos os efeitos de difração ocorridos em cada uma das fendas. Assumindo que as fendas eram pequenas ao ponto de produzirem no anteparo apenas uma interferência luminosa devido a existência das duas fontes de luz. Como não havíamos estudado ainda esse fenômeno chamado difração fazia sentido analisarmos apenas a ocorrência de uma interferência luminosa. Todavia, é possível ver que naquelas fendas também ocorrerão efeitos de difração. Ao levarmos em conta a ocorrência da difração, iremos notar que é preciso tomar um cuidado maior com relação a real descrição do experimento da dupla fenda. Este estudo será realizado neste tópico.

Para conseguirmos calcular a difração sofrida em cada uma das fendas, podemos utilizar de maneira generalizada o método utilizado para explicar o caso de uma fenda simples. Assumiremos que aquela frente de onda que chega até cada uma das fendas irá produzir um efeito de tal maneira, que, em cada uma das fendas teremos ali fontes pontuais que irão produzir novas frentes de ondas a partir daquele ponto. Analisando a superposição de cada uma dessas ondas originadas através das fendas encontraremos os valores de intensidade e os padrões de interferência produzidos no anteparo entendendo que ali também acontece o fenômeno da difração.

### 3.4 Padrão de Difração em uma Fenda Dupla

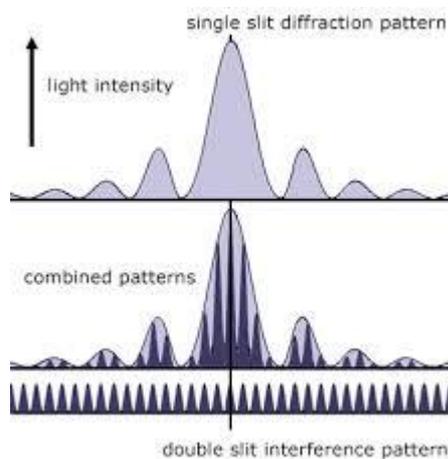
O padrão de difração formado por uma dupla fenda separadas por uma distância  $d$  é dada pela interferência produzida por uma fenda dupla também separadas por uma distância  $d$  acrescido do padrão de difração produzido por cada uma dessas fendas. De modo geral, teremos que a posição angular das franjas é dada pela expressão

$$d \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda \quad (3.9)$$

Embora consideremos que em cada uma das fendas tenhamos fontes pontuais de ondas, devido ao efeito da difração a intensidade de cada uma dessas ondas ao atingir pontos diferentes do anteparo é reduzida. No tópico sobre interferência luminosa havíamos obtido uma expressão para calcular as posições das franjas, assim como fizemos para a difração de fenda simples. Ao analisarmos o caso da difração de fendas dupla seria interessante utilizarmos as duas expressões para obtermos o padrão resultante para esta situação.

A interferência e a difração produzida pelas duas fendas irão produzir no anteparo padrões diferentes, que ao serem combinados resultará no padrão obtido pela difração em fendas dupla.

Figura 37: Padrão de interferência em uma e duas fendas.



Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcRBny-1S-5Fzwjwo\\_xJAwQ0HHtUBdT2xHW7cw&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcRBny-1S-5Fzwjwo_xJAwQ0HHtUBdT2xHW7cw&usqp=CAU)

### 3.5 Rede de Difração

Considerada uma importante ferramenta em análises ópticas, as redes de difração são exemplos modernos de instrumentos que são utilizados no lugar de uma dupla fenda. Uma rede de difração é formada por um conjunto bastante grande de fendas muito estreitas e paralelas umas às outras, separadas por uma distância  $d$ .

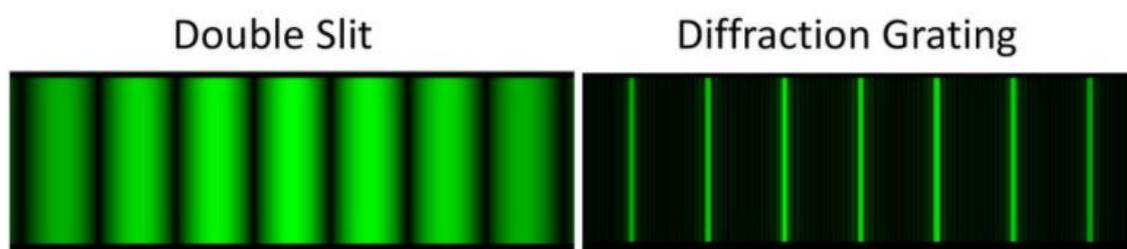
Figura 38: Rede de difração.



Fonte: <https://abcescolar.pt/wp-content/uploads/2017/06/Rede-de-difraccao-fisica-abc-escolar-fisica-abc-escolar.jpg>

Analisando as redes de difração é possível notar que diferente do que tínhamos visto até então, teremos agora as ondas sofrendo difração e interferência não apenas por uma, ou duas fendas, mas por um número  $N$  de fendas. Quando isso acontece será possível observar a formação de padrões de interferência onde teremos os máximos centrais e um número infinito de máximos secundários sendo intercalados por franjas escuras. Também se nota uma diminuição nos espaçamentos entre as franjas que cada vez mais vão se aproximando uma das outras. Para um número infinito de fendas, os máximos secundários deixam de ser perceptíveis e o que será visto serão apenas os máximos centrais.

Figura 39: Padrão de difração em uma e duas fendas.



Fonte: <https://slideplayer.com/slide/12738819/>

De fato, situação onde tenhamos uma rede de difração com um número infinito de fendas é uma situação atípica para o nosso cotidiano, normalmente as redes de difração que são utilizadas possuem um número enorme de fendas, ao ponto de produzirem um efeito praticamente equivalente ao que se espera ser produzida por uma com número infinito de fendas.

Analisando os padrões apresentados pela rede de difração podemos determinar a posição dos máximos através da expressão:

$$\text{sen}\theta = \frac{m \cdot \lambda}{d} \quad (3.10)$$

Possuindo a rede uma quantidade muito grande de fendas, podemos definir o que podemos chamar de densidade de fendas, representada pela razão entre o número de fendas e o comprimento dela

$$N = \frac{N^\circ \text{ de fendas}}{\text{Comprimento da rede}} \quad (3.11)$$

Podemos definir encontrar uma relação entre  $d$  e  $N$ ,

$$N = \frac{N^{\circ} \text{ de fendas}}{\text{Comprimento da rede}} = \frac{N^{\circ} \text{ de fendas}}{L} \quad (3.12)$$

onde  $L$  pode ser aproximado para  $N \cdot d$ , assim, teremos que:

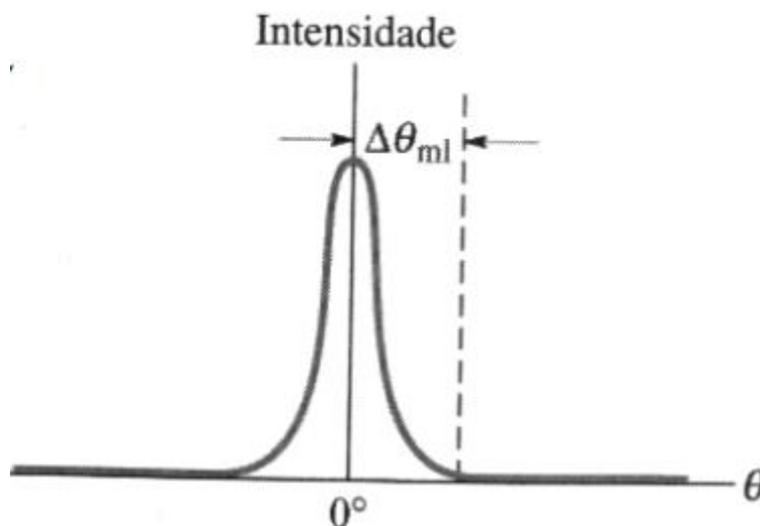
$$N = \frac{N^{\circ} \text{ de fendas}}{N^{\circ} \text{ de fendas} \cdot d} = \frac{1}{d} \quad (3.13)$$

Assim,

$$\text{sen}\theta = N \cdot m \cdot \lambda \quad (3.14)$$

Analisando os padrões para uma rede de difração verifica-se uma relação entre a largura da franja brilhante e a densidade de fendas, para expressar essa relação podemos utilizar a expressão fornecida pela Equação 3.15.

Figura 40: Relação entre a largura da franja brilhante e a densidade de fendas



Fonte: [http://dfnae.fis.uerj.br/twiki/pub/DFNAE/FisicaVIII/FisicaVIII\\_Aula5\\_difracao\\_V02.pdf](http://dfnae.fis.uerj.br/twiki/pub/DFNAE/FisicaVIII/FisicaVIII_Aula5_difracao_V02.pdf)

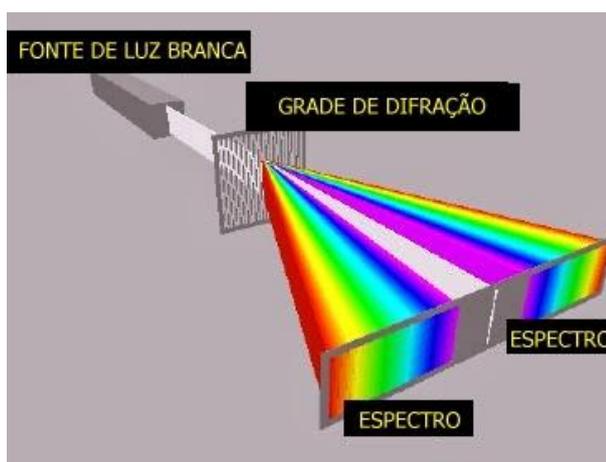
$$\Delta\theta_{mf} \approx \frac{\lambda}{N \cdot d \cdot \cos\theta} \quad (3.15)$$

Como foi comentado no início as redes de difração possuem importantes aplicações em análises ópticas. Elas são instrumentos que podem ser utilizados para estudos de espectroscopia,

análises da dispersão da luz, análises biológicas, dentre outros. Sua vantagem quando comparada a dupla fendas está na capacidade de conseguirem produzir imagens mais nítidas, o padrão produzido apresenta franjas mais brilhantes e estreitas e as regiões de franja escuras são mais escuras.

Na figura temos uma das aplicações de uma rede de difração.

Figura 41: Representação da difração da luz.



Fonte: [https://3.bp.blogspot.com/-I2UyZ3WojB8/UqCH72hWSAI/AAAAAAAAACS0/phocYUnvU9w/s1600/spectrum\\_02.jpg](https://3.bp.blogspot.com/-I2UyZ3WojB8/UqCH72hWSAI/AAAAAAAAACS0/phocYUnvU9w/s1600/spectrum_02.jpg)

### 3.6 SUGESTÃO DE EXPERIMENTO PARA DIFRAÇÃO DA LUZ

#### 3.6.1 Difração da luz em uma lâmina

Como foi estudado por nós nesta unidade, para que a difração sofrida por uma onda ao passar por um obstáculo seja mais acentuada é necessário que o tamanho do obstáculo (fenda) que será atingido pela onda tenha dimensões da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da onda que incide sobre ele. Para que tenhamos uma difração mais acentuada de uma onda sonora, por exemplo, precisamos ter um obstáculo que possua uma ordem de grandeza com valor próximo de  $10^1$  m. A grande maioria dos obstáculos encontrados por uma onda sonora ao longo de sua propagação possibilita a difração desta. Já para a luz, para que tenhamos uma difração mais acentuada é necessário que tenhamos um obstáculo de uma ordem de grandeza próxima de  $10^{-7}$  m. Ao analisar o tamanho que os obstáculos precisam possuir para que tenhamos essa difração mais perceptível é notório que são poucos os objetos que irão possuir estas dimensões.

A seguir será apresentada uma atividade que poderá ser realizada em sala de aula para demonstrar de maneira prática os efeitos produzidos pela difração de onda.

### **Material Necessário**

- Duas lâminas de análises microscópicas (1,00 mm a 1,2 mm de espessura)
- Tinta em spray na cor preta fosca
- Lâmpada incandescente e um suporte
- Lâmina de barbear

### **Montagem do Experimento e Procedimentos**

A ideia do experimento é demonstrar a difração sofrida pela luz ao passar por uma fenda, para isso inicialmente deveremos pintar uma das faces de uma das lâminas utilizando o spray na cor preta fosca. Devemos tomar o cuidado de cobrir totalmente a face da lâmina para impedir a passagem de luz por ela. Também pode ser utilizado ao invés de tinta preta fosca, fita isolante para cobrir uma das faces da lâmina.

Figura 42: Lâmina de vidro coberta com tinta preta.



Fonte: Autor

Com o auxílio da lâmina de barbear deve ser feito um pequeno risco próximo de uma das extremidades da lâmina na direção vertical da face que foi pintada, este risco funcionará como uma fenda simples. Na outra extremidade, caso deseje demonstrar a difração de dupla fenda, pode ser feito dois outros riscos, também na vertical. Após concluído as marcações na lâmina, iremos utilizar a outra lâmina para poder cobrir a face que foi pintada, formando uma espécie de “sanduíche” cuja intenção é a de proteger a face coberta pela tinta.

Figura 43: Lâmina de vidro com uma e duas fendas.



Fonte: Autor

Completo o processo de montagem da lâmina, iremos utilizar a lâmpada como fonte luminosa para poder observar os padrões de difração. Com a lâmpada ligada, iremos segurar a lâmina a uma distância de aproximadamente 60 cm da lâmpada em uma direção paralela a ela. Ao olharmos através da fenda simples para a lâmpada, espera-se que o observador consiga ver um padrão onde teremos a luz decomposta nas cores do arco-íris.

Caso utilizemos as fendas duplas para fazer a observação da lâmpada através destas, o que se espera ser observado são os padrões de interferência luminosa segundo aqueles descritos pelo experimento de dupla fenda de Young.

### 3.6.2 Difração em fio de cabelo

Um experimento de baixo custo e fácil para demonstrarmos a difração sofrida pela luz ao passar por uma pequena fenda é utilizando um fio de cabelo.

#### **Material Utilizado**

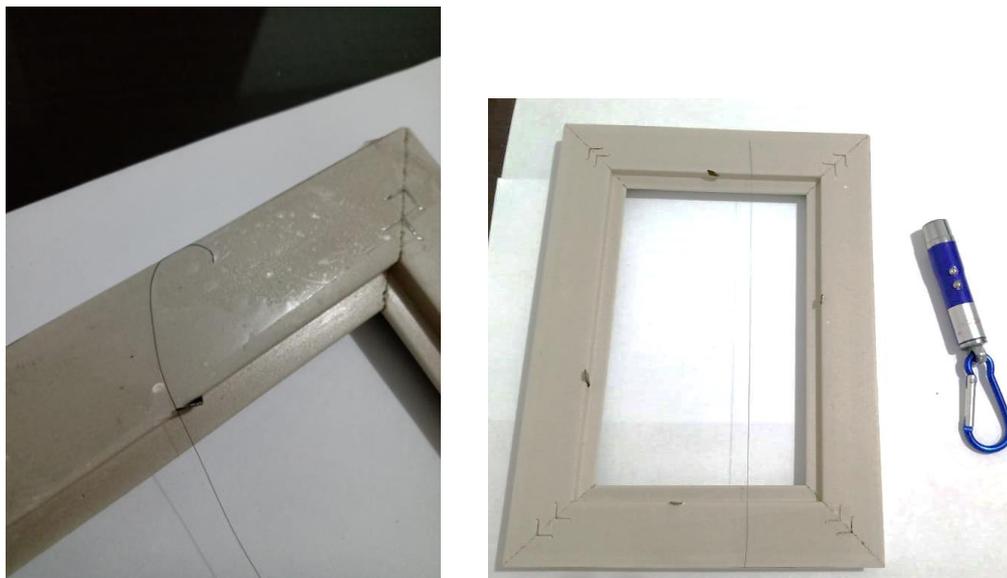
- Fio de cabelo
- Fita adesiva
- Suporte para fixação do fio
- Laser pointer

#### **Montagem do Experimento e Procedimentos**

Utilizando o suporte de fixação, aqui foi utilizado um quadro fotográfico, devemos prender o cabelo nas duas extremidades do suporte fazendo uso da fita adesiva. Devemos ter o cuidado de manter o fio de cabelo o mais tracionado possível.

Figura 36(a): Montagem do experimento com fio de cabelo.

Figura 44(b): Experimento montado.



Fonte: Autor

Com o experimento montado, deveremos colocar o laser na direção horizontal de tal maneira que o centro do laser esteja alinhado com o fio de cabelo. Ao acionarmos o laser se espera que seja possível observar o padrão semelhante ao encontrado na figura 37.

Figura 45: Padrão de difração obtido pelo experimento.



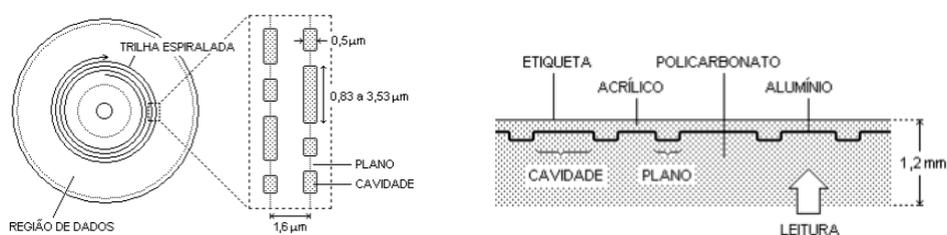
Fonte: Autor

Para uma melhor visualização do padrão de difração luminosa recomenda-se que o suporte seja colocado uma distância considerável do anteparo onde será projetado o padrão. Na situação apresentada a cima foi utilizada uma distância de 3,0 m entre o suporte e o anteparo onde o padrão foi observado.

### 3.6.3 Rede de difração utilizando CD's

Analisando a estrutura de um CD temos ali uma rede de difração. Esta rede não é visível a olho nu, mas em termos microscópicos temos algo parecido com o da imagem.

Figura 46: Representação esquemática da estrutura de um CD.



Fonte:

[https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2008/LuizR-Menezes\\_RF2.pdf](https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2008/LuizR-Menezes_RF2.pdf)

O CD é formado por regiões planas e regiões que possuem cavidades, essa região segue uma trilha espiralada que é onde ficam armazenadas as informações. Na face oposta à que fica armazenada as informações, é depositada uma fina camada de alumínio para que quando incida luz sobre a face onde ficam gravado os dados, eles possam serem lidos.

### Material Utilizado

- Cd ou Dvd
- Fita adesiva
- Lanterna
- Papelão
- Tesoura
- Cola quente

### Montagem do Experimento e Procedimento

Para produzirmos uma rede de difração, devemos inicialmente retirar essa película refletora que recobre o CD. Para isso, iremos utilizar uma fita adesiva. Inicialmente deveremos colar a fita adesiva sobre a parte da etiqueta (onde ficam as informações sobre capacidade de gravação, nome do CD) e cuidadosamente iremos retirar a fita tendo o cuidado de não deixar nenhum fragmento da película no CD. Pode ser que na primeira tentativa a fita não consiga retirar a película do CD, para facilitar esse processo pode ser feito alguns riscos na película isso irá ajudar a retirá-la.

Figura 47: Montagem do experimento.



Fonte: Autor

Figura 48: Montagem do experimento.



Fonte: Autor

Concluída a parte de retirada a película do CD, tomando cuidado para não tocar mais na parte interna do CD, sempre o manuseando pelas bordas, recortaremos um pedaço de papelão do mesmo tamanho do disco interior e o colaremos como mostrado na imagem

Figura 49: Montagem do Experimento.



Fonte: Autor

Com o auxílio do papelão e da cola quente é possível criar uma base para servir de suporte, devemos colar CD neste suporte, tomando o cuidado para que este fique em posição perpendicular ao plano do papelão.

Com o restante do papelão pode ser construído um suporte para que consigamos manter a lanterna em uma posição fixa próxima do centro do CD. Ao observamos o CD através da outra face, iremos visualizar a seguinte imagem.

Figura 50: Padrão de difração obtida através do experimento.

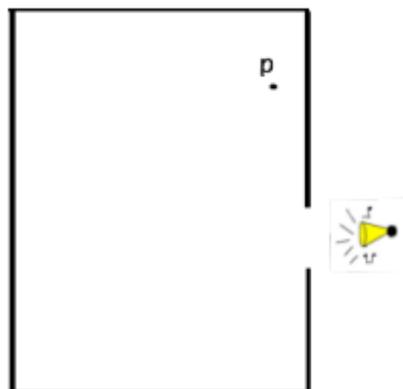


Fonte: Autor

Analisando o padrão observado, teremos a luz decomposta nas cores do arco-íris, devido à rede de difração existente na face do CD.

### 3.7 EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1. É possível ouvir sons atrás de um canto de parede, como mostrado na figura, porém não é possível ver atrás do canto. Como você pode explicar essa afirmação?



2. Um fio de cabelo é colocado entre duas lâminas de vidro planas, com 8 cm de comprimento. Essa montagem é iluminada por luz de comprimento de onda 600 nm e contam-se 121 franjas escuras, contadas a partir do ponto de contato entre as lâminas. Qual o diâmetro do fio de cabelo?

3. Uma fenda de largura  $a$  é iluminada com luz branca.

a) Para que valor de  $a$  o primeiro mínimo para a luz vermelha, com  $\lambda = 650$  nm, aparece em  $\theta = 15^\circ$ ?

b) Qual é o comprimento de onda  $\lambda'$  da luz cujo primeiro máximo secundário está em  $15^\circ$ , coincidindo assim com o primeiro mínimo para a luz vermelha?

4. Está sendo realizado um experimento de difração por uma fenda usando uma luz de comprimento de onda  $\lambda$ . O que aparece, em uma tela distante, em um ponto no qual a diferença entre as distâncias percorridas por raios que deixam as extremidades superior e inferior da fenda é igual a

a)  $5\lambda$

b)  $4,5\lambda$

5. A distância entre o primeiro e o quinto mínimo da figura a de difração de uma fenda é 0,35 mm com a tela a 40 cm de distância da fenda quando é usada uma luz com um comprimento de onda de 550 nm.

a) Determine a largura da fenda.

b) Calcule o ângulo  $\theta$  do primeiro mínimo de difração.

6. Um papel com um pequeno orifício é colocado no trajeto de um feixe de *laser*. O resultado que se observa no anteparo sobre o qual a luz incide após passar pelo orifício mostra um padrão de máximos e mínimos de intensidade luminosa. O fenômeno responsável por esse padrão é chamado de

- a) refração.
- b) difração.
- c) dispersão.
- d) interferência.
- e) reflexão.

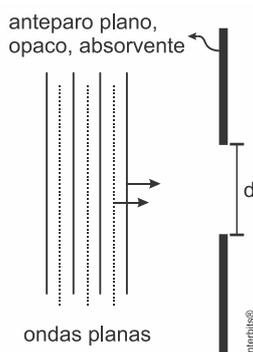
7. Considere as afirmações abaixo, sobre o fenômeno da difração.

- I. A difração é um fenômeno ondulatório que ocorre apenas com ondas sonoras.
- II. A difração que ocorre quando uma onda atravessa uma fenda é tanto mais acentuada quanto menor for a largura da fenda.
- III. A difração que ocorre quando uma onda atravessa uma fenda é tanto mais acentuada quanto maior for o comprimento de onda da onda.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas I e III.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

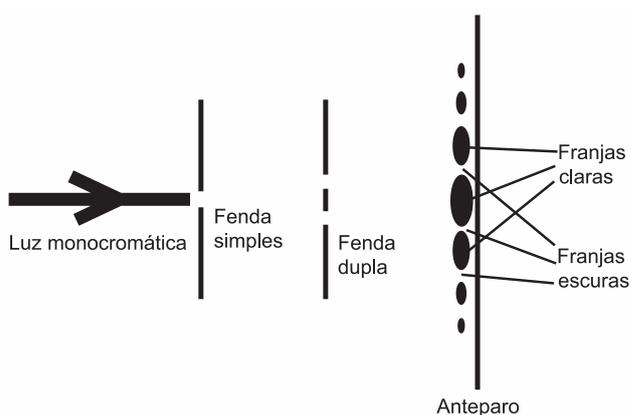
8. Analise a figura abaixo.



Considere duas ondas planas, uma de luz visível e outra de som audível, oscilando com comprimentos de onda iguais a  $\lambda_L = 10^{-4}$  cm e  $\lambda_S = 1,7$  cm, respectivamente. No mesmo instante, ambas incidem perpendicularmente sobre um mesmo lado do anteparo plano, opaco e bom absorvente acústico mostrado na figura acima. Atravessando o orifício circular de diâmetro  $d$  pode-se afirmar que, na região do outro lado do anteparo:

- apenas a onda sonora pode ser detectada se  $d \ll 1,7$  cm, devido à difração.
- apenas a onda luminosa pode ser detectada se  $d \ll 1,7$  cm, devido à refração.
- a propagação das duas ondas é aproximadamente retilínea se  $d \gg 1,7$  cm.
- a propagação das duas ondas é aproximadamente esférica se  $d \gg 1,7$  cm.
- nenhuma das ondas pode ser plana.

9. O debate a respeito da natureza da luz perdurou por séculos, oscilando entre a teoria corpuscular e a teoria ondulatória. No início do século XIX, Thomas Young, com a finalidade de auxiliar na discussão, realizou o experimento apresentado de forma simplificada na figura. Nele, um feixe de luz monocromática passa por dois anteparos com fendas muito pequenas. No primeiro anteparo há uma fenda e no segundo, duas fendas. Após passar pelo segundo conjunto de fendas, a luz forma um padrão com franjas claras e escuras.



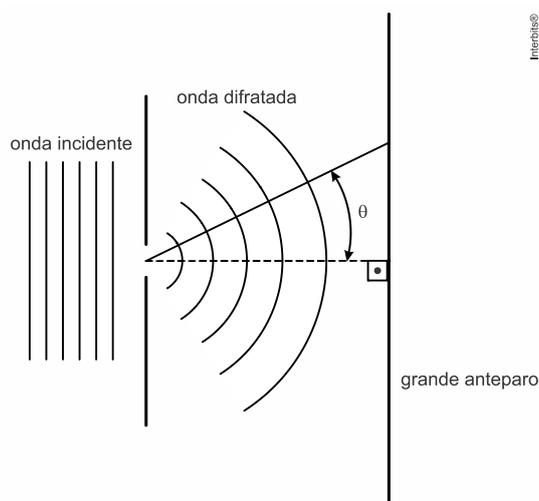
SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n. 1, 2007 (adaptado).

Com esse experimento, Young forneceu fortes argumentos para uma interpretação a respeito da natureza da luz, baseada em uma teoria

- corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e refração.

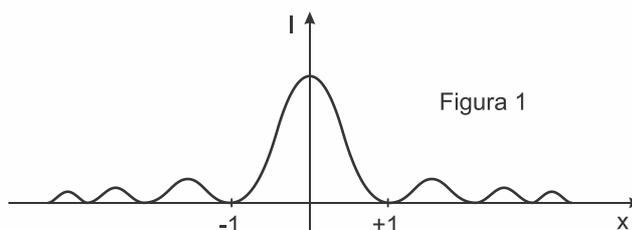
- b) corpuscular, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer dispersão e reflexão.  
 c) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e polarização.  
 d) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer interferência e reflexão.  
 e) ondulatória, justificada pelo fato de, no experimento, a luz sofrer difração e interferência.

10.



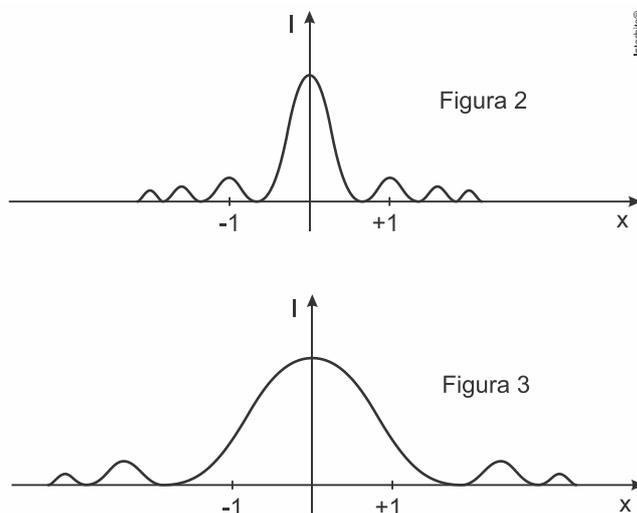
Uma fenda é iluminada com luz monocromática cujo comprimento de onda é igual a 510 nm. Em um grande anteparo, capaz de refletir toda a luz que atravessa a fenda, são observados apenas cinco mínimos de intensidade de cada lado do máximo central. Sabendo que um dos mínimos encontra-se em  $\theta$ , tal que  $\sin(\theta) = \frac{3}{4}$  e  $\cos(\theta) = \frac{\sqrt{7}}{4}$ , determine a largura da fenda.

11. Uma figura de difração é obtida em um experimento de difração por fenda simples quando luz monocromática de comprimento de onda  $\lambda_1$  passa por uma fenda de largura  $d_1$ . O gráfico da intensidade luminosa  $I$  em função da posição  $x$  ao longo do anteparo onde essa figura de difração é projetada, está apresentado na figura 1 abaixo.



Alterando-se neste experimento apenas o comprimento de onda da luz monocromática para um

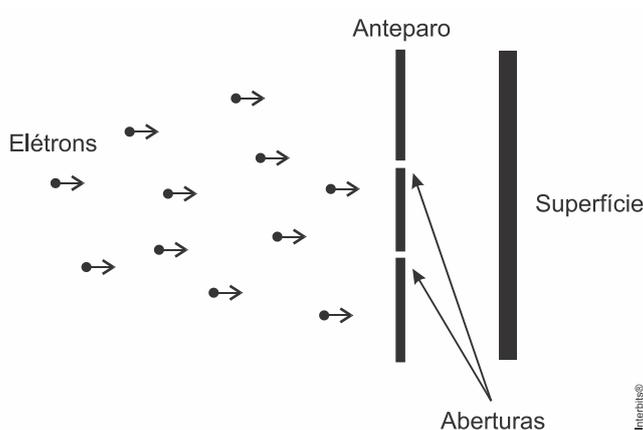
valor  $\lambda_2$ , obtém-se o gráfico apresentado na figura 2. E alterando-se apenas o valor da largura da fenda para um valor  $d_2$ , obtém-se o gráfico da figura 3.



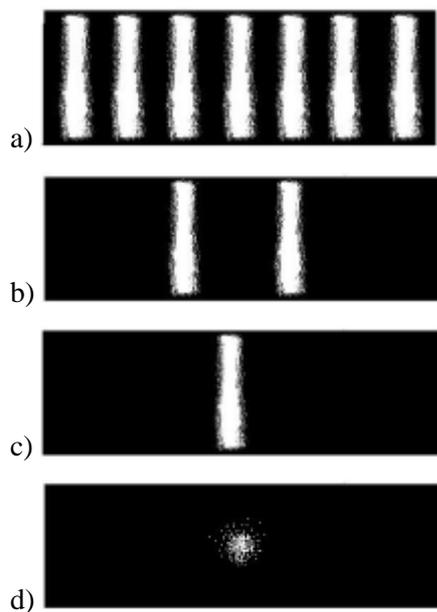
Nessas condições, é correto afirmar que

- a)  $\lambda_2 > \lambda_1$  e  $d_2 > d_1$
- b)  $\lambda_2 > \lambda_1$  e  $d_2 < d_1$
- c)  $\lambda_2 < \lambda_1$  e  $d_2 > d_1$
- d)  $\lambda_2 < \lambda_1$  e  $d_2 < d_1$

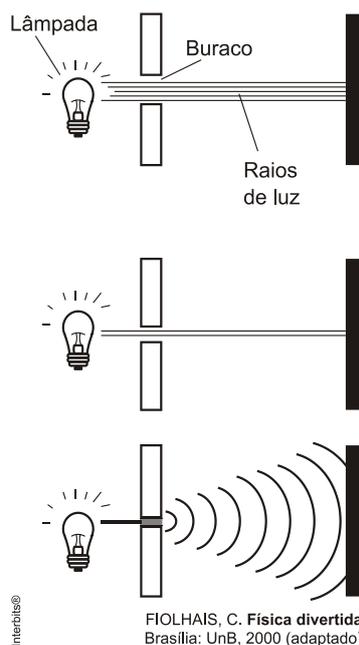
12. Um feixe de elétrons incide sobre uma superfície, demarcando os lugares onde a atinge. Todavia, há um anteparo com duas aberturas entre a fonte emissora de elétrons e a superfície, conforme representa o esquema a seguir.



Atualmente, sabe-se que a radiação tem um comportamento dual, ou seja, ora se assemelha a partículas, ora a ondas. Considerando que o diâmetro das aberturas é muito menor do que o comprimento de onda radiação incidente, que tipo de resultado será demarcado na superfície, levando em conta o comportamento ondulatório do feixe de elétrons?



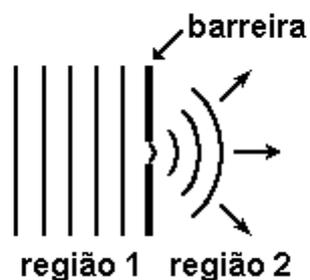
13. Ao diminuir o tamanho de um orifício atravessado por um feixe de luz, passa menos luz por intervalo de tempo, e próximo da situação de completo fechamento do orifício, verifica-se que a luz apresenta um comportamento como o ilustrado nas figuras. Sabe-se que o som, dentro de suas particularidades, também pode se comportar dessa forma.



Em qual das situações a seguir está representado o fenômeno descrito no texto?

- a) Ao se esconder atrás de um muro, um menino ouve a conversa de seus colegas.
- b) Ao gritar diante de um desfiladeiro, uma pessoa ouve a repetição do seu próprio grito.
- c) Ao encostar o ouvido no chão, um homem percebe o som de uma locomotiva antes de ouvi-lo pelo ar.
- d) Ao ouvir uma ambulância se aproximando, uma pessoa percebe o som mais agudo do que quando aquela se afasta.
- e) Ao emitir uma nota musical muito aguda, uma cantora de ópera faz com que uma taça de cristal se despedace.

14. A figura representa esquematicamente as frentes de onda de uma onda reta na superfície da água, propagando-se da região 1 para a região 2. Essas regiões são idênticas e separadas por uma barreira com abertura.

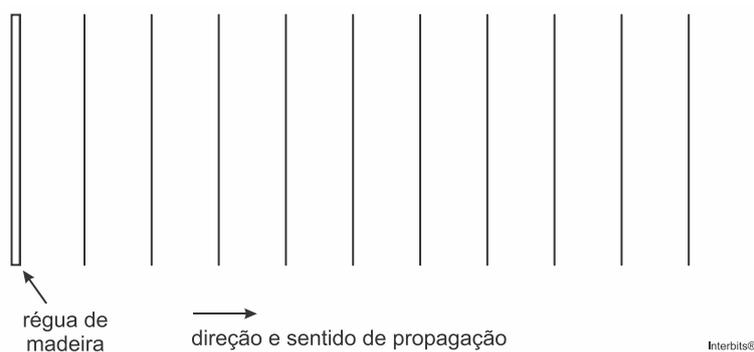


A configuração das frentes de onda observada na região 2, que mostra o que aconteceu com a onda incidente ao passar pela abertura, caracteriza o fenômeno da

- a) absorção.
- b) difração.
- c) dispersão.
- d) polarização.
- e) refração.

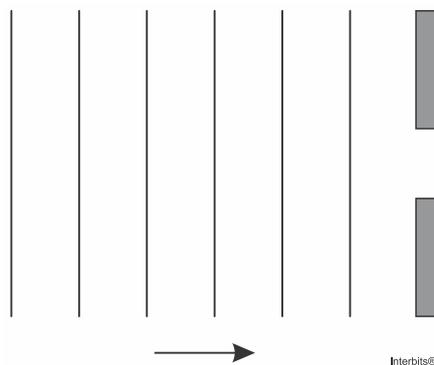
TEXTO PARA A PRÓXIMA QUESTÃO:

Para se estudar as propriedades das ondas num tanque de água, faz-se uma régua de madeira vibrar regularmente, tocando a superfície da água e produzindo uma série de cristas e vales que se deslocam da esquerda para a direita.



Retirando-se uma certa quantidade de água do tanque, a velocidade das ondas torna-se menor.

15. Observe a figura.



Nessa figura, estão esquematizadas duas barreiras verticais separadas por uma distância aproximadamente igual ao comprimento de onda das ondas.

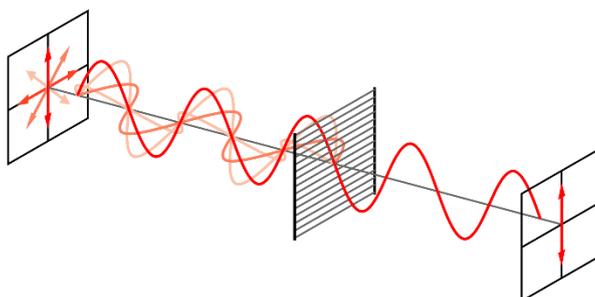
Após passas pela abertura, a onda apresenta modificação

- a) em sua forma e em seu comprimento de onda.
- b) em sua forma e em sua velocidade.
- c) em sua velocidade e em seu comprimento de onda.
- d) somente em sua forma.
- e) somente em sua velocidade.

## 4 POLARIZAÇÃO DA LUZ

A polarização de uma onda pode ser definida através da figura 43. Temos uma onda que se propaga pelo espaço em diferentes direções que ao passar por uma fenda acaba por propagar-se em apenas uma única direção.

Figura 51: Polarização de uma onda ao passar por um filtro polarizador.



Fonte: <https://physicsopenlab.org/wp-content/uploads/2016/03/wavePolarization.png>

Para entendermos a polarização é interessante fazermos uma revisão sobre alguns conceitos relacionado às ondas. Quando classificamos os tipos de ondas existentes, podemos classifica-las quanto a sua natureza, podendo ser de dois tipos:

*Ondas mecânicas:* são aquelas ondas que necessitam de um meio material para que elas possam se propagar. Como exemplo destas temos as ondas sonoras e as ondas se propagando em uma corda.

*Ondas eletromagnéticas:* são aquelas que não necessitam de um meio material para que elas possam se propagar, estas ondas têm a capacidade de se propagarem no vácuo. Como exemplo destas temos as ondas luminosas, ondas infravermelho e raios cósmicos.

É interessante observar que uma outra classificação também pode ser utilizando para classificar os tipos de ondas, essa, está relacionada com a direção em que a perturbação que foi produzida aquela onda ocorreu e sua direção de propagação, podendo elas serem divididas em:

*Ondas Longitudinais:* onde a direção de propagação da onda produzida coincide com a da perturbação que a produziu.

*Ondas Transversais:* onde a direção de propagação se dá em uma direção perpendicular à direção da perturbação que a produziu.

Analisando os tipos de ondas citadas anteriormente, teremos as ondas sonoras como sendo ondas de natureza mecânica e ondas do tipo longitudinais, já as ondas luminosas são exemplos de ondas

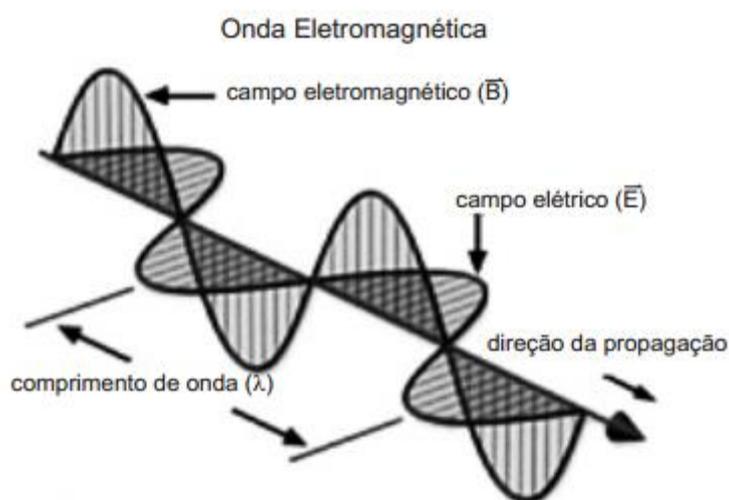
eletromagnéticas e do tipo transversais. Ao analisarmos mais a fundo as ondas eletromagnéticas teremos que estas se tratam de ondas transversais.

Ao observarmos a representação de uma onda eletromagnética, notamos que ela vibra em diversas direções e que estas direções são perpendiculares as direções de propagação. Após elas passarem por um obstáculo situado no centro da imagem passam a se propagar apenas em uma determinada direção que é definido pelas fendas que elas atravessaram. Temos aqui então nossa definição da polarização.

Ao polarizarmos uma onda, estamos fazendo com que esta onda que se propaga em diferentes direções passa a se propagar exclusivamente em apenas uma única direção. Quando tratamos de polarização de ondas, teremos que esse fenômeno é algo exclusivo de ondas do tipo transversais.

A luz é uma onda eletromagnética que se propaga pelo espaço ou pelo vácuo. Ondas luminosas são produzidas através da vibração de cargas elétricas que se movem com velocidade variável ao longo do tempo, oscilando e criando um campo elétrico, cuja variação temporal não é constante, conseqüentemente, devido ao movimento dessas cargas, ocorre o aparecimento de um campo magnético que também varia ao longo do tempo, esse campo magnético irá gerar um elétrico e o processo se repetirá várias e várias vezes produzindo uma onda como a da figura.

Figura 52: Representação de uma onda eletromagnética.

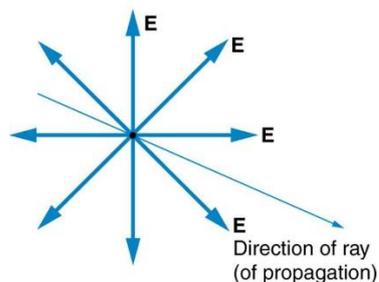


Fonte: <https://www.tutorbrasil.com.br/forum/download/file.php?id=20683>

É claro que os dois processos descritos anteriormente ocorrem simultaneamente e dão origem a uma rápida propagação dessa onda pelo espaço e que a figura apresentada é uma maneira simplificada de entendermos o comportamento de onda eletromagnética. Contudo, o comportamento de uma onda eletromagnética é algo diferente do que qualquer outro tipo de onda

já analisado. Elas ao se propagarem vibram em múltiplas direções fazendo com que esta onda também se propague em diferentes direções, uma representação mais apropriada para a luz é a apresentada na figura 45.

Figura 53: Feixe de luz não polarizada.



Fonte: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/27-8-polarization/>

Uma onda eletromagnética que vibra em mais um plano de vibração será aqui considerado por nós como sendo uma onda não polarizada. A luz do sol, a emitida por uma lâmpada em uma sala, ou pela chama de uma vela são exemplos de luz não polarizada. De maneira geral, é interessante imaginarmos a luz não polarizada como uma onda em que parte dela vibra na horizontal e a outra parte vibra na vertical, isso acabará facilitando o entendimento do seu comportamento.

#### 4.1 Polarização por Absorção

A maneira mais simples e comum de polarizarmos uma onda não polarizada é através da polarização por absorção, neste tipo de polarização são utilizados os chamados filtros polarizadores.

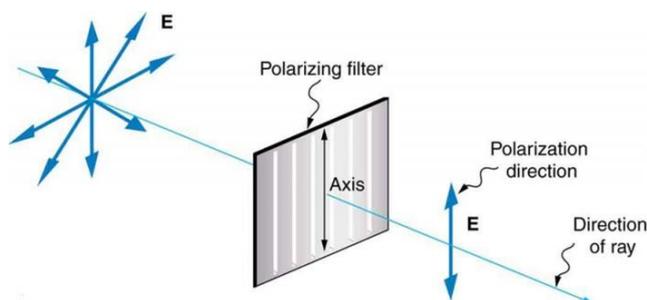
Figura 54: Imagem vista através de um filtro polarizador.



Fonte: <https://www.framos.com/media/image/bb/eb/94/PolarisationKit1iVa8CGNVu.jpg>

Filtros polarizadores são instrumentos feitos de um material que possui a capacidade de bloquear a passagem de um ou mais planos de vibração de uma onda eletromagnética, absorvendo este e deixando os planos de vibração restantes passarem. De maneira geral, um polarizador funciona como um dispositivo que filtra metade das vibrações e transmite o restante da luz através deste dispositivo. A onda que é transmitida através de um polarizador é chamada de luz polarizada. É possível notar que a luz que emerge através do filtro polarizador possui uma intensidade menor (igual a metade da intensidade inicial), isto é efeito da polarização sofrida pela luz.

Figura 55: Polarização de uma onda.

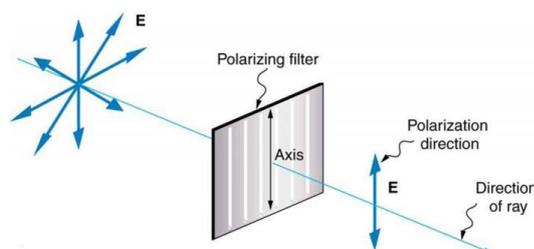


Fonte: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/27-8-polarization/>

Os polarizadores possuem em sua estrutura o que chamamos de planos de polarização. Na figura anterior podemos observar que o polarizador funciona de maneira a absorver aquelas vibrações que se dão em uma direção diferente daquela apresentada pelo seu plano polarizador (vibração na vertical). Logo todas as outras vibrações são absorvidas, exceto aquela que se dá na direção vertical.

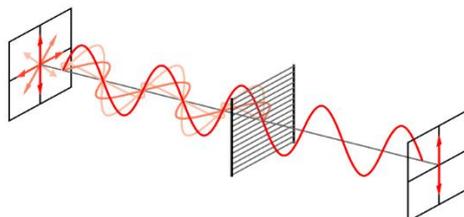
É importante tomarmos cuidado pois em algumas situações podemos ter representados os planos de polarização (direção em que a vibração será transmitida) enquanto em outras temos representados os planos de absorção (direção em que a vibração será absorvida).

Figura 56: Polarização de uma onda ao passar por um polarizador horizontal.



Fonte: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/27-8-polarization/>

Figura 57: Polarização de uma onda ao passar por um polarizador vertical.



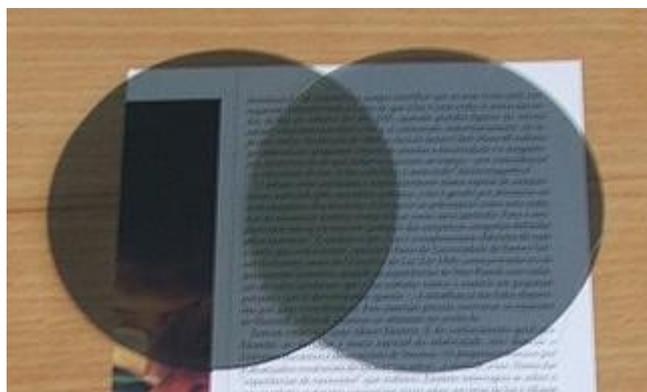
Fonte: <https://physicsopenlab.org/wp-content/uploads/2016/03/wavePolarization.png>

Na figura 48 observamos que o eixo apresentado no filtro polarizador representa a direção de vibração que será transmitida, enquanto na figura 49 temos o eixo apresentado no filtro polarizador como sendo a direção de vibração que será absorvida.

A observarmos um objeto através de um polarizador observamos que as formas dos objetos permanecem as mesmas. Eles apenas irão produzir uma diminuição no contraste da imagem do objeto. Como foi mencionado anteriormente, isso decorre do fato deles reduzir a intensidade luminosa a metade. Uma maneira de demonstrarmos isso é utilizando dois polarizadores iguais, porém dispostos perpendicular um ao outro. Caso realmente cada um deles reduza em metade a intensidade luminosa espera-se que o resultado obtido seja uma onda cuja intensidade é nula.

Na primeira situação temos duas lentes polarizadas que estão dispostas de maneira a terem seus planos polarizadores alinhados. Observamos que é possível enxergarmos o papel.

Figura 58: Filtros polarizados com planos de polarização alinhados.



Fonte: <https://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2010/02/polarizacao1.jpg>

Na segunda situação temos duas lentes polarizadas que estão dispostas de maneira a terem seus planos polarizadores alinhados perpendicularmente.

Figura 59: Filtros polarizadores com planos de polarização perpendiculares.



Fonte: <https://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2010/02/polarizacao2.jpg>

Como podemos observar não conseguimos mais enxergar o papel na região onde temos os dois polarizadores. Isto ocorreu devido a luz ter sofrido uma polarização em uma direção ao passar pela primeira lente e o plano polarizador da outra lente estar em uma direção perpendicular àquela que a luz foi polarizada, assim ela foi absorvida pela segunda lente resultando em uma onda de intensidade nula.

Temos que a intensidade luminosa de uma onda luminosa transmitida através de uma lente polarizadora é obtida através da *Lei de Malus*:

$$I = I_0 \cos^2(\theta_1 - \theta_2) \quad (4.1)$$

onde  $I_0$  representa a intensidade da onda que incide sobre o polarizador,  $I_1$  é a intensidade da onda que foi transmitida através do filtro e  $\theta_1 - \theta_2$  é a diferença entre os ângulos dos planos polarizador de cada um dos filtros.

Para o caso dos filtros terem seus planos alinhados paralelamente, temos que  $\theta_1 - \theta_2 = 0$ , assim

$$I = I_0 \cos^2(0^\circ)$$

$$I = I_0 \quad (4.2)$$

Em outras palavras, não temos perda na intensidade da onda transmitida pelas duas lentes. Porém, para o caso de os filtros terem seus planos alinhados perpendicularmente, temos que

$$\theta_1 - \theta_2 = 45^\circ$$

$$I = I_0 \cos^2(45^\circ)$$

$$I = 0$$

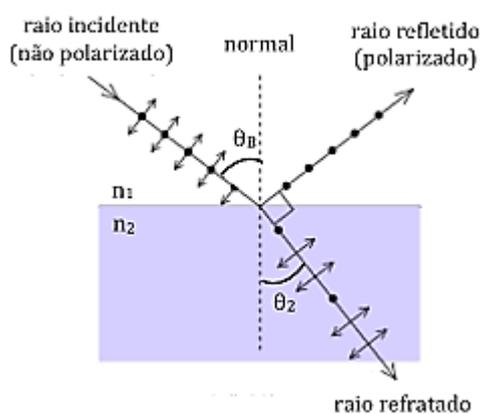
(4.3)

Ou seja, nenhuma intensidade é transmitida para além da segunda lente.

## 4.2 Polarização por Reflexão

Uma luz não polarizada ao incidir sobre determinadas superfícies pode ser refletida de modo que a luz refletida se encontra polarizada. A grande maioria das superfícies (um lago, asfalto, neve) quando analisadas refletem a luz de maneira a termos uma luz polarizada. Para que isso ocorra devemos ter um determinado ângulo formado entre o raio que incide sobre a superfície e a reta normal. Este ângulo é denominado de *ângulo de Brewster*.

Figura 60: Luz polarizada após reflexão.



Fonte: [https://caxias.ufrj.br/images/Lab\\_Didatico/Fisica/FISEXP\\_4/Roteiro\\_FisExpIV.pdf](https://caxias.ufrj.br/images/Lab_Didatico/Fisica/FISEXP_4/Roteiro_FisExpIV.pdf)

Para um determinado ângulo formado entre o raio incidente e a reta normal teremos que parte da luz será refletida e parte da luz será refratada, quando entre eles tivermos um ângulo de

90° teremos que a onda luminosa refletida será polarizada em uma direção que é perpendicular ao plano de incidência.

A figura abaixo ilustra uma situação onde uma polarização por reflexão ocorre e faz-se o uso de lentes polarizadoras.

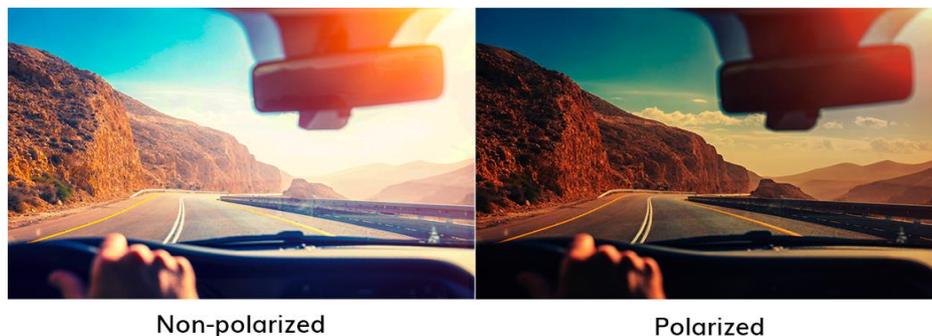
Figura 61: Imagem com e sem o uso de filtros polarizados.



Fonte: <https://www.shrimpnfishflorida.com/forums/attachments/35499/>

Na imagem da esquerda temos uma imagem obtida sem o uso de uma lente polarizadora. A pessoa que vê o lago percebe um brilho intenso devido a reflexão da luz na superfície do lago. Pescadores são pessoas familiarizados com situações dessas, para que esse efeito não atrapalhe a pescaria muitos deles fazem uso de óculos com lentes polarizadas. Ao usar essas lentes teremos como resultado para a imagem formada na superfície do lago a imagem da direita, que é muito mais confortável os olhos e nítida. Esse efeito é possível pois como as lentes dos óculos são polarizadas irão bloquear essa luz parcialmente polarizada.

Figura 62: Imagem com e sem o uso de filtros polarizados.



Fonte: <https://www.clearly.ca/thelook/wp-uploads/2018/02/polarized-and-non-polarized-lenses.jpg>

## 4.3 SUGESTÃO DE EXPERIMENTO PARA POLARIZAÇÃO DA LUZ

### 4.3.1 Lei de Malus e a Intensidade Luminosa

Como foi visto, uma onda luminosa ao passar por um filtro polarizador acaba sendo em parte absorvida por este devido a distribuição das longas cadeias do polarizador. Teremos então que a luz polarizada possuirá uma intensidade luminosa menor que a da luz não polarizada. Uma maneira de demonstrarmos, isto é, fazendo uso de uma lente polarizada, é possível observar que as imagens vistas através dela apresentam um “brilho” menor.

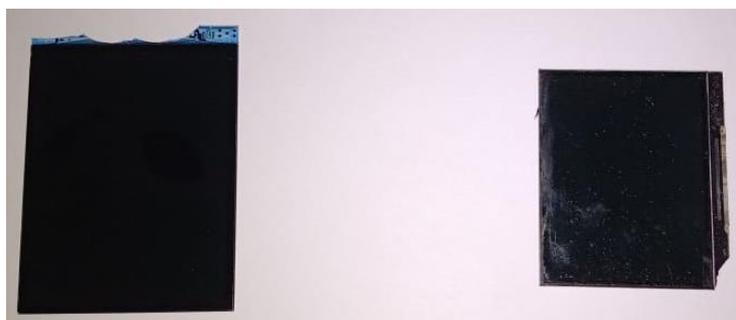
#### Material Utilizado

- Duas lentes Polarizadas
- Uma fonte luminosa (Pode ser utilizada a tela de um celular)

#### Montagem do Experimento e Procedimentos

As lentes polarizadas utilizadas na experiência podem ser lentes obtidas a partir de celular antigos, em sua grande maioria, elas possuem telas que contém lentes polarizadas. Após ser feita a retirada delas, foram limpas para evitar que qualquer impureza atrapalhasse a experiência.

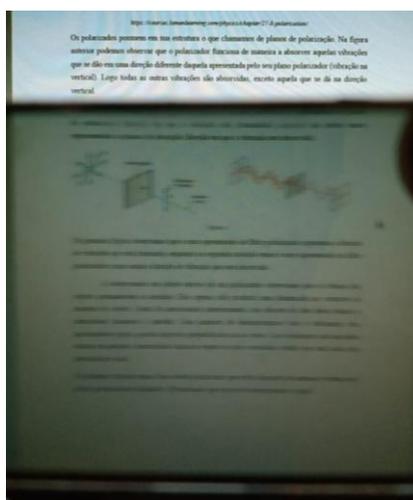
Figura 63: Montagem do experimento.



Fonte: Autor

Como exemplo, utilizando uma das lentes, pode-se observar através do visor –de um computador, a imagem que espera ser vista ao fazer este procedimento é apresentada na figura 76.

Figura 64: Imagem vista através de um filtro polarizador.



Fonte: Autor

Dependendo da maneira que a lente for disposta, pode ser que não seja possível enxergar a tela através da lente. Caso isso aconteça, deve-se girar a lente até que seja possível visualizar a tela através dela.

Com o primeiro polarizador fixado, e o segundo, eles devem ser sobrepostos e a imagem analisada através deles. Dependendo da maneira que o segundo polarizador estiver disposto em relação ao primeiro pode ser obtido a imagem abaixo

Figura 65: Imagem vista através de um filtro polarizador girado 90°.



Fonte: Autor

#### 4.4 EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1. Ondas eletromagnéticas são criadas a partir da oscilação de campos elétricos e magnéticos. Uma fonte luminosa, como o sol ou uma lâmpada, emite luz (onda eletromagnética) que oscila em várias direções. O fenômeno conhecido como polarização da luz acontece quando a onda eletromagnética oscila somente em uma direção. Os filtros polaroides são materiais que permitem a passagem da luz em apenas um plano de oscilação e a luz que passa por eles é chamada de luz polarizada.

Com base nessas informações, responda aos itens a seguir.

- a) Considere que uma loja esteja com um anúncio de óculos com lentes polarizadoras, ou seja, óculos com filtros polaroides.

Descreva de que forma, ali mesmo na loja, ou seja, mesmo sem recursos técnicos, seria possível

comprovar se os óculos do anúncio realmente possuem filtros polaroides.

Observação: um esquema pode ajudar a justificar sua resposta.

b) Uma forma de determinar a intensidade luminosa de uma fonte é dividindo a sua potência pela área iluminada:

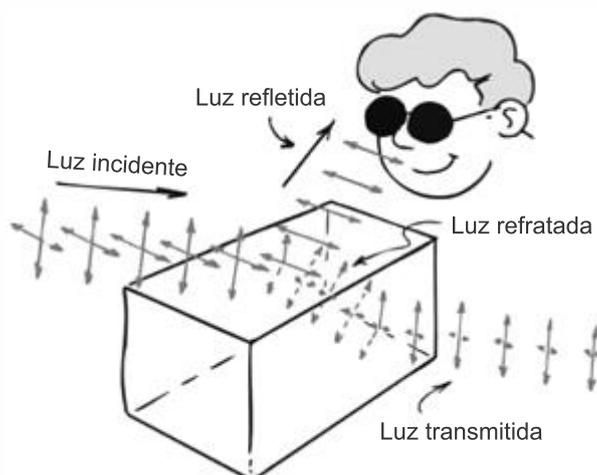
$$I = \frac{P}{A}$$

Considere uma lâmpada emitindo ondas eletromagnéticas esféricas em todas as direções, com potência total de 48 W.

Determine a intensidade luminosa a uma distância de 2 m da lâmpada. Utilize  $\pi = 3$ .

2. Leia o texto e responda à questão a seguir.

### Lentes Polarizadas



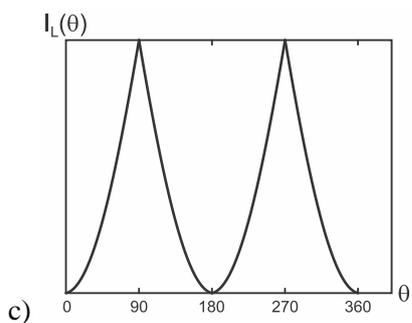
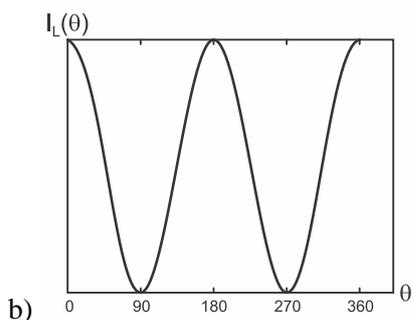
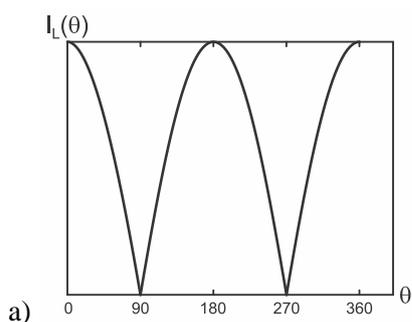
“Boa parte da luz refletida em superfícies não metálicas é polarizada. O brilho do vidro ou da água é um bom exemplo. A não ser para incidência perpendicular, o raio refletido contém mais vibrações paralelas à superfície refletora, enquanto o feixe transmitido contém mais vibrações em ângulos retos com as vibrações da luz refletida. O brilho das superfícies refletoras pode ser diminuído consideravelmente usando-se óculos escuros com lentes polaroides”.

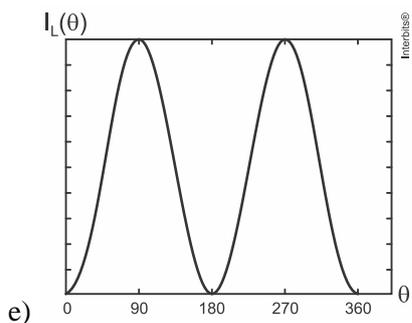
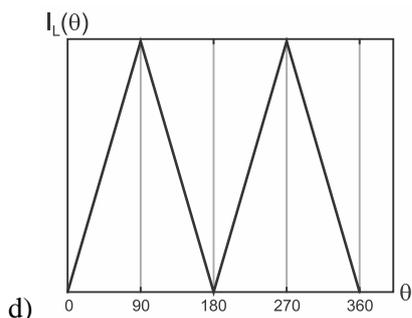
Fonte: HEWITT, Paul. *Física Conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Um motorista de automóvel, buscando filtrar a luz refletida pelo asfalto, deseja comprar um óculos com lente polarizada. Para tanto, o eixo de polarização mais adequado é o plano

- vertical para as duas lentes.
- horizontal para as duas lentes.
- vertical para a lente esquerda e plano horizontal para a lente direita.
- horizontal para a lente esquerda e plano vertical para a lente direita.

3. Um indivíduo instalou uma fonte de luz monocromática linearmente polarizada na roda do seu carro, irradiando em direção ortogonal à roda e paralela ao solo. O veículo está em movimento retilíneo em velocidade constante. Um detector linearmente polarizado desloca-se, acompanhando o eixo da roda, na mesma velocidade e sentido do carro. O gráfico da intensidade luminosa ( $I_L$ ) captada pelo detector, em função do ângulo ( $\theta$ ), em graus, entre os planos de polarização da luz e do detector, é:





4. Um professor do curso de Materiais de uma faculdade apresentou aos alunos a seguinte citação:

“As fibras ópticas podem ser usadas para guiar a luz ao longo de um determinado caminho. A ideia é fazer um raio de luz percorrer uma fibra transparente, ricocheteando entre as suas paredes. Desde que o ângulo de incidência do raio na parede da fibra seja sempre maior que o ângulo crítico, o raio permanecerá sempre dentro dela mesmo que ela esteja curva”.

KIRK, Tim. Physics for the IB Diploma. Oxford University Press, 2003. Livre tradução.

Em seguida, pediu para que os alunos respondessem, de maneira assertiva, à qual conceito físico a citação se refere.

A resposta correta esperada pelo professor é

- a) difração.
- b) polarização.
- c) ângulo limite.
- d) espalhamento.
- e) dispersão luminosa.

5. Em relação à natureza e propriedades da luz, assinale o que for correto.

01) Quando a luz passa através de uma abertura, cuja dimensão é da ordem do seu comprimento

de onda, pode-se observar o efeito da difração da luz.

02) Um raio de luz, ao incidir na interface de dois meios de diferentes índices de refração, sempre será refratado.

04) Radiação infravermelha apresenta uma frequência maior do que a frequência da luz visível.

08) O efeito de interferência, observado em ondas luminosas, é propriedade exclusiva de ondas eletromagnéticas.

16) O fato de a luz apresentar o efeito de polarização é uma indicação de que ela é uma onda transversal.

6. Com relação ao fenômeno da polarização da luz, assinale o que for correto.

01) Luz polarizada, ao passar através de um polarizador, pode tornar-se não polarizada.

02) A polarização é um fenômeno que ocorre somente em ondas longitudinais.

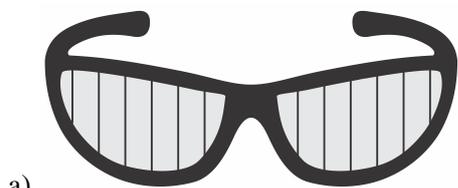
04) A intensidade de uma luz não polarizada, ao passar através de um polarizador, tem seu valor reduzido.

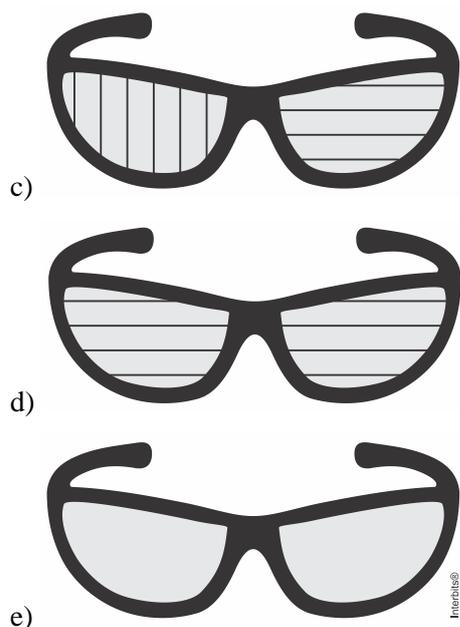
08) Luz não polarizada, ao passar através de dois polarizadores, pode ter sua intensidade reduzida a zero.

16) Luz polarizada não apresenta o efeito de interferência, apenas o de difração.

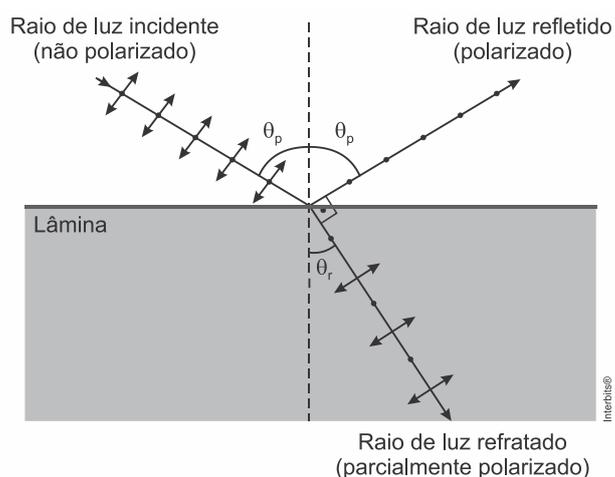
7. Nas rodovias, é comum motoristas terem a visão ofuscada ao receberem a luz refletida na água empoçada no asfalto. Sabe-se que essa luz adquire polarização horizontal. Para solucionar esse problema, há a possibilidade de o motorista utilizar óculos de lentes constituídas por filtros polarizadores. As linhas nas lentes dos óculos representam o eixo de polarização dessas lentes.

Quais são as lentes que solucionam o problema descrito?





8. A fotografia feita sob luz polarizada é usada por dermatologistas para diagnósticos. Isso permite ver detalhes da superfície da pele que não são visíveis com o reflexo da luz branca comum. Para se obter luz polarizada, pode-se utilizar a luz transmitida por um polaroide ou a luz refletida por uma superfície na condição de Brewster, como mostra a figura. Nessa situação, o feixe da luz refratada forma um ângulo de  $90^\circ$  com o feixe da luz refletida, fenômeno conhecido como Lei de Brewster. Nesse caso, o ângulo da incidência  $\theta_p$ , também chamado de ângulo de polarização, e o ângulo de refração  $\theta_r$  estão em conformidade com a Lei de Snell.



Considere um feixe de luz não polarizada proveniente de um meio com índice de refração igual a 1, que incide sobre uma lâmina e faz um ângulo de refração  $\theta_r$  de  $30^\circ$ .

Nessa situação, qual deve ser o índice de refração da lâmina para que o feixe refletido seja polarizado?

- a)  $\sqrt{3}$
- b)  $\frac{\sqrt{3}}{3}$
- c) 2
- d)  $\frac{1}{2}$
- e)  $\frac{\sqrt{3}}{2}$

9. Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do enunciado abaixo, na ordem em que aparecem.

A luz é uma onda eletromagnética formada por campos elétricos e magnéticos que variam no tempo e no espaço e que, no vácuo, são \_\_\_\_\_ entre si. Em um feixe de luz polarizada, a direção da polarização é definida como a direção \_\_\_\_\_ da onda.

- a) paralelos - do campo elétrico
- b) paralelos - do campo magnético
- c) perpendiculares - de propagação
- d) perpendiculares - do campo elétrico
- e) perpendiculares - do campo magnético

10. O efeito de imagem tridimensional no cinema e nos televisores 3D é obtido quando se expõe cada olho a uma mesma imagem em duas posições ligeiramente diferentes. Um modo de se conseguir imagens distintas em cada olho é através do uso de óculos com filtros polarizadores.

a) Quando a luz é polarizada, as direções dos campos elétricos e magnéticos são bem definidas. A intensidade da luz polarizada que atravessa um filtro polarizador é dada por  $I = I_0 \cos^2 \theta$ , onde  $I_0$  é a intensidade da luz incidente e  $\theta$  é o ângulo entre o campo elétrico  $\vec{E}$  e a direção de polarização do filtro. A intensidade luminosa, a uma distância  $d$  de uma fonte que emite luz polarizada, é dada por  $I_0 = \frac{P_0}{4\pi d^2}$ , em que  $P_0$  é a potência da fonte. Sendo  $P_0 = 24 \text{ W}$ , calcule a

intensidade luminosa que atravessa um polarizador que se encontra a  $d = 2$  m da fonte e para o qual  $\theta = 60^\circ$ .

b) Uma maneira de polarizar a luz é por reflexão. Quando uma luz não polarizada incide na interface entre dois meios de índices de refração diferentes com o ângulo de incidência  $\theta_B$ , conhecido como ângulo de Brewster, a luz refletida é polarizada, como mostra a figura abaixo. Nessas condições,  $\theta_B + \theta_r = 90^\circ$ , em que  $\theta_r$  é o ângulo do raio refratado. Sendo  $n_1 = 1,0$  o índice de refração do meio 1 e  $\theta_B = 60^\circ$ , calcule o índice de refração do meio 2.

