

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
PIAUÍ – IFPI / CAMPUS PARNAÍBA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

FRANCISCO ANGELO DA SILVA NETO

**PRODUTO EDUCACIONAL: UMA PROPOSTA DE ATIVIDADE
VOLTADA PARA O ENSINO SIGNIFICATIVO DAS
PROPRIEDADES ONDULATÓRIAS DA LUZ**

Parnaíba - PI

2018

FRANSCISCO ANGELO DA SILVA NETO

PRODUTO EDUCACIONAL: UMA PROPOSTA DE ATIVIDADE VOLTADA
PARA O ENSINO SIGNIFICATIVO DAS PROPRIEDADES
ONDULATÓRIAS DA LUZ

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Piauí-Campus Parnaíba como requisito para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador: Bruno Pires Sombra

Coorientador: Lucas Izídio de Sousa
Sampaio

Parnaíba - PI

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586p Silva Neto, Francisco Angelo da
Produto educacional : uma proposta de atividade voltada para o ensino significativo das propriedades ondulatórias da luz / Francisco Angelo da Silva Neto - 2018.
60 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Parnaíba, Licenciatura em Física, 2018.

Orientador : Prof Me. Bruno Pires Sombra.

Coorientador : Prof Esp. Lucas Izidio de Sousa Sampaio.

1. Ensino de Física. 2. Aprendizagem Significativa. 3. Propriedades Ondulatórias da Luz. I. Título.

CDD 530

PRODUTO EDUCACIONAL: UMA PROPOSTA DE ATIVIDADE VOLTADA PARA O ENSINO SIGNIFICATIVO DAS PROPRIEDADES ONDULATÓRIAS DA LUZ

Francisco Angelo da Silva Neto

Aprovado em ____/____/____

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado junto ao Curso de Licenciatura em Física do IFPI/*Campus* Parnaíba, aprovado pela Banca Examinadora:

Prof. MSc. Bruno Pires Sombra (Orientador) – Presidente

IFPI/*Campus* Parnaíba – PI

Prof. Esp. Deymes Silva Aguiar – Examinador

IFPI/*Campus* Parnaíba – PI

Prof. Esp. Lucas Izidio de Sousa Sampaio – Examinador

IFPI/*Campus* Parnaíba – PI

Parnaíba – PI

2018

Dedico este trabalho aos meus pais
Edmilson José Marques da Silva (In memorian) e Célia Maria dos Santos Souza.

Agradecimentos

Os agradecimentos principais são para meu Pai Edmilson José Marques da Silva, que se empenhou ao máximo em garantir uma Educação de qualidade para mim, à minha Mãe Célia Maria dos Santos Souza, que me incentivou a nunca desistir até nos momentos de dúvidas em que achei que não ia conseguir ir até o fim, à minha namorada Fernanda Araújo que me aconselhou a sempre me esforçar na busca de novas conquistas, ao meu orientador Bruno Pires Sombra, que é um exemplo de profissional e ser humano que admiro muito e tenho grande respeito e ao meu coorientador Lucas Izidio de Sousa Sampaio, que contribuiu significativamente na produção desse trabalho. Obrigado.

Também quero agradecer aos meus colegas de curso: Gabriel Gaspar, João Vitor, Everton Lins, Edmilson Ferreira, Nilson Marcos, Gabriela de Assis, Thaynara Brenna, Sthefânia Ferreira, Elienário Duarte, Bruna Reis, Rafael Magalhães, Alberto Senna e Tayla Johana que constituem a família que construí no IFPI. Obrigado.

Finalmente, agradeço a toda a equipe de profissionais do IFPI que contribuíram na minha formação acadêmica, em especial aos Professores: Janete C. Ribeiro, Vilma Dias, Jeová Calisto, Itamar Vieira, Marcos Matos, Deymes Aguiar, Wesley Vieira e Diego Prudêncio. Obrigado.

*“É particularmente intrigante
que luz mais luz possa resultar em escuridão.”
(Moysés Nussenzveig)*

Resumo

O objetivo desse trabalho é propor um material pedagógico de apoio ao ensino de Física referente ao conteúdo programático: As propriedades ondulatórias da luz. Inicialmente é realizada uma discussão sobre as atuais condições da abordagem da disciplina de Física nas escolas. Percebe-se que a metodologia mais difundida corresponde ao modelo de transmissão de conhecimentos, no qual a sequência didática de ensino restringi-se a explanação de conceitos prontos, seguida da realização de exercícios propostos e por fim aplicação de uma prova objetiva com finalidades avaliativas. Devido à ineficiência dessa forma de ensino de ciências, propõe-se que as atividades escolares devem se desenvolver no sentido de incentivar a ação investigativa e a imaginação, tal como ocorre no processo científico. O fundamento epistemológico que atua como embasamento pedagógico às atividades propostas nesse trabalho é a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, que constitui a corrente cognitivista e afirma que o processo de aprendizagem ocorre quando o sujeito consegue incorporar novos conceitos aos conhecimentos prévios existentes na sua estrutura cognitiva, os quais Ausubel chama de Subsúncos. O material corresponde a um roteiro de experimentos de baixo custo que podem ser reproduzidos em sala de aula ou laboratórios. O diferencial dessa atividade é o incentivo à ação investigativa em detrimento a transmissão de respostas prontas aos resultados experimentais. A todo o momento é sugerido que o professor não estabeleça o fim que a atividade experimental deve atingir, mas que proponha sempre que os alunos consigam elaborar suas próprias hipóteses através de seus dados obtidos. Essa ação constitui o método científico e é o procedimento padrão utilizado no desenvolvimento do conhecimento empírico da Física. O fundamento teórico referente às propriedades ondulatórias da luz é realizado, onde se destaca a abordagem da difração, interferência e coerência, além de um levantamento histórico sobre a evolução do conceito de onda, que é fundamental no estudo dos fenômenos naturais.

Palavras-chaves: Ensino de Física. Aprendizagem Significativa. Propriedades ondulatórias da luz.

Abstract

The objective of this work is to propose a pedagogical material to support the teaching of Physics referring to the programmatic content: The wave properties of light. Initially a discussion about the current conditions of the approach of the discipline of Physics in schools is held. It is noticed that the most widespread methodology corresponds to the knowledge transmission model, in which the didactic sequence of teaching is restricted to the explanation of ready concepts, followed by the realization of proposed exercises and finally application of an objective test for evaluation purposes. Due to the inefficiency of this form of science teaching, it is proposed that school activities should develop in order to encourage investigative action and imagination, as occurs in the scientific process. The epistemological foundation that acts as a pedagogical basis for the activities proposed in this work is the theory of meaningful learning of Ausubel, which constitutes the cognitive chain and affirms that the learning process occurs when the subject is able to incorporate new concepts to previous knowledge in their cognitive structure, which Ausubel calls Subsungores. The material corresponds to a script of low cost experiments that can be reproduced in the classroom or laboratories. The differential of this activity is the incentive to the investigative action to the detriment of the transmission of ready answers to the experimental results. At all times it is suggested that the teacher does not establish the purpose that the experimental activity should achieve, but always proposes that the students can elaborate their own hypotheses through their obtained data. This action constitutes the scientific method and is the standard procedure used in the development of the empirical knowledge of Physics. The theoretical basis for the wave properties of light is realized, where the diffraction, interference and coherence approach is highlighted, as well as a historical survey on the evolution of the wave concept, which is fundamental in the study of natural phenomena.

Key-words: Teaching Physics. Meaningful Learning. Wavy properties of light.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Princípio de Huygens	26
Figura 2 – Frentes de onda	26
Figura 3 – Reflexão luminosa	26
Figura 4 – Refração luminosa	27
Figura 5 – Corda vibrante	29
Figura 6 – Sobreposição de ondas esféricas	33
Figura 7 – Interferência Construtiva	33
Figura 8 – Interferência Destrutiva	34
Figura 9 – Experimento de Young	34
Figura 10 –Onda eletromagnética	36
Figura 11 –Feixes luminosos que interferem no ponto P	38
Figura 12 –Picos de interferência parcial	41
Figura 13 –Picos de Interferência total	41
Figura 14 –Materiais do Experimento 1	43
Figura 15 –Materiais do experimento 2	45
Figura 16 –Ilustração da Difração	45
Figura 17 –Resultados do Experimento 2	46
Figura 18 –Materiais do experimento 3	47
Figura 19 –Realização do experimento 3	48
Figura 20 –Lanterna desmontada	49
Figura 21 –Resultados do experimento 4	49
Figura 22 –Materiais do experimento 5	50
Figura 23 –Resultados do experimento 5	51
Figura 24 –Duplas Fendas de Young	52
Figura 25 –Padrão de interferência	53

Lista de abreviaturas e siglas

LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educação
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais

Lista de símbolos

θ	Letra grega teta
ϕ	Letra grega fi
∂	Operador diferencial parcial
ψ	Letra grega psi
∇	Nabla
μ	Letra grega mi
ϵ	Letra grega epsilon
ω	Letra grega ômega
α	Letra grega alfa
β	Letra grega beta
δ	Letra grega delta
Δ	Letra grega delta maiúscula
Φ	Letra grega fi maiúscula

Sumário

Introdução	14
1 A experimentação e o ensino de física	16
1.1 Ensino de Física	16
1.2 A teoria de Ausubel	18
1.3 Aprendizagem mecânica x Aprendizagem significativa	19
1.4 O papel do experimento didático na aprendizagem significativa	21
2 A evolução da teoria ondulatória	24
2.1 O conceito de onda	24
2.2 Huygens e a teoria ondulatória da luz	25
2.3 A investida de Newton	28
2.4 A descrição matemática da onda	29
3 O fenômeno da interferência	32
3.1 O experimento das duplas fendas	32
3.2 Maxwell e o eletromagnetismo clássico	34
3.3 Interferência luminosa	37
4 Produto educacional	42
4.1 Experimento 1: O comportamento da luz	42
4.1.1 Objetivos	42
4.1.2 Materiais necessários	43
4.1.3 Fundamentação teórica	43
4.1.4 Procedimentos	44
4.1.5 Análise de Dados	44
4.2 Experimento 2: Lupa caseira de baixo custo	44
4.2.1 Objetivos	44
4.2.2 Materiais necessários	44
4.2.3 Fundamentação teórica	44
4.2.4 Procedimentos	45
4.2.5 Análise de Dados	46
4.3 Experimento 3: Sombra de gigante	46
4.3.1 Objetivos	46
4.3.2 Materiais utilizados	47
4.3.3 Fundamentação teórica	47

4.3.4	Procedimentos	47
4.3.5	Análise de Dados	48
4.4	Experimento 4: Padrão de difração	48
4.4.1	Objetivos	48
4.4.2	Materiais utilizados	48
4.4.3	Fundamentação teórica	49
4.4.4	Procedimentos	49
4.4.5	Análise de Dados	50
4.5	Experimento 5: Interferência luminosa	50
4.5.1	Objetivos	50
4.5.2	Materiais necessários	50
4.5.3	Fundamentação teórica	50
4.5.4	Procedimentos	51
4.5.5	Análise de Dados	51
4.6	Experimento 6: O experimento das duplas fendas de Thomas Young	51
4.6.1	Objetivos	51
4.6.2	Materiais necessários	52
4.6.3	Fundamentação teórica	52
4.6.4	Procedimentos	53
4.6.5	Análise de Dados	54
4.7	Exercícios de Vestibulares	55
5	Conclusão	56
	Referências	57
	APÊNDICE A Coerência	59

Introdução

Todo acadêmico em processo de formação nas áreas de ensino de ciências exatas é consciente da dificuldade de abordagem dos conteúdos programáticos dispostos segundo as exigências mínimas de seus respectivos sistemas de educação. No que tange o ensino de física, em nível de educação básica, seus objetivos e metas traçadas apontam para o desenvolvimento do pensamento crítico, da construção de um ser ativo em sua sociedade e com pleno exercício dos seus direitos de cidadania (BRASIL, 1996). O grande empecilho que se apresenta diante dessa finalidade é a aversão, por parte do alunado, à disciplina que, segundo os mesmos, é caracterizada como sendo de difícil compreensão.

Várias pesquisas têm sido realizadas no sentido de amenizar as barreiras que dificultam a abordagem pedagógica da Física e promover um ensino mais envolvente e atrativo (ARAÚJO; ABIB, 2003). Para classificar o aprendizado como eficiente é necessário recorrer aos objetivos que se espera alcançar e no que diz respeito à Física os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) constituem um elemento fundamental nesse processo.

Os termos “investigação”, “compreensão” e “relação” vêm aparecendo de maneira mais frequente em documentos que direcionam os rumos da educação científica básica (BRASIL, 2002). Nota-se um gradual abandono da ideia do ensino pragmático, que exige aplicações encerradas num determinado tópico de forma imediata e adota-se a perspectiva de uma aprendizagem voltada para o cotidiano. Para exemplificar a diferença entre essas duas formas de abordagem é possível citar a energia cinética, um assunto constituinte do currículo da Física, considerado por muitos professores como um dos principais a serem apresentados no curso de mecânica. Segundo o caráter pragmático o estudo da energia cinética deve desenvolver nos discentes técnicas que possibilitem relacionar grandezas físicas por meio de equações previamente deduzidas, muitas vezes sem demonstrações explícitas e/ou triviais, e aplicar seus princípios na resolução de problemas fechados de cunho objetivo como a maioria dos que aparecem nos livros didáticos.

Em contrapartida a abordagem investigativa tem como foco principal o desenvolvimento de competências que possibilitem ao aprendiz conceituar, relacionar e compreender os princípios que regem o comportamento da energia cinética e, utilizando esse conhecimento apreendido, promover interações em seu próprio meio. Em síntese, pode-se dizer que os critérios que direcionam a ação pedagógica deixam de tomar como referência principal o conteúdo específico da física, passando a focar nas aplicações dos estudos da matéria (BRASIL, 2002).

Um fator determinante para a necessidade da inovação metodológica nas instituições de ensino e pesquisa é o sistema econômico. A escola tem relação intrínseca com o

mercado de trabalho e as várias organizações do sistema econômico exigem novos padrões de acordo. Todavia, desde a época da industrialização a escola ainda mantém os mesmos moldes em termos de estrutura física e organizacional. Com a globalização, as tecnologias de informação ascendentes, e a necessidade de qualificação da mão de obra, o que justifica a prática tradicionalista como papel central do ensino escolar? Surgem então novas metodologias que dialogam de forma mais coerente com os padrões do sistema, buscando uma eficiência maior no desenvolvimento das competências mencionadas.

Vários educadores têm atuado no sentido de contribuir com novas metodologias que dialoguem com essas novas exigências e a proposta desse trabalho reside nesse ponto. Apostando na eficiência do ensino de física através da prática experimental e subsidiado pela teoria de Ausubel, será proposto um produto educacional voltado para o ensino de física que melhore a abordagem em sala de aula dessa disciplina. O material consta de um roteiro de atividade constituído de um conjunto de experimentos sequenciais que poderão ser utilizados no tratamento do assunto das propriedades ondulatórias da luz em turmas de nível médio e superior.

1 A experimentação e o ensino de física

Uma metodologia de ensino que se enquadra muito bem nos padrões da educação contemporânea é a transmissão informativa através da prática experimental. Os experimentos didáticos são ferramentas de relevância fundamental para a Física tendo em vista o caráter procedimental dessa ciência. O método científico propõe uma sequência de estratégias que vão direcionar o estudo de um fenômeno físico. Com base nessa análise se constroem as teorias e leis da Física. Evidentemente essa abordagem deve ser bem direcionada e privilegiar o melhor caminho para que se alcance a aprendizagem concreta.

1.1 Ensino de Física

Para discutir o atual cenário do ensino de Física nas escolas de nível básico, é preciso inicialmente estabelecer o conceito do que se entende por ensinar. Uma definição encontrada no trabalho de Bejarano e Carvalho (2004) afirma que ensinar é tudo aquilo que o professor faz com o objetivo de passar conteúdo. A maioria dos estudantes do ensino médio concordaria com essa ideia se fossem questionados sobre o ato de ensinar, porque afinal de contas é essa a realidade a qual estão habituados no ambiente escolar.

Mesmo com os evidentes sinais de deficiência, o sistema educacional se mantém inerte frente às estatísticas que explicitam altos índices de reprovação, desistência e desmotivação profissional docente. Esse entendimento pela prática educativa mostra uma ideia bem simplista de um modelo de transmissão de conhecimentos que reproduz uma metodologia de ensino tradicional, onde o aluno é tratado como um sujeito passível do processo de aprendizagem e o professor é um ser dotado de todo o conhecimento.

De uma perspectiva Freiriana essa seria a chamada educação bancária, um tipo de ensino pautado no pressuposto que o conhecimento deve ser introduzido ao aluno, assim como o dinheiro deve ser depositado em uma conta de banco (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2010). Ensinar é realmente um processo tão simples a ponto de ser definido em poucas palavras tal como foi feito agora? Certamente não é essa a instrução que futuros professores recebem em sua formação acadêmica nos cursos de licenciatura.

O pensamento restrito sobre a educação escolar é fruto de crenças e conflitos estabelecidas frente às dificuldades vivenciadas no exercício da prática docente, principalmente nos anos iniciais de trabalho (BEJARANO; CARVALHO, 2004). Isso contribui com a perpetuação de um modelo tradicionalista no qual o ensino de Física, ou de Ciências de uma forma geral, segue uma sequência de métodos rigorosos e inflexíveis onde o professor alterna suas aulas em explanação de conteúdos e resolução de exercícios fechados.

Não há, de forma alguma, valorização pela atividade investigativa nesse caso, apenas a transmissão de informações construídas empiricamente no decorrer do desenvolvimento científico e a busca pelo aperfeiçoamento de técnicas de leitura e realização de cálculos matemáticos.

Numa tentativa de compreender com mais abrangência a complexidade do ensino, Bejarano e Carvalho (2003) propõem que ensinar é um processo que vai além da racionalidade e aplicação prática de conteúdos empíricos, envolve sentimentos e a capacidade de promover a curiosidade e a capacidade de pensamento crítico e reconstrução de novas ideias e comportamentos. Esse conceito se mostra mais completo e aponta para a perspectiva de que a educação não possui uma receita pronta no sentido de ter uma metodologia encerrada em seu próprio objetivo final. Ensinar é aprender e conhecer, é saber que existem subjetividades que interferem nos processos cognitivos. A filosofia proposta por Paulo Freire concorda com essa perspectiva no momento em que afirma que a educação é um processo que está relacionado com transformações (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2010). Por sua vez, essas transformações, relacionam-se com a capacidade de interferir atividade na sociedade em que se está inserido.

De fato, as reformas educacionais propõem que os sujeitos de aprendizagem desenvolvam competências que os possibilitem intervir em seu meio social. Contudo ainda é muito comum que as escolas continuem promovendo um ensino a parte do cotidiano e da realidade experimental dos estudantes. No que diz respeito a Física, que também é concebida como a mãe de todas as ciências, sua abordagem é trabalhada em um modelo mecanicista que não reproduz o que se conhece como ciência. Não parece incoerente que o estudo dos fenômenos naturais não represente um recorte do cotidiano humano?

Mesmo com o estabelecimento da LDB e dos PCN'S a abordagem da Física apresenta vários empecilhos. O próprio currículo escolar, atrelado a um conteúdo programático extenso e in versátil, contribui com a manutenção do sistema tradicional de ensino. Todavia, o currículo representa apenas o estabelecimento de uma base comum selecionada por um grupo dominante e, de forma alguma, contribui para o processo de ensino aprendido (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2010). É uma responsabilidade extrema para o professor escolher entre o cumprimento do programa e o tratamento didático das informações investigadas. Em termos educacionais o ideal seria conseguir mesclar esses parâmetros, mas isso representa um desafio de proporções consideráveis.

Na condição de professor, amparado pelos princípios pedagógicos e pela perspectiva de educação transformadora, o currículo conteudista não deve sobrepor a aprendizagem real. A ciência deve ser trabalhada como uma ação investigativa e não como um conjunto de assuntos encerrados nos exercícios propostos de um livro didático. Desta forma, surge a necessidade do ensino contextualizado, que representa a abordagem do conteúdo que se relaciona diretamente com a vivência experimental do estudante.

Em busca de enfatizar a compreensão sobre o aprendizado de ciências a partir de agora será realizada uma discussão a respeito da teoria de aprendizagem que fundamenta a proposta desse trabalho.

1.2 A teoria de Ausubel

O fundamento epistemológico que orienta a proposta desse trabalho é a teoria de Ausubel, que constitui a chamada psicologia cognitiva ou simplesmente cognitivismo, e propõe a aprendizagem significativa. Vários projetos que envolvem o ensino de física utilizam esse embasamento tendo em vista que a ideia dos subsunçores agregam aplicabilidade e conhecimento aos fenômenos físicos e podem ser explorados de uma maneira excepcional, promovendo discussões construtivas e a participação ativa do processo de aprendizagem. Os subsunçores são conceitos preexistentes na estrutura cognitiva do estudante que servirão de ancoragem para a construção de novos conceitos (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2010).

Para aprender significativamente o aluno deve reestruturar suas concepções a partir de novas ideias adquiridas. É errado pensar que a aprendizagem significativa ocorra somente no âmbito escolar. Na verdade, os significados se reconstituem na organização cognitiva em todas as etapas do desenvolvimento social do sujeito. Essa reconstrução de significados é o que efetivamente dá forma à estrutura cognitiva (SILVA; SCHIRLO, 2014).

No que diz respeito ao ensino de Física o professor tem o dever de identificar os subsunçores para introduzir os novos conceitos referentes ao conteúdo. Por exemplo, no estudo da Cinemática existem vários termos comuns aos alunos: velocidade, posição, ponto de referência, aceleração, tempo, dentre outros. A ideia que o aluno possui a respeito desses vocábulos pode de alguma forma diferir do sentido científico empregado no conhecimento padrão.

O professor deve então conduzir o aluno a reconstruir sua concepção de um modo mais consistente de acordo com o significado que se deseja explicar. A priori pode parecer um processo simples, mas é preciso lembrar que esses procedimentos envolvem conflitos cognitivos que precisam ser bem resolvidos para que se possa construir novos significados. A mente humana não é uma máquina qualquer que possa ser facilmente operada com a utilização de programação simples. A medida em que a estrutura cognitiva vai se reestruturando, surgem novos subsunçores que podem servir em novas aprendizagens significativas.

Ausubel propõem que a integração de um material na estrutura cognitiva se desenvolve em três fases de aquisição (SILVA; SCHIRLO, 2014). Na primeira fase destaca-se a utilização dos chamados organizadores prévios para manipular a estrutura cognitiva do

aprendiz que não apresenta os subsunçores necessários para a aquisição de novos conceitos. Pode ainda ocorrer que os subsunçores existam mas estejam em um estado de inatividade na estrutura cognitiva do aprendiz. De acordo com Moreira (1999) os organizadores prévios podem ser filmes, fotos, textos, esquemas, mapas conceituais etc. Esses organizadores não podem ser confundidos com o resumo de todo um conteúdo que será explanado pelo professor, mas dever ser abstrato e abrangente para facilitar a aquisição de novos conceitos referentes ao tema que será trabalhado.

A segunda fase exige que o material de integração precisa ser potencialmente significativo e o estudante deve se mostrar disposto a aprender significativamente. Essa etapa é marcada pela tentativa do aluno de relacionar a nova informação com suas concepções prévias buscando reconstruir significados. Para otimizar essa etapa de aquisição é interessante que esse novo material se relacione com aquele que foi apresentado anteriormente durante a primeira fase de integração.

Finalmente, a terceira e última etapa é marcada de fato pela remodelagem de conceitos e pela reconstrução de significados, que acarretam a operação de novos subsunçores para posterior aprendizagem. Essa reorganização se dá através do relacionamento entre os conhecimentos prévios adquiridos ou ativos na primeira etapa de aquisição e a incorporação do novo material potencialmente significativo durante a segunda etapa. Para exemplificar esse processo em termos do ensino de Física, considera-se o conteúdo de Dinâmica.

Durante a primeira fase de integração, a dos conhecimentos prévios, é necessário buscar os subsunçores existentes na estrutura cognitiva dos alunos. Alguns possíveis saberes prévios relacionados ao conteúdo podem ser citados: força, interação, massa, aceleração e movimento. Na ausência ou inatividade de alguns desses é necessário acionar os conhecimentos prévios buscando introduzir esses conceitos iniciais necessários à aquisição da nova informação. Em seguida é preciso apresentar o material potencialmente significativo e despertar o interesse do estudante em incluir os novos conhecimentos a sua estrutura cognitiva. Por fim, através de relações e modelagens internas o aluno reconstruirá novas percepções teóricas e estará apto a novos saberes, por exemplo, momento linear e conservação do movimento.

1.3 Aprendizagem mecânica x Aprendizagem significativa

Para Ausubel coexistem duas formas de assimilação, o aprendizado mecânico e o significativo (MOREIRA, 1999). O aprendizado mecânico ocorre quando um conhecimento é assimilado sem qualquer vínculo direto com os conceitos já existentes na organização cognitiva. Em física, por exemplo, o cálculo vetorial, seja em nível básico ou avançado, traz consigo em uma primeira abordagem, um conflito gerado pela busca de representações que

permitam a visualização do que é explicitado. Frequentemente se encontram acadêmicos em anos iniciais com dificuldades no entendimento de termos como rotacional e divergente. Isso ocorre porque, normal e geralmente, não existem estruturas prévias relacionadas com as ideias introdutórias. Contudo não se pode pensar que nesses casos não há aprendizado.

Já a aprendizagem significativa acontece quando há internalização de conceitos que, de alguma forma, se relacionam com a estrutura cognitiva prévia existente. Nesse caso ocorre a construção de novos significados que vão se estabelecer na estrutura cognitiva, garantindo uma assimilação eficiente e o refinamento de ideias, além da possibilidade de novos conhecimentos (MOREIRA, 1999). No ensino de física, o termo “trabalho”, por exemplo, é comum e corriqueiro sendo um possível subsunçor que pode interligar a construção de novas perspectivas a respeito do tema quando confrontado com a grandeza que relaciona o trabalho produzido por uma força.

Evidentemente a aprendizagem significativa deve ser a prioridade do planejamento das aulas. O que se observa, entretanto, é a manutenção do modelo de aprendizagem mecânica baseada na transmissão do conhecimento sem qualquer relação com os saberes prévios dos estudantes. Como mencionado anteriormente o próprio currículo programático contribui com a continuidade desse tipo de sistema de ensino embasado na sobrecarga conteudista.

As aulas de Física se resumem a explanação de conceitos livres e resolução de exercícios fechados sem o incentivo da inovação e criatividade. Essa realidade também é fruto do descrédito no trabalho docente e na capacidade dos estudantes. O desafio, portanto, é executar planejamentos que objetivem a reconstrução cognitiva, tendo em mente o papel da educação transformadora. Isso envolve um conjunto de variáveis que vão além das intensões do professor, porque existem condições prévias que devem ser observadas para que se consiga aprender significativamente. Se uma aula de ciências não consegue envolver os estudantes, o orador perde espaço e atenção dentro de sala e para que haja aprendizagem significativa o aluno deve escolher fazê-lo.

Toda esta discussão sobre a necessidade da reformulação metodológica do Ensino de Física explicita o motivo pelo qual se tem investido na busca de ferramentas que auxiliem a atratividade escolar dentro de sala. No caso da Física os experimentos didáticos são excelentes recursos que podem ser explorados. É preciso observar, porém, que a simples exposição experimental pode não atender as exigências que estão sendo feitas, o que depende muito do objetivo que se deseja alcançar. Tal meta é delimitada pelo professor, que também tem a responsabilidade de organizar da melhor forma a atividade experimental visando o desenvolvimento de determinadas competências.

1.4 O papel do experimento didático na aprendizagem significativa

O conhecimento empírico dos fenômenos naturais, estudados pela Física, é construído através do tratamento experimental dessa ciência. O chamado Método Científico estabelece um conjunto de etapas a serem desenvolvidas no estudo de uma determinada ocorrência. Tudo inicia com a observação de um fato, por mais simples que possa parecer. Mesmo a queda de um corpo pode ser, e é, um objeto de estudo da Física (JUNIOR; FERRARO; SOARES, 2007). Em seguida é lançado um questionamento a respeito daquele fenômeno. Por que os corpos caem? Novamente pode parecer que seja um questionamento trivial, mas na verdade constitui ciência. Uma hipótese é proposta para explicar a queda dos corpos: Os corpos caem porque existe um agente físico que atua no sentido de atraí-los à superfície da Terra.

É exatamente nesse ponto que a Física se diferencia da filosofia. De forma alguma deve-se pensar que existe uma hierarquia entre essas duas vertentes, mas a Física destaca-se por apoiar-se em resultados experimentais na comprovação de suas hipóteses. Vários experimentos podem ser realizados numa tentativa de provar a hipótese sugerida e na situação em questão verifica-se naturalmente que a maioria dos corpos caem a serem soltos de uma dada altura da superfície terrestre. Contudo, existem alguns corpos que são imunes a essa afirmação. Por exemplo: A Lua não cai sobre a superfície terrestre, tampouco um balão cheio de gás Hélio ou uma melancia na superfície do mar. Portanto conclui-se que o modelo do agente físico que atrai os corpos para a superfície da Terra possui limitações e precisa ser repensada.

Na exemplificação do modelo experimental de Física apresentado, mesmo um sujeito que não seja acadêmico da área pode facilmente argumentar que os corpos caem sobre a Terra devido a ação da gravidade. A internalização dessa informação, contudo, não ocorreu através da investigação científica, mas sim, da aceitação da cultura informativa que de alguma forma chegou até o sujeito. Muitas vezes o ser humano é tão habituado com os fenômenos naturais que não consegue observar as magníficas formas de organização da natureza.

Ao contrário do que prega o senso comum, o trabalho de um cientista não se encerra na resolução de problemas complexos, mas sim no questionamento das mais comuns formas de manifestações e interações naturais. Esse senso investigativo deveria ser incentivado nas escolas que ofertam o ensino de ciências. Ao invés disso, opta-se pela livre imposição de respostas prontas a perguntas que o aluno nem ao menos teve a chance de realizar. Pode parecer um atalho para o aprendizado de ciências, mas na verdade, a resposta pronta encerra toda e qualquer possibilidade de questionamento e restringe o conhecimento científico a uma bolha de resultados que se adequam a teoria trabalhada.

De acordo com Araújo e Abib (2003) as práticas experimentais podem ter diferen-

tes finalidades e enfoques e ser classificadas de acordo com sua ênfase matemática, grau de direcionamento, utilização de novas tecnologias, relações com o cotidiano e montagem de equipamentos. Os trabalhos da área do ensino de física que têm como foco a atividade experimental podem se delimitar a um ou mais desses tópicos centrais. Em uma situação real, a atividade experimental deve abranger o máximo de enfoques possíveis para poder ser explorado da melhor forma.

Tendo em mente os rumos das tendências pedagógicas modernas, que compartilham a ideia de que o aluno deve ser o sujeito ativo de sua própria aprendizagem e o professor atuar como mediador da construção do conhecimento, os experimentos didáticos não podem mais ser utilizados de forma encerrada na obtenção de dados. CARVALHO et al. (2010) dá ênfase à alfabetização científica na educação básica e trata muito bem do tema, ao afirmar que o experimento didático deve promover a ação investigativa e não se limitar a obter a atenção do aluno enquanto o professor ensina principalmente através da transmissão.

A postura didática supracitada caracteriza um modelo pedagógico tradicional ineficaz, do ponto de vista dos novos objetivos da educação contemporânea. A abordagem do ensino pela experimentação dialoga diretamente com o processo de formação docente na medida que prepara o educador para utilizar novas metodologias dentro dos moldes do ensino de Física. Embora não seja a ideal, a reprodução didática é uma prática comum entre os educadores e essa é talvez a principal razão da propagação do ensino de Física tradicional, restrito a resolução de problemas e realização de atividades encerradas em um resultado previamente estabelecido.

Se o professor deseja utilizar um experimento didático ele pode agir de várias formas, mas o modo mais comum é a verificação de um fenômeno físico ou a confirmação de um resultado que será exposto em sala. Embora seja uma inovação, esse tratamento não é coerente com a construção de conhecimento ativa por parte do alunado, porque este se restringe a observar uma ação sem chance de questionamentos ou colocações a respeito do assunto. Por todos esses motivos não se pode dizer que há, nessa abordagem, aprendizagem significativa, mas sim, mecânica.

A maneira mais indicada de apresentar experimentos didáticos é sempre dar ênfase à ação investigativa. Dessa forma o aluno não se restringe a verificar um resultado prévio e nem a observar um fenômeno natural, ele vai além e consegue questionar, formular hipóteses, analisar e concluir. Essas etapas exigirão conhecimentos prévios e técnicas que serão desenvolvidas no decorrer das atividades. A postura do professor é essencial para que os processos de reconstrução conceitual ocorram da maneira correta e quando isso acontece há aprendizagem significativa. Portanto, ao propor uma atividade experimental, o educador não deve de forma alguma dispor os resultados que devem ser alcançados e nem dar respostas prontas às questões que podem surgir. Novamente, o professor deve

atuar como mediador e não transmissor de conhecimentos. O estudante precisa ser incentivado a proceder com ação investigativa buscando compreender os problemas que estão sendo propostos, construir modelos teóricos e verificar suas hipóteses através da prática experimental. Evidentemente haverá discrepâncias e erros, mas é justamente isso o que caracteriza a construção do conhecimento científico e o ser humano consegue abstrair ideias de modo mais eficaz quando corrige suas falhas (CARVALHO et al., 2010).

2 A evolução da teoria ondulatória

A reflexão e a refração são fenômenos luminosos conhecidos desde a era clássica. Os gregos sabiam que quando um feixe de luz atingia um espelho metálico se refletiam com ângulos iguais de inclinação. Essas manifestações foram discutidas por Hero de Alexandria (ARAGÃO, 2006). Os filósofos da antiguidade, desprovidos do rigor metodológico imposto pelas exigências do método científico, formulavam suas hipóteses baseando-se em suas observações. Da mesma forma que se acreditava que a matéria era constituída por átomos, partículas invisíveis e indestrutíveis, pensava-se que a luz era formada por minúsculas partículas que se propagavam no meio promovendo a visão. Grandes pensadores da época, como Demócrito (460-370 a.C.) e Platão (427-347 a. C.), consideravam que a visão era o resultado da interação dessas partículas de luz emitidas dos corpos luminosos e/ou dos olhos que interagiam e criavam as imagens visualizadas (BIEZUNSKI; GIL, 1993). Data daí o surgimento da teoria corpuscular da luz. A teoria ondulatória é contemporânea de sua rival e com o as hipóteses de De Broglie, nas origens da mecânica quântica, as duas teorias foram, de certa forma, conciliadas (NUSSENZVEIG, 1998).

2.1 O conceito de onda

A física moderna tal como é conhecida hoje dispõe de conceitos fundamentais que sustentam todo seu arcabouço de leis e teorias que regem o universo. Essas concepções são criadas e reorganizadas no decorrer de novas descobertas e abordagens. Para exemplificar essa tendência basta refletir o modelo de átomo que foi proposto pelos gregos na época clássica e a estrutura que hoje serve como base para pesquisas no campo da física de partículas. O conceito de onda, tão fundamental quanto o de energia, sofreu vários desenvolvimentos no desenrolar histórico. Mas desde seus primórdios esteve sempre relacionado a um movimento oscilatório que se propaga de um ponto a outro sem que haja o transporte direto de matéria durante a realização de tal processo (NUSSENZVEIG, 2002).

Não foi com a luz que surgiu a ideia de onda, mas sim com o som. Pitágoras (582-500 a.C) afirmou que existia uma relação entre a altura de um som emitido e o comprimento da corda esticada que o produz. Aristóteles (384-322 a.C.) achava que o ar era posto em movimento quando havia propagação sonora (BIEZUNSKI; GIL, 1993). Nesse contexto se originaram as primeiras ideias do que seriam as ondas. Posteriormente, com os trabalhos de Galileu Galileu (1564-1642) e Newton (1642-1727) sobre a dinâmica dos corpos e suas interações fundamentais, foi possível construir um modelo matemático que de fato diferenciou efetivamente as partículas das ondas, porque seu comportamento

é totalmente estranho às leis da mecânica corpuscular.

2.2 Huygens e a teoria ondulatória da luz

Físico, filósofo, matemático e astrônomo o holandês Christiaan Huygens (1629-1695) foi o pioneiro do tratamento ondulatório na descrição da natureza e dos processos de propagação da luz (PIRES, 2008). No seu célebre trabalho *traité de la lumiere*¹ de 1678, propôs a existência de um meio invisível composto por minúsculas partículas que realizavam um movimento vibratório e transmitiam esse movimento a partículas adjacentes, sem o transporte de matéria. Cada elemento secundário que era excitado pelo movimento, vibrava de acordo constituindo uma nova fonte de onda. Esse impulso oscilatório, que se propagava nesse meio misterioso, seria a própria luz, tal como é concebida nas experiências. A esse meio, indispensável para o processo, deu o nome de éter luminífero.

Segundo a hipótese de Huygens a luz era, portanto, o resultado do espalhamento dos choques vibratórios das partículas que constituíam o éter luminífero, promovendo uma onda de mesma natureza que o som, do tipo longitudinal, mas com velocidade indubitavelmente mais elevada. Para Huygens cada frente de onda, que corresponde a região onde se encontram todos os pontos de mesma fase, se propaga no meio e ao atingir pontos secundários, estes se comportavam como novas fontes pontuais que transmitem as novas vibrações (NUSSENZVEIG, 1998).

O tratamento do primeiro princípio da ótica geométrica, segundo a teoria de Huygens, é ilustrado na figura 1 que mostra como as frentes de onda se comportam ao incidir sobre uma barreira opaca com uma fenda em seu centro. Parte da luz fica retida pelo material e, assim, uma pequena região apresenta um aspecto mais escuro em virtude dessa restrição luminosa. Devido ao fenômeno de difração, que é o espalhamento de uma onda em virtude de um obstáculo cujas dimensões são da mesma ordem do comprimento de onda incidente, uma pequena parcela de luz chega ao anteparo alcançando regiões que estão atrás da barreira opaca. Essa é a abordagem de Huygens sobre o princípio da propagação retilínea da luz segundo uma perspectiva ondulatória.

Para efeitos de análise uma representação simplificada das frentes de onda é mostrada na figura 2 na forma de segmentos de reta que se deslocam numa direção estabelecida. Como mencionado anteriormente os principais fenômenos luminosos, alvos de atenção, eram a refração e a reflexão. Portanto, para que a teoria ondulatória da luz tivesse qualquer fio de credibilidade, deveria explicar esses fenômenos. Tomando a representação mostrada na figura 2 é possível averiguar esses comportamentos segundo a proposta de Huygens.

¹ Tratado da luz

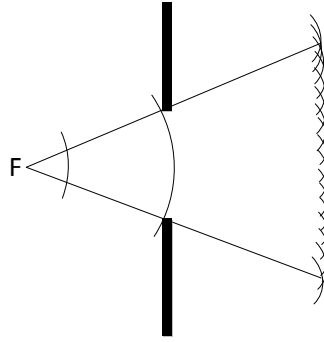


Figura 1 – Fonte luminosa incidindo luz sobre uma fenda.

Fonte: Adaptado de Moyses Nusseinzveig v.2 Fluidos, Oscilações e ondas, Calor.

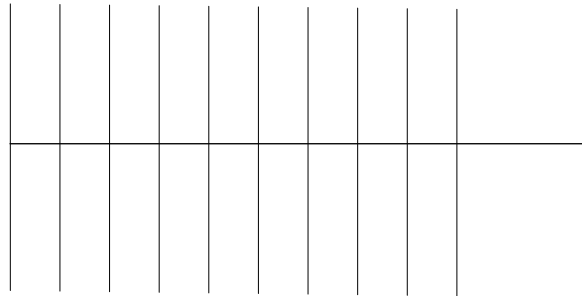


Figura 2 – Esquema simplificado das frentes de onda.

Fonte: Autoria Própria.

Um esboço das frentes de onda que incidem numa superfície refletora formando um ângulo com a normal de valor θ_i é mostrado na figura 3. As ondas refletem-se formando um ângulo θ_r com a interface. Considerando que durante o processo a velocidade da onda é constante, a distância d é percorrida em intervalos de tempos iguais pelas ondas incidente e refletida. Assim, por relações trigonométricas simples, verifica-se que o ângulo incidente é igual ao ângulo de reflexão.

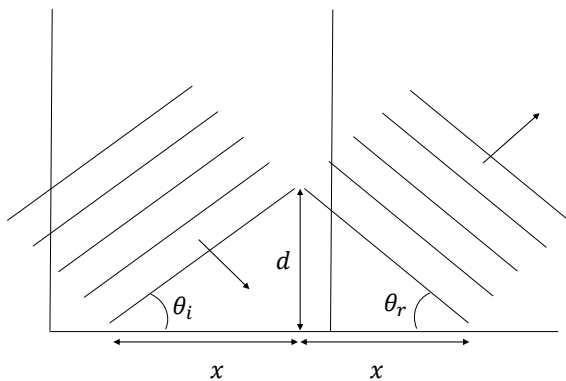


Figura 3 – Representação do fenômeno da reflexão luminosa.

Fonte: Autoria Própria.

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r = \frac{d}{x} \quad (2.1)$$

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.2)$$

Essa é a abordagem de Huygens para o fenômeno da reflexão luminosa. O tratamento da refração, que representa o desvio do raio de luz incidente sobre uma superfície cujo meio é constituído por material diferente, também é plausível e retrata os resultados experimentais. A figura 4 apresenta o comportamento de frentes de onda que transcendem materiais de meios diferentes, sofrendo um desvio.

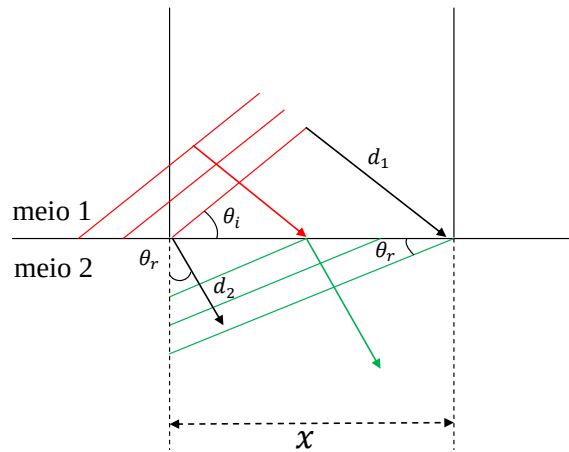


Figura 4 – Esquema simplificado do fenômeno de refração luminosa.
Fonte: Autoria Própria.

Diferente do caso anterior, nesse processo a velocidade de propagação da onda não pode ser tomada como sendo constante. Por isso a consideração que se faz é que o tempo necessário para que frente de onda percorra a distância d_1 , é igual ao tempo para percorrer a distância d_2 (NUSSENZVEIG, 1998).

$$t = \frac{d_1}{v_1} = \frac{d_2}{v_2} \quad (2.3)$$

$$d_1 = \sin \theta_i x \quad (2.4)$$

$$d_2 = \sin \theta_r x \quad (2.5)$$

Substituindo 2.5 e 2.4 em 2.3, obtém-se a relação de Snell-Descartes, explicitada na equação 2.6 e descoberta já em 1621² (ARAGÃO, 2006). Esse era a abordagem da teoria ondulatória para o fenômeno da refração luminosa.

² Essa relação foi a descoberta de cunho teórico mais relevante do período clássico no ramo da ótica.

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2} \quad (2.6)$$

A teoria ondulatória explicava, portanto, a propagação retilínea da luz, a reflexão e a refração, mostrando-se poderosa e precisa. Contudo, mesmo com esse embasamento sólido e sofisticado Huygens, nessa instância, não reuniu muitos adeptos e, durante o século XVIII, a teoria ondulatória da luz foi parcialmente ofuscada devido, principalmente a Newton, que também estabeleceu bases teóricas a respeito da natureza da luz que iam de encontro com as previsões de Huygens.

2.3 A investida de Newton

Em uma célebre obra *Princípios*³, Newton discutiu fenômenos relacionados a mecânica, revolucionando esse ramo da ciência com a introdução de suas famosas leis da dinâmica. Seus trabalhos não se resumiram ao tratamento de sistemas de movimento, ele também enveredou nas pesquisas relacionadas ao som e a luz. Newton por exemplo averiguou o espectro de cores da luz branca e verificou padrões de interferência dando origem aos chamados anéis de Newton (ARAGÃO, 2006).

As leis da mecânica estavam em seu alge e, talvez por isso, Newton tentou uma abordagem sobre a natureza da luz da qual poderia aproveitar seus aspectos dinâmicos. Nesse momento é preciso dar ênfase ao fato de que vários pesquisadores da história da física, como Pires (2008) e Biezunski e Gil (1993), não comungam a ideia de que Newton era um adepto da teoria corpuscular da luz. Limitava-se a declarações evasivas referentes ao assunto e por vezes considerava em suas hipóteses certa aceitação da possibilidade da descrição da luz através de vibrações se propagando.

A teoria corpuscular parte da perspectiva mais antiga e vigente de que a luz é composta por partículas que viajam em linha reta e sofrem fenômenos de reflexão, refração e estão relacionadas com a visão. Ora, se existem corpúsculos que compõem a luz, não parece ser evidente que esses pequenos constituintes também estariam sujeitos aos princípios fundamentais da dinâmica? Baseando-se nessa ideia Newton buscou explicar os fenômenos de reflexão e refração.

Para tratar a reflexão, realizou uma analogia de um corpo que ao colidir elasticamente investe sua componente da velocidade na direção de um dos eixos do sistema de referencia adotado, obedecendo ao princípio da conservação do momento. Para tratar a refração, Newton introduziu a ideia de uma força existente nos meios refringentes que interagem com a luz no momento de seu contato. A essa força deu o nome de força refringente (BIEZUNSKI; GIL, 1993).

³ Especificamente: *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*.

A força refringente atuava no sentido de diminuir a componente de velocidade vertical das partículas que incidiam no meio fazendo com que o vetor velocidade se afastasse da normal a superfície. Nota-se logo aí uma previsão contrária à teoria de Huygens que esperava uma aproximação do feixe luminoso a reta normal. Contudo o que mais instigava questionamentos na hipótese de Newton era o fato de que, em alguns casos, o raio luminoso sofria reflexões e refrações parciais; sendo assim, que fator decisivo atua na determinação desses fenômenos? Newton resolveu esse impasse introduzindo os chamados acessos, que determinavam em última instância se o raio refletia ou refrigia ao atingir a interface separadora (NUSSENZVEIG, 1998).

2.4 A descrição matemática da onda

Os primeiros trabalhos realizados ainda no século XVIII que contribuíram para a aceitação da teoria ondulatória da luz foram realizados pelo matemático inglês Brook Taylor (1685-1731) e posteriormente pelo francês Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) tratando sobre o problema das cordas vibrantes. Esses trabalhos deram fruto a famosa equação de onda tal como é concebida hoje na forma de uma equação diferencial parcial linear de segunda ordem sujeita a condições de contorno que regem seus sistemas físicos. Para deduzir essa equação considera-se uma corda tensionada que realiza um movimento vibratório conforme o esquema da figura 5 (MACHADO, 2004).

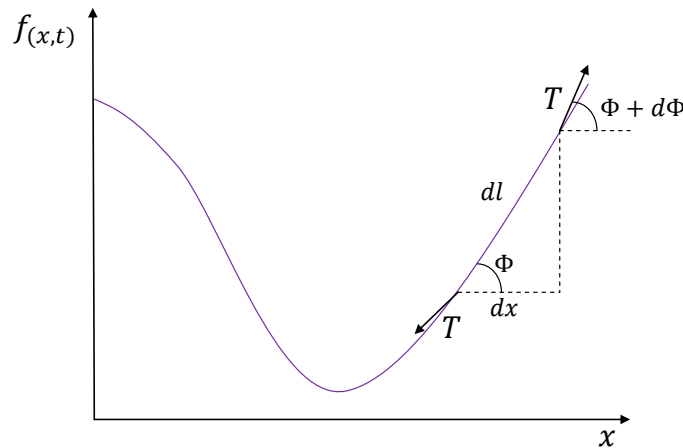


Figura 5 – Onda mecânica se propagando numa corda tensionada.

Fonte: Autoria Própria.

Devido a tração gerada pela propagação da oscilação, a força resultante na direção do eixo x é:

$$F_{rx} = T \cos (\Phi + d\Phi) - T \cos \Phi \quad (2.7)$$

De forma análoga na direção de y a força resultante é:

$$F_{ry} = T \sin(\Phi + d\Phi) - T \sin \Phi \quad (2.8)$$

As funções trigonométricas podem ser expandidas numa série de polinômios de Taylor da seguinte forma:

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} \dots \quad (2.9)$$

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} \dots \quad (2.10)$$

$$\tan \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \frac{2\theta^5}{15} \dots \quad (2.11)$$

Considerando pequenos ângulos de vibração é possível tomar uma aproximação em primeira ordem dos termos trigonométricos dados pela série de Taylor. Essa consideração é conhecida como aproximação paraxial⁴. Assim, a força resultante sobre a corda vibrante na direção de x se anula porque o primeiro termo da série de cossenos independe de Φ . E a força resultante na direção y resulta em:

$$T \sin(\Phi + d\Phi) - T \sin \Phi \approx T \tan(\Phi + d\Phi) - T \tan \Phi$$

$$\tan \Phi = \left[\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]_x$$

$$\tan(\Phi + d\Phi) = \left[\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]_{x+dx}$$

$$F_{ry} = T \left[\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]_{x+dx} - T \left[\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]_x$$

$$\left[\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]_{x+dx} - \left[\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]_x = \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} \right] dx$$

$$F_{ry} = T \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} \right] dx$$

Pelo princípio fundamental da dinâmica, estabelecido por Newton, a força resultante sobre um corpo induz aceleração de modo proporcional.

⁴ $\cos \theta \approx 1$, $\sin \theta \approx \theta$, $\tan \theta \approx \theta$

$$dm \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} \right] = T \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} \right] dx$$

Considerando μ a densidade linear da corda vibrante, suposta homogênea em toda sua extensão, o elemento de massa dm delimitado pelo comprimento dl pode ser expresso por:

$$\mu dl \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} \right] = T \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} \right] dx$$

$$\cos \Phi = \frac{dx}{dl} = 1$$

$$dl = dx$$

$$\mu \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} \right] = T \left[\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} \right]$$

$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

A equação 2.12 é a famosa equação diferencial da onda em uma dimensão, ou simplesmente, equação das cordas vibrantes. Seu grande triunfo decorreu da recorrência às leis da dinâmica fundamental e trouxe a tona a matematização da propagação de uma onda levantando alguns pontos fundamentais sobre essas entidades físicas. Pode-se destacar dois pontos cruciais nessa equação.

O primeiro diz respeito a análise dimensional do termo que multiplica a derivada parcial temporal, que fornece o inverso do quadrado da velocidade de propagação de uma onda. Esse resultado permite supor que, de modo geral, as ondas se propagam com velocidade constante. A segundo questão é que as soluções da equação de onda obedecem o princípio da sobreposição. O encontro de duas ondas, segundo essas soluções, não resulta no choque mecânico de matéria, tal como ocorre com as partículas que colidem, mas sim na adição de suas contribuições individuais.

Essas informações permitiram diferenciar com maior rigor conceitual as ondas das partículas. Posteriormente, considerando sistemas contínuos d'Alembert obteve um resultado mais geral para a propagação das chamadas ondas esféricas que se dispõem em todas as direções e exprimiu a equação de ondas explícita em 2.13.

$$\nabla^2 \psi(\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

3 O fenômeno da interferência

Um ponto crucial para a supremacia da teoria ondulatória da luz foi o famoso experimento de Thomas Young (1773-1829), conhecido como o experimento das duplas fendas ou também como o experimento da fenda dupla de Young (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013).

Conduzido em 1801, Young idealizou e executou um aparato que permitiu verificar propriedades de interferência e difração dos raios luminosos. Os resultados obtidos não podem ser explicados pela teoria corpuscular porque envolve fenômenos que apenas as ondas participam. Os avanços da teoria ondulatória não se encerraram nesse experimento. Com o trabalho de James Clerk Maxwell (1831-1879) três grandes ramos da física, a eletricidade, o magnetismo e a ótica foram unificados em uma única teoria de princípio fundamental.

As célebres equações de Maxwell do eletromagnetismo clássico levaram a crer que existia uma relação direta entre os campos elétrico e magnético e a luz. Segundo sua hipótese, a luz era o resultado da propagação de uma perturbação do campo eletromagnético em um meio não condutor na forma de ondas transversais (TORT et al., 2004). Esse trabalho também foi de importância fundamental para a teoria ondulatória da luz.

Para realizar a análise teórica do experimento de Young, na tentativa de construir um modelo que preveja a formação do padrão de interferência, as equações de Maxwell desempenham papel indispensável. É importante ressaltar que Maxwell foi contemporâneo de Young e seu trabalho foi publicado durante a década de 1860. Isso significa que houve um hiato temporal entre o ano em que Young apresentou seus resultados experimentais e o momento em que se foi possível construir um embasamento matemático sólido que explicasse o fenômeno observado.

3.1 O experimento das duplas fendas

Thomas Young era formado em medicina e deu contribuições nas áreas da ótica, anatomia, teoria da elasticidade e a egiptologia (NUSSENZVEIG, 1998). Newton havia verificado anteriormente fenômenos de interferência da luz, mas Young foi o primeiro a dar o devido tratamento baseando-se no princípio de Huygens para explicar a ocorrência. Assim como seu antecessor, Young pensava as ondas luminosas como as perturbações que se propagavam na superfície de um lago. Percebeu que quando oscilações provenientes de duas fontes se interceptavam havia duas possibilidades. Se a crista de uma frente de onda encontrava outra a superfície do lago se erguia numa sobreposição de efeitos devido as

duas ondas. Quando uma crista de onda encontrava o vale de outra, o que se observava é que a superfície permanecia inerte com a anulação dos efeitos de cada oscilação. A figura 6 mostra um esquema do fenômeno de interferência para ondas esféricas.

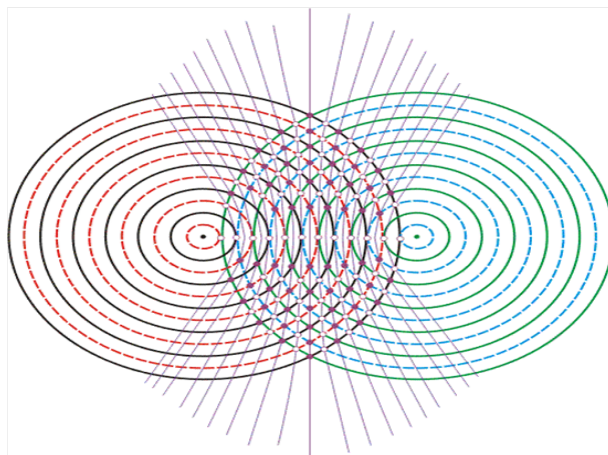


Figura 6 – Ilustração da interferência de ondas esféricas

Fonte: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/figuras/sob12.gif>. Acessado em 11/11/2017

As imagens 7 e 8 mostram, respectivamente um esquema de interferência construtiva e destrutiva de duas ondas unidimensionais. Young afirmou que a luz era passível das mesmas propriedades e um dos fatores que mais o influenciou a formular essa hipótese foi um dos princípios da ótica geométrica até então não citado. O enunciado afirma que dois raios de luz, ao se interceptarem, mantêm suas respectivas trajetórias como se o outro não existisse (JR; FERRARO; SOARES, 1996). Se a luz fosse composta por partículas deveria ocorrer uma colisão no instante de encontro dos dois feixes.

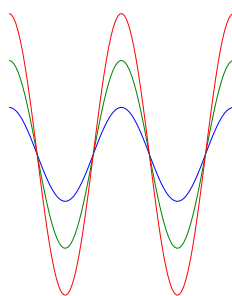


Figura 7 – Interferência construtiva.

Fonte: Autoria Própria.

Para verificar sua teoria, Young construiu um aparato onde um feixe de luz incide sobre um obstáculo com um pequeno furo de alfinete e posteriormente sobre outro material opaco com dois furos. A frente desses obstáculos há um anteparo posicionado. O resultado obtido e observado no anteparo não foi dois pontos luminosos, como previa a teoria corpuscular, mas uma sequência de faixas luminosas e escuras que constituíam um magnífico padrão de interferência.

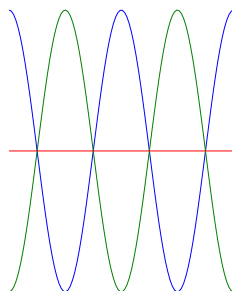


Figura 8 – Interferência destrutiva.
Fonte: Autoria Própria.

A figura 9 apresenta um esboço do experimento das duplas fendas. A necessidade do primeiro furo é garantir a coerência entre os feixes incidentes, isso é, que chegassem com a mesma fase aos furos. Pelo princípio de Huygens, quando o sinal luminoso penetra as fendas, aqueles pontos se comportam como novas fontes luminosas e propagam parte da onda através de um processo chamado de difração, que é o espalhamento que ocorre quando a oscilação encontra um obstáculo cujas dimensões se aproximam do comprimento de onda incidente. Assim, as ondas coerentes chegam ao segundo obstáculo e difratam-se ao passar pelos furos como mostrado na figura 9. As ondas difratadas interferem entre si formando pontos de máximo e mínima interferência. Segundo Young as regiões iluminadas no anteparo eram provenientes dos pontos que interferiram construtivamente e as franjas escuras dos pontos que interferiram destrutivamente.

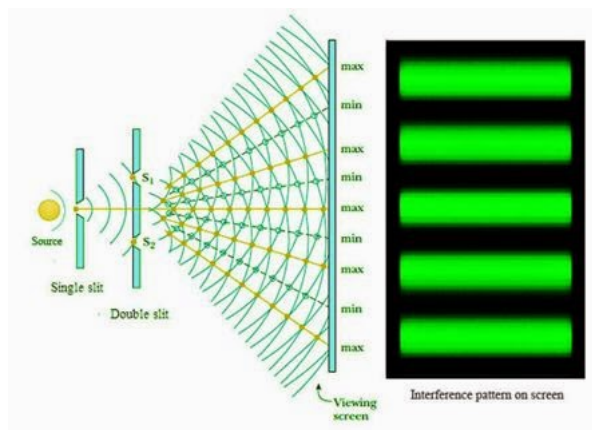


Figura 9 – Experimento de Young.

Fonte: <http://leigui.blogspot.com.br/2015/02/do-eter-relatividade.html>. Acessado em: 11/11/2017

3.2 Maxwell e o eletromagnetismo clássico

Em 1873, J.C. Maxwell em seu trabalho intitulado "Tratado sobre a eletricidade e o magnetismo" unificou dois grandes ramos da física através das descobertas de Michael

Faraday (1791-1867) e André-Marie-Ampere (1775-1836) (POLKINGHORNE, 2011). Utilizando uma abordagem matemática sólida, elaborou quatro célebres equações que descreviam todos os fenômenos eletromagnéticos e realizou uma correção de cunho teórico de importância fundamental para o estudo das ondas eletromagnéticas. Se essas equações forem aplicadas em regiões onde não existem cargas, como no vácuo por exemplo, elas se resumem a equações diferenciais acopladas explicitadas entre 3.1 e 3.4.

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Para desacoplá-las é preciso aplicar o rotacional em 3.3 e 3.4 (GRIFFITHS, 2011). Dada a propriedade do cálculo vetorial que estabelece que:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (3.5)$$

Aplicando o rotacional em 3.3:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \epsilon_0 \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} &= -\nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \\ \nabla^2 \vec{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

O cálculo do rotacional de 3.4 é feito de forma análoga:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla \times \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E}) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \epsilon_0 \left(\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \right) \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} &= -\nabla^2 \vec{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \left(\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \right) \end{aligned}$$

$$\nabla^2 \vec{B} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.7)$$

As equações de Maxwell desacopladas para o campo elétrico e magnético, aplicadas a regiões onde não existem cargas são equações diferenciais parciais lineares de segunda ordem homogêneas e têm a mesma estrutura da equação de onda 2.13. Comparando 3.6 e 3.7 com 2.13 verifica-se que a velocidade de onda das perturbações eletromagnéticas de Maxwell é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3.8)$$

Os valores dessas constantes eletromagnéticas eram conhecidos e de forma surpreendente o cálculo da velocidade coincidiu com o valor da velocidade de propagação da luz que na época já era mensurada. Maxwell concluiu que a luz é uma onda eletromagnética gerada pelas sucessivas variações do campo elétrico e magnético que se transmitem de um ponto a outro do espaço. As variações dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares entre si e também à velocidade de propagação da onda. A figura 10 mostra um esboço da propagação de uma onda eletromagnética.

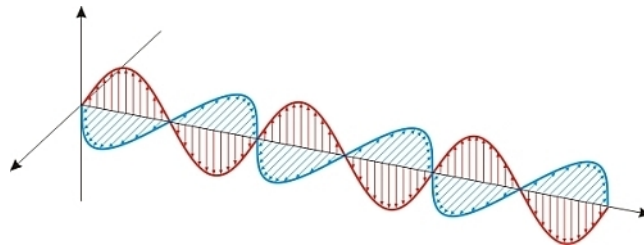


Figura 10 – Onda eletromagnética.

Fonte: <https://www.armstrongeconomics.com/wp-content/uploads/2016/03/Electromagnetic-Wave.jpg>. Acessado em 20/11/2017

As equações de onda para o campo elétrico e magnéticos admitem soluções senoidais da forma:

$$\vec{E} = E_0 \cos(kz - \omega t) \vec{i} \quad (3.9)$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(kz - \omega t) \vec{j} \quad (3.10)$$

Um tópico fundamental do eletromagnetismo clássico é o teorema de Poynting que trata do trabalho realizado no deslocamento de uma carga devido a ação da força eletromagnética e expressa a quantidade de energia por unidade de tempo e área transportada

pelos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ (GRIFFITHS, 2011). A potencia propagada por unidade de área recebe o nome de vetor de Poyting e é dado pela 3.11.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}(\vec{E} \times \vec{B}) \quad (3.11)$$

Pela equação 3.3 é possível encontrar uma relação entre a amplitude de $\vec{E}$ e $\vec{B}$, para tanto é preciso levar em consideração o caráter perpendicular desses campos.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times [E_0 \cos(kz - \omega t)]\vec{i} &= -\frac{\partial}{\partial t} [B_0 \cos(kz - \omega t)]\vec{j} \\ -E_0 k \sin(kz - \omega t)\vec{i} &= -B_0 \omega \sin(kz - \omega t)\vec{j} \\ E_0 \vec{i} &= \frac{\omega}{k} B_0 \vec{j} = c B_0 \vec{j} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Usando a 3.12 em 3.11:

$$\begin{aligned} \vec{S} &= \frac{1}{\mu_0}(\vec{E} \times \vec{B}) = \frac{1}{\mu_0} \left(E\vec{i} \times \frac{E}{c}\vec{j} \right) = \frac{1}{c\mu_0} E^2 \vec{k} = c\epsilon_0 E^2 \vec{k} \\ \vec{S} &= c\epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t) \vec{k} \end{aligned} \quad (3.13)$$

O comprimento de onda da luz na faixa visível é pequeno e a frequência relativamente alta, variando entre os valores de ordem 10^{14} a 10^{15} Hz. Isso dificulta a medição da energia transportada em cada oscilação. Por isso costuma-se tomar a média de $\vec{S}$ porque qualquer medida que seja realizada engloba várias oscilações. Por fim a grandeza escalar de 3.13 recebe o nome de intensidade luminosa ou radiância e representa a potência dissipada por unidade de área em cada vibração (GRIFFITHS, 2011). Nesse caso também convém adotar a média ao invés do valor variável com o cosseno. Quanto maior a intensidade luminosa maior a energia proveniente da fonte por radiação.

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad (3.14)$$

3.3 Interferência luminosa

O fenômeno da interferência ocorre devido ao efeito da sobreposição dos campos eletromagnéticos que compõem as ondas que estão realizando tal processo. Para realizar a

análise qualitativa da interferência luminosa deve-se verificar o comportamento do campo resultante devido a soma de seus efeitos individuais. O vetor $\vec{E}$ pode ser entendido como um análogo do campo elétrico da onda luminosa e serve para averiguar esses efeitos (PEDROTTI; PEDROTTI, 1993). A figura 11 mostra um esquema de frentes de ondas planas produzidas pelos campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ que interferem no ponto P. Para simplificar os cálculos supõe-se que as ondas sejam monocromáticas.

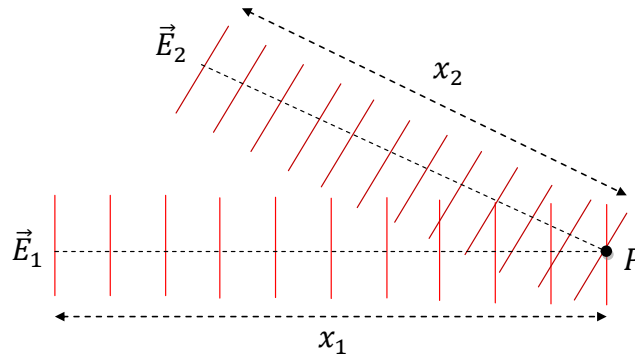


Figura 11 – Feixes luminosos que interferem no ponto P

Fonte: Autoria Própria.

Os vetores que representam os sinais luminosos na figura 11 devem ser soluções da equação de onda 3.6.

$$\vec{E}_1 = E_{01} \cos(kx_1 - \omega t + \phi_1) \quad (3.15)$$

$$\vec{E}_2 = E_{02} \cos(kx_2 - \omega t + \phi_2) \quad (3.16)$$

Em 3.15 e 3.16 ϕ_1 e ϕ_2 representam, respectivamente, constantes associadas a fase de cada onda. Pelo princípio da sobreposição, o campo resultante no ponto P é dado por:

$$\vec{E}_r = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (3.17)$$

A irradiância ou intensidade luminosa é dada pela equação 3.14, cuja unidade é o Watts por metro quadrado. No ponto P seu valor será de:

$$I = \epsilon_0 c \langle \vec{E}_r^2 \rangle = \epsilon_0 c \langle \vec{E}_r \cdot \vec{E}_r \rangle$$

$$I = \epsilon_0 c \langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \rangle$$

$$I = \epsilon_0 c (\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle)$$

$$I = \epsilon_0 c (\langle \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle) \quad (3.18)$$

Na equação 3.18, pela relação de intensidade luminosa 3.14, $\epsilon_0 c \langle \vec{E}_1^2 \rangle = I_1$ e $\epsilon_0 c \langle \vec{E}_2^2 \rangle = I_2$ são as irradiâncias espectrais individuais devidas, respectivamente, a $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$. e o termo $2\epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$ é chamado de termo de interferência e será denotado por I_{12} . Com isso a 3.18 pode ser escrita como:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (3.19)$$

Se a luz assumisse o comportamento de uma partícula clássica, era de se esperar que a intensidade luminosa resultante no ponto P fosse dado por $I = I_1 + I_2$ (PEDROTTI; PEDROTTI, 1993). A presença do terceiro termo na equação indica um comportamento ondulatório. Observando a relação percebe-se que quando os campos são ortogonais, ou seja, se as ondas eletromagnéticas se cruzam de forma perpendicular, elas não interferem entre si. Quando os campos são paralelos há interferência e ela pode ser construtiva, quando os campos estão orientados no mesmo sentido, ou destrutiva, quando estão orientados em sentidos contrários. Continuando a exploração dos termos que participam da 3.19:

$$I_{12} = 2\epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$$

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(kx_1 - \omega t + \phi_1) \cos(kx_2 - \omega t + \phi_2) \quad (3.20)$$

$$\alpha \equiv (kx_1 + \phi_1)$$

$$\beta \equiv kx_2 + \phi_2$$

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \quad (3.21)$$

Dada a propriedade trigonométrica $2 \cos A \cos B = \cos(A + B) + \cos(A - B)$ e tomando $A \equiv (\alpha - \omega t)$ e $B \equiv (\beta - \omega t)$ a 3.21 se reduz a:

$$2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} [\langle \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) \rangle + \langle \cos(\beta - \alpha) \rangle] \quad (3.22)$$

Na 3.22 o primeiro termo cosseno que depende da frequência da onda luminosa, oscila rapidamente entre -1 e 1 de forma que seu valor médio é nulo. Assim a equação se torna:

$$2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} + \langle \cos(\beta - \alpha) \rangle$$

$$2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} + \langle \cos k(x_2 - x_1) + \phi_2 - \phi_1 \rangle$$

$$2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} + \langle \cos \delta \rangle \quad (3.23)$$

$$I_{12} = \epsilon_0 c \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \langle \cos \delta \rangle \quad (3.24)$$

Onde $\delta = k(x_2 - x_1) + \phi_2 - \phi_1$. Para os termos I_1 e I_2 são válidas as seguintes relações:

$$I_1 = \epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \rangle = \epsilon_0 c E_{01}^2 \langle \cos^2(\alpha - \omega t) \rangle$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{01}^2 \quad (3.25)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{02}^2 \quad (3.26)$$

Para facilitar as contas, supõe-se que na 3.24 os campos são paralelos ($\vec{E}_{01} || \vec{E}_{02}$). Com isso, dado o valor de I_1 e I_2 , respectivamente pelas 3.25 e 3.26, o termo I_{12} pode ser expresso por:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (3.27)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (3.28)$$

Que é uma abordagem muito conveniente do ponto de vista técnico porque consegue tratar a interferência luminosa através de grandezas escalares. O termo δ é considerado constante no caso em que as ondas são monocromáticas. Nesse caso, $\langle \cos \delta \rangle = \cos \delta$. A figura 12 mostra o comportamento da intensidade luminosa em função da fase quando duas fontes com diferentes intensidades estão interferindo. Os picos máximos ocorrem quando $I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ e correspondem aos pontos onde $\delta = 2n\pi$ com $n = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$.

Os picos mínimos, por outro lado, ocorrem quando $I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$, que assume esse valor onde $\delta = (2n + 1)\pi$ com $n = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$. Como as intensidades são diferentes, numa interferência destrutiva a curva não toca o eixo horizontal. Quando as fontes possuem a mesma amplitude os picos máximos são $I_{max} = 4I_0$ e os mínimos $I_{min} = 0$. Nesse caso a curva toca o eixo horizontal e a intensidade luminosa se anula completamente, ocasionando a formação de uma franja desprovida de qualquer brilho, ou seja, as franjas escuras que foram observadas por Young. A figura 13 esboça esse fenômeno.

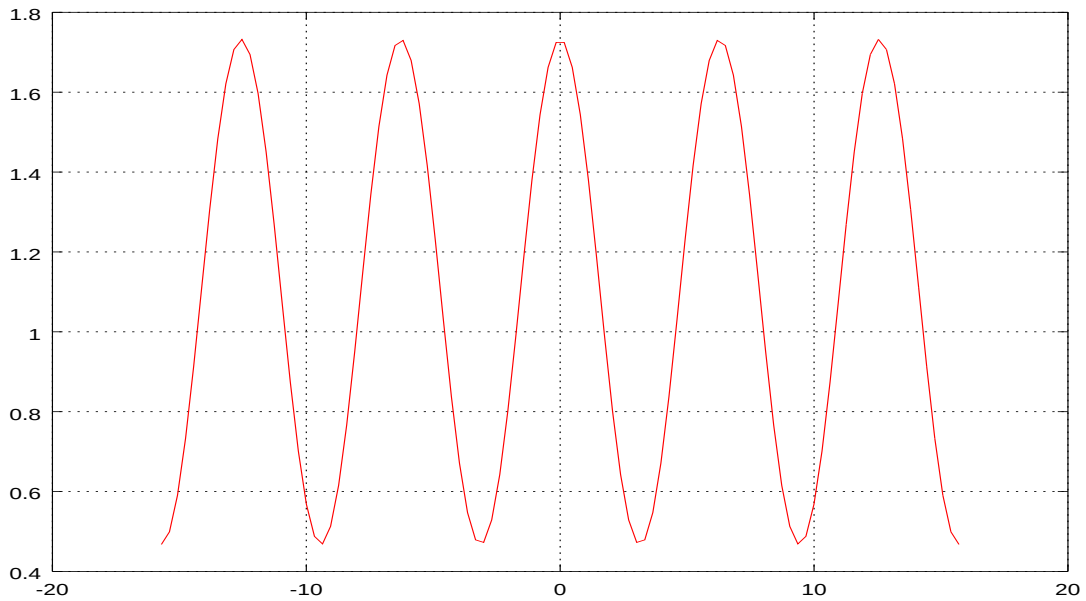


Figura 12 – Picos de interferência de duas fontes com intensidades de valor 1 e 0,1.
Fonte: Autoria Própria.

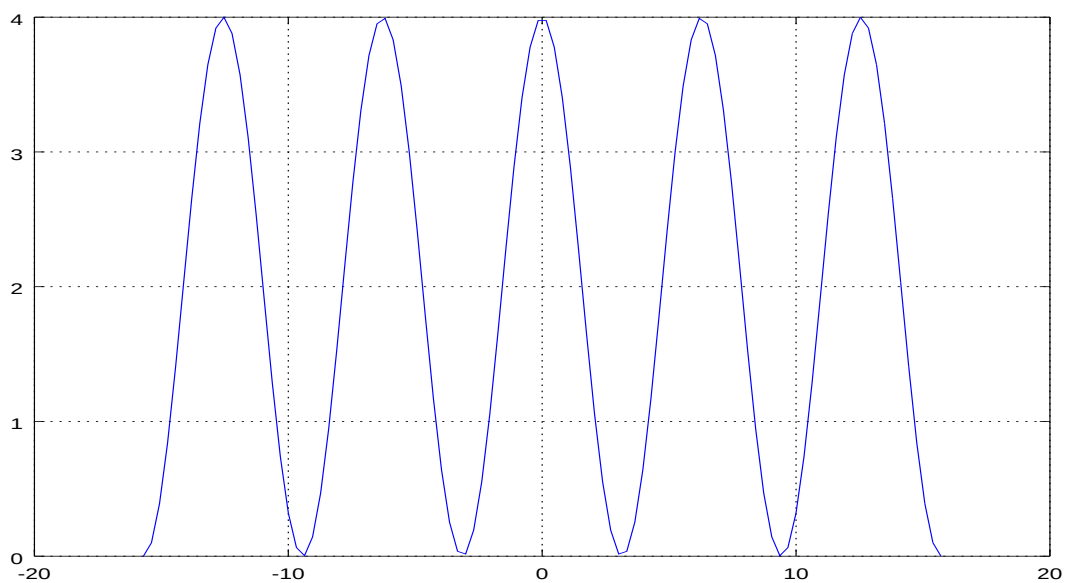


Figura 13 – Picos de interferência de fontes com mesmas intensidades de valor 1.
Fonte: Autoria Própria.

4 Produto educacional

Com o objetivo de disponibilizar um material de apoio didático para a abordagem do tema *As propriedades ondulatórias das luz*, esse roteiro de atividades apresenta um conjunto de experimentos de baixo custo que podem facilmente serem reproduzidos no ambiente escolar, ou mesmo em laboratórios sofisticados de Física.

Como discutido no capítulo 1 desse trabalho é importante ressaltar que a prática experimental dever atuar no sentido de promover a ação investigativa e não como uma atividade encerrada em um resultado pronto. Os experimentos relacionados ao comportamento ondulatório da luz são extremamente sensíveis a ruídos e intervenções externas, de forma que é bastante comum encontrar resultados que possam divergir da teoria. Evidentemente todos os experimentos propostos foram realizados, mas o objetivo principal não se restringe a promover a verificação de um fenômeno físico, mas também, desenvolver no estudante a curiosidade, criatividade, imaginação e senso científico.

De acordo com PERUZZO (2012) resultados inesperados promovem um aprendizado mais significativo, porque induzem a busca de respostas que justifiquem estes dados obtidos. Aliás, essa atitude caracteriza a ação científica. Portanto, não é interessante que o professor, ao propor para seus alunos estas atividades experimentais, estabeleça os resultados que os estudantes devem obter. Em Física, não é o experimento que se adéqua a teoria, mas a teoria que se adapta ao experimento.

Vale ressaltar, por fim, o papel mediador do educador frente ao desenvolvimento da aprendizagem do educando que, por sua vez, deve agir como um sujeito ativo do seu processo de aprendizagem.

4.1 Experimento 1: O comportamento da luz

4.1.1 Objetivos

- Verificar a forma de manifestação do comportamento luminoso, relacionando-o com outros fenômenos físicos.
- Questionar sobre a Natureza da luz, identificando as características ondulatórias e corpusculares.
- Pesquisar sobre os princípios da óptica geométrica, identificando-os na numa atividade experimental.

4.1.2 Materiais necessários

- 1 Lanterna
- 3 Espelhos planos
- 1 anteparo



(a) Lanterna de Led

(b) Anteparo

(c) Espelhos planos

Figura 14 – Materiais utilizados na realização do primeiro experimento.

Fonte: Autoria Própria.

4.1.3 Fundamentação teórica

De uma forma bem simples, uma onda pode ser definida como uma perturbação que se propaga de um ponto a outro, sem o transporte direto de matéria (BÔAS; DOCA; BISCOLOLA, 2007). Já uma partícula pode ser entendida como a minúscula porção de um corpo, que por sua vez constitui uma parte da matéria. "A matéria é tudo que tem massa e ocupa um lugar no espaço" (CANTO; COTIDIANO, 2007, p.23).

Existe uma lei fundamental na natureza que rege o comportamento da matéria e enuncia que dois corpos não podem ocupar o mesmo espaço ao mesmo tempo. Quando dois corpos se encontram em uma mesma posição, num mesmo instante, ocorre um choque mecânico, ou seja, uma colisão, cujas proporções e consequências dependerão das características físicas dos corpos colidores e das condições iniciais do sistema. Essa lei, entretanto, não é válida para o grupo que constitui as ondas.

Quando duas ondas se encontram em um determinado ponto, ocorre uma sobreposição de efeitos, constituindo o que os físicos chamam de interferência ondulatória. Os efeitos dessa interferência dependerão das características das frentes de ondas incidentes no momento de encontro como discutido anteriormente. Esse efeito pode facilmente ser verificado quando se promove a perturbação da superfície da água contida num recipiente em dois pontos distintos num mesmo instante.

4.1.4 Procedimentos

Posicione os três espelhos e o anteparo sobre uma mesa num mesmo nivelamento horizontal. Acione a lanterna e faça incidir um feixe luminoso sobre um dos espelhos. Observe onde é refletido o feixe luminoso incidente e ajuste o espelho de tal forma que o feixe luminoso possa atingir o outro espelho adjacente. Repita o procedimento com o segundo espelho, fazendo o feixe atingir o terceiro espelho. Por fim, faça o terceiro espelho mirar o feixe sobre o anteparo.

4.1.5 Análise de Dados

1. Verifique se o Feixe luminoso foi capaz de atingir o anteparo.
2. Cite quais são os princípios da óptica geométrica e observe se eles estão de acordo com os fenômenos observados nessa prática experimental.

4.2 Experimento 2: Lupa caseira de baixo custo

4.2.1 Objetivos

- Averiguar o fenômeno da difração, relacionando-o com os processos que ocorrem na natureza.
- Constatar que a luz apresenta propriedades de difração, utilizando materiais de fácil aquisição.
- Construir uma hipótese científica para a explicação do fenômeno observado, levando em consideração os resultados experimentais realizados na primeira atividade proposta.

4.2.2 Materiais necessários

- 1 seção quadrada de papel cartolina
- 1 alfinete
- 1 livro ou material de leitura

4.2.3 Fundamentação teórica

A difração constitui um fenômeno exclusivamente ondulatório que se caracteriza pelo espalhamento da onda que incide sobre um obstáculo cujas dimensões são da mesma

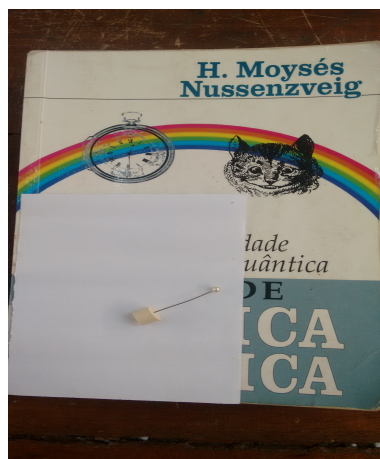


Figura 15 – Materiais utilizados na confecção do segundo experimento.
Fonte: Autoria Própria.

ordem que o comprimento da onda incidente. Quanto mais próximo seja as proporções entre o comprimento de onda e o obstáculo, maior é o espalhamento ondulatório. A figura 16 apresenta um esquema ilustrativo do fenômeno da difração luminosa.

É importante ressaltar que, sobre hipótese alguma, uma partícula macroscópica é passível desse processo. Sempre que um corpo encontra um obstáculo podem ocorrer apenas uma colisão, ou a passagem do objeto, mas nunca um espalhamento do mesmo.

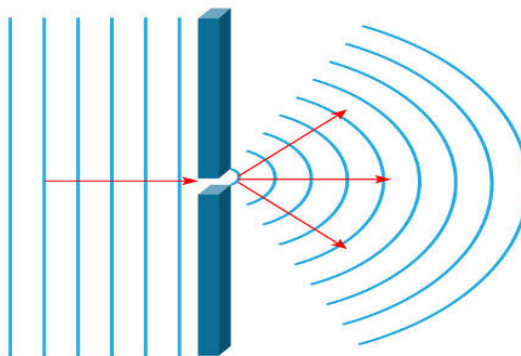


Figura 16 – Imagem ilustrativa do fenômeno da Difração luminosa.
Fonte: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/upload/conteudo/difracao-fenda-pequena.jpg>.
Acessado em: 28 de Janeiro. 2018

4.2.4 Procedimentos

Utilizando o alfinete faça um pequeno furo na cartolina e observe através desse orifício as letras do livro ou material de leitura que esteja sendo utilizado (PERUZZO, 2012). Relacione as proporções dos caracteres quando vistos livres e através do orifício. A figura 17 mostra a imagem obtida.

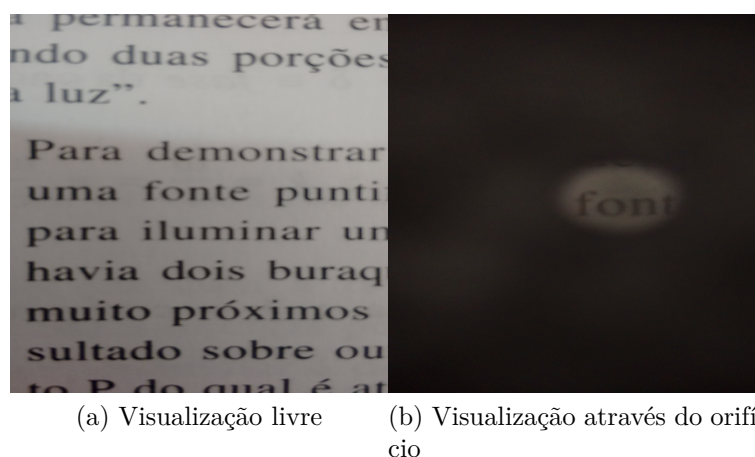


Figura 17 – Imagens obtidas durante a realização da segunda atividade experimental.
Fonte: Autoria Própria.

4.2.5 Análise de Dados

1. Foi possível verificar uma diferença no tamanho das letras quando vistas nas duas situações?
2. Algum princípio da óptica geométrica prevê o resultado obtido nessa prática experimental?
3. Se o orifício fosse feito com um objeto cujas proporções são consideravelmente maior que as do alfinete, por exemplo a ponta de um lápis, haveria alguma variação no fenômeno observado?
4. Elabore uma hipótese para os resultados obtidos.

4.3 Experimento 3: Sombra de gigante

4.3.1 Objetivos

- Continuar o estudo do processo de difração, associando fenômenos físicos comuns do cotidiano.
- Questionar sobre os processos de espalhamento luminoso, relacionando-o com os princípios da óptica geométrica.
- Analisar cientificamente um processo natural, construindo modelos teóricos que o expliquem.

4.3.2 Materiais utilizados

- 1 pente fino
- 1 lanterna
- 1 anteparo

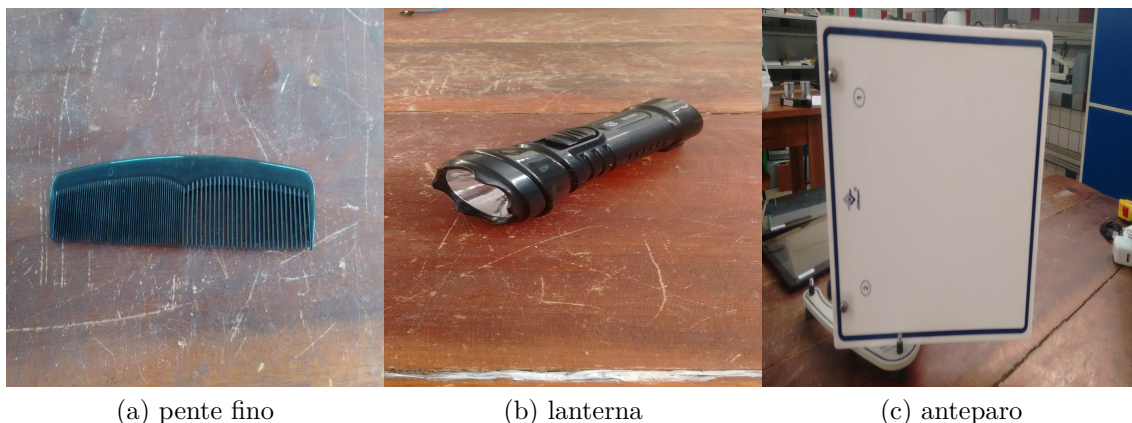


Figura 18 – Materiais utilizados na terceira prática experimental
Fonte: Autoria Própria.

4.3.3 Fundamentação teórica

A formação de uma sombra é o resultado da propagação retilínea da luz. Ao encontrar um obstáculo o feixe luminoso mantém sua trajetória constante sem realizar qualquer contorno.

A fonte luminosa pode ser pontual, cujas dimensões são desprezíveis em comparação com a trajetória do feixe, ou extensa quando possui dimensões comparáveis às distancias percorridas pelos raios luminosos. Nesse experimento a lâmpada constitui uma fonte extensa em razão das condições de escala em que a atividade foi realizada.

A óptica geométrica prevê a formação de uma sombra quando um feixe luminoso proveniente de uma fonte extensa atinge um obstáculo, e explica que o aumento da sombra produzida em razão do afastamento do anteparo é resultado da divergência dos raios. A teoria ondulatória, por outro lado, afirma que esse efeito ocorre devido as propriedades de espalhamento luminoso, que constitui a difração.

4.3.4 Procedimentos

Posicione o anteparo a frente da lanterna e acione-a de forma que o feixe de luz incida sobre o anteparo. Em seguida ponha o pente logo a frente do anteparo e verifique a formação da sombra dos dentes do pente no anteparo. Em seguida, afaste gradativamente

o pente na direção da lanterna e observe o que acontece com a sombra (PERUZZO, 2012). A figura 19 mostra as etapas do desenvolvimento do experimento.



(a) Arranjo experimental (b) Pente próximo ao anteparo (c) Pente afastado do anteparo

Figura 19 – Imagens da montagem e realização do experimento nos dois momentos.
Fonte: Autoria Própria.

4.3.5 Análise de Dados

1. Faça um esboço da formação de uma sombra com base nos princípios da propagação retilínea da luz.
2. Com base nos resultados dessa atividade, pesquise e redija uma explicação sobre o porquê não é possível que a luz contorne uma porta, enquanto tal façanha é facilmente realizada pelo som.

4.4 Experimento 4: Padrão de difração

4.4.1 Objetivos

- Observar um padrão de difração.
- Iniciar o estudo sobre o processo de interferência.
- Construir uma hipótese científica que explique o fenômeno observado.

4.4.2 Materiais utilizados

- 1 lanterna.

4.4.3 Fundamentação teórica

Diferenciam-se dois tipos de padrões luminosos formados pela sobreposição ondulatória: O padrão de difração e o de interferência. De acordo com Braun e Braun (1994) a única diferença entre estes padrões é que o primeiro é formado pelo espalhamento de uma única fonte, enquanto o segundo é criado por mais fontes. Em ambos os casos ocorrem sobreposições ondulatórias e a formação de picos máximos e mínimos. O padrão de difração luminosa é caracterizado pela formação de sucessivas franjas claras e escuras.

4.4.4 Procedimentos

Desmonte a parte superior da lanterna e verifique que existe um espelho côncavo cujo foco coincide com a posição da fonte luminosa quando o aparato esta montado. A figura 20 mostra os materiais.



Figura 20 – Lanterna desmontada. O espelho esférico garante que o feixe luminoso formado seja propagado numa direção paralela ao seu eixo.

Fonte: Autoria Própria.

Agora, ajustando o espelho manualmente, sem fixá-lo na sua posição original, ligue a lanterna e observe a imagem formada. A figura 21 mostra o resultado obtido.

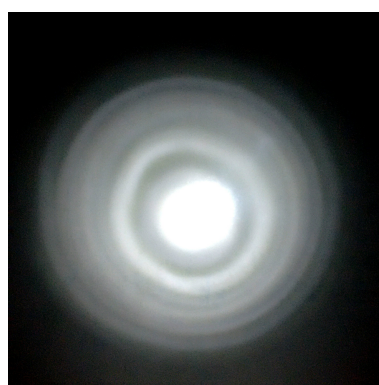


Figura 21 – Imagem obtida através da realização da prática experimental 4.

Fonte: Autoria Própria.

4.4.5 Análise de Dados

1. Como ocorre a formação de um padrão de difração?
2. Por que o reajuste do espelho ocasiona a formação dessa imagem?
3. Por que as fontes luminosas usuais, como as lâmpadas de uma residência, não formam um padrão semelhante quando são acionadas?

4.5 Experimento 5: Interferência luminosa

4.5.1 Objetivos

- Verificar a formação de um padrão de interferência luminosa.
- Averiguar as condições para a formação de um padrão de interferência.

4.5.2 Materiais necessários

- 1 pente fino
- 1 laser
- 1 anteparo



(a) Pente fino

(b) Laser

(c) Anteparo

Figura 22 – Materiais utilizados na prática experimental 5.
Fonte: Autoria Própria.

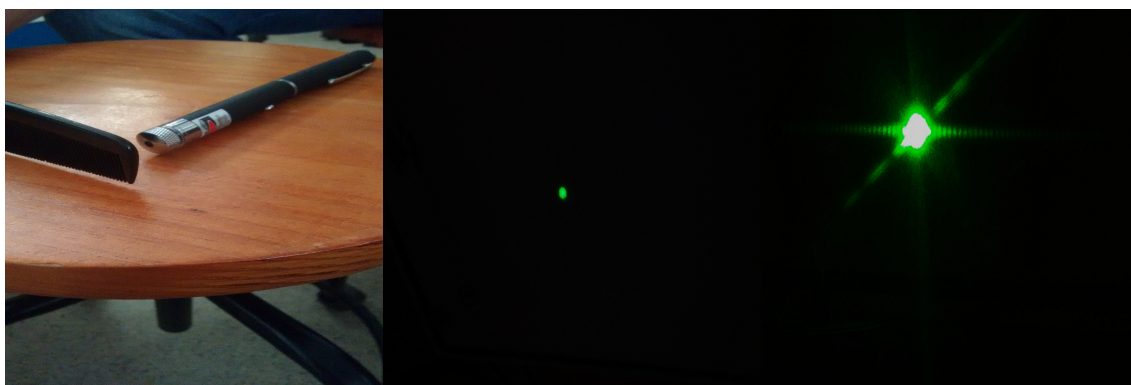
4.5.3 Fundamentação teórica

A interferência é um fenômeno ondulatório resultante da superposição de duas ondas num determinado ponto. O primeiro aparato experimental que possibilitou a verificação de um padrão de interferência luminoso, foi arquitetado por Thomas Young e

constituiu o primeiro resultado sólido que confirmou as bases da teoria ondulatória da luz. Este experimento e o próximo são adaptações desse mesmo trabalho.

4.5.4 Procedimentos

Posicione o anteparo a frente do laser de tal forma que o feixe luminoso lhe atinja. Acione o laser e verifique a formação de um ponto luminoso no anteparo. Em seguida, coloque o pente fino logo adiante do laser e observe a imagem formada. A figura 23 mostra as imagens referentes a essa prática experimental.



(a) Posicionamento do pente a frente do laser (b) Ponto luminoso formado pelo laser sobre o anteparo (c) Padrão de interferência

Figura 23 – Imagens obtidas na realização da atividade experimental 5.

Fonte: Autoria Própria.

4.5.5 Análise de Dados

1. O que houve com a imagem pontual após a inserção do pente fino a frente do laser?
2. O uso de outros acessórios cujas fendas fossem maiores produziria alguma variação nos resultados obtidos?
3. O experimento 3 utilizou um arranjo semelhante ao que foi organizado aqui. Por que motivo não foi possível verificar um padrão de interferência no primeiro caso?
4. Elabore uma hipótese plausível com os dados verificados nessa atividade.

4.6 Experimento 6: O experimento das duplas fendas de Thomas Young

4.6.1 Objetivos

- Concluir o estudo sobre as propriedades ondulatórias da luz.

- Reproduzir o experimento de Thomas Young sobre as duplas fendas.
- Elaborar um resultado geral sobre a natureza da luz, considerando todas as etapas desenvolvidas sequencialmente nesse roteiro de atividades.

4.6.2 Materiais necessários

- 1 alfinete
- 1 laser
- 1 lata de alumínio de refrigerante.
- 1 anteparo
- 1 tesoura

4.6.3 Fundamentação teórica

Essa atividade corresponde ao ponto máximo desse trabalho e representa o ápice do desenvolvimento experimental da teoria ondulatória da luz. O intuito principal é reproduzir o trabalho de Thomas Young. Para isso é necessário realizar uma abordagem qualitativa a respeito desse experimento. A figura 24 representa um esboço do experimento de Young.

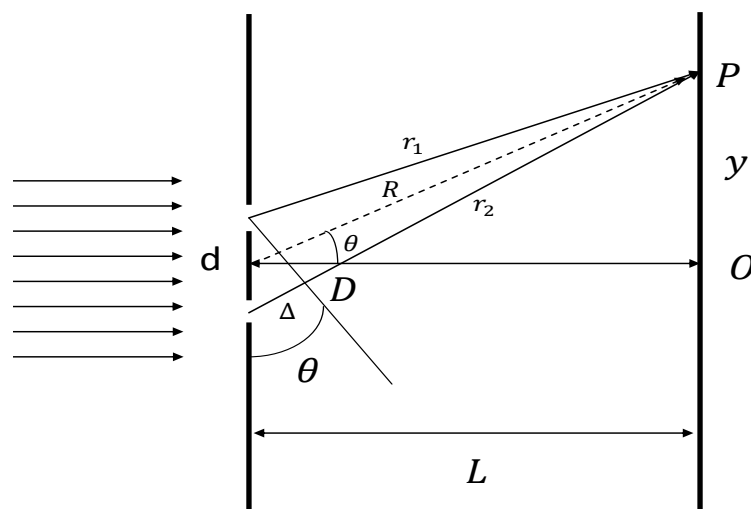


Figura 24 – Esquema ilustrativo do experimento das duplas fendas de Young.

Fonte: Adaptado de Ferraro e Soares, Os Fundamentos da Física Vol. 2

Nesse esboço d representa a distância entre as fendas, y a distância entre a franja central e o ponto P onde se verifica a formação de uma faixa clara ou escura de acordo com interferência sofrida e L a distância entre as fendas e o anteparo. Contanto que L seja bem maior que d a diferença de caminho óptico é dado pelo espaçamento indicado na figura

por Δ . Por relações trigonométricas simples, é possível fazer a seguinte aproximação (JR; FERRARO; SOARES, 1996):

$$\sin \theta = \frac{y}{L} = \frac{\Delta}{d} \quad (4.1)$$

$$\Delta = \frac{dy}{L} \quad (4.2)$$

A diferença de caminho ótico Δ define a ocorrência, no ponto P, de uma franja clara ou escura. Se $\Delta = n\frac{\lambda}{2}$ com n par, a interferência é construtiva. Por outro lado, se n for ímpar a interferência é destrutiva. O experimento de Young permite, dessa forma, determinar o comprimento de onda da luz incidente que forma o padrão de interferência.

É importante destacar a sensibilidade desse experimento em virtude de fatores externos como iluminação, ruídos e choques mecânicos na superfície onde está o aparato. Após a análise de todos os resultados obtidos espera-se que o aluno tenha desenvolvimento a aprendizagem significativa a respeito do comportamento ondulatório da luz.

4.6.4 Procedimentos

Com auxílio da tesoura, corte as duas extremidades da lata de alumínio de forma que se consiga obter uma superfície plana do material. Utilizando o alfinete realize dois furos bem próximos nessa superfície. Posicione o anteparo sobre uma mesa e a placa de alumínio de forma que fiquem alinhados numa direção horizontal. Faça incidir o feixe luz do laser entre os dois orifícios e observe a imagem formada no anteparo (BRAUN; BRAUN, 1994). A figura 25 apresenta a imagem obtida.



Figura 25 – Padrão de interferência obtido através da prática experimental 6.

Fonte: Autoria Própria

4.6.5 Análise de Dados

1. Que tipo de imagem constitui a figura obtida na realização desse experimento?
2. Se essa experiência fosse realizada utilizando-se uma lâmpada como fonte luminosa, haveria alguma variação nos resultados obtidos?
3. Quando Young realizou essa atividade a fonte luminosa utilizada por ele foi a luz solar e seu aparato continha uma superfície adicional com apenas um orifício por onde o feixe incidia antes de chegar às duas fendas. Qual a necessidade dessa montagem adicional? A figura obtida por ele deve ter mostrado alguma mudança em relação a que foi obtida nessa atividade?
4. Se duas velas, lâmpadas ou lasers forem acionados de tal forma que seus feixes se encontrem em um determinado ponto, não é possível observar um padrão de interferência. Por quê?

4.7 Exercícios de Vestibulares

(UCS-RS) Um ponto P pertence à primeira franja de interferência máxima com luz proveniente de duas fontes luminosas coerentes F_1 e F_2 . A diferença $F_1P - F_2P$, em meios comprimentos de onda, vale:

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4
- e) 5

(Ufla-MG) A experiência de Young, relativa aos fenômenos de interferência luminosa, veio mostrar que:

- a) A interferência pode ser explicada independente da estrutura íntima da luz.
- b) A interferência só pode ser explicada com base na teoria corpuscular da luz.
- c) A interferência só é explicada satisfatoriamente por meio da teoria ondulatória da luz.
- d) Tanto a teoria corpuscular quanto a ondulatória explicam satisfatoriamente esse fenômeno.
- e) Nem a teoria corpuscular nem a ondulatória explicam satisfatoriamente esse fenômeno.

(UFMG) - Um muro muito espesso separa duas pessoas em uma região plana sem outros obstáculos. As pessoas não se vêem, mas, apesar do muro, se ouvem claramente.

- a) Explique por que elas podem se ouvir.
- b) Explique por que elas não conseguem se ver.

(UFV-MG) Um aparelho de rádio recebe simultaneamente os sinais direto e refletido em uma camada atmosférica, provenientes de uma emissora. Quando a camada está numa determinada altura o sinal é forte; à medida que a camada se desloca verticalmente a partir dessa posição, o sinal enfraquece, passa por um mínimo e recupera gradativamente o valor inicial. Esse fenômeno se deve à:

- a) Difração, pois a facilidade para o sinal contornar a camada é função da altura.
- b) Variação do índice de refração da camada, que depende de sua altura em relação ao nível da Terra.
- c) Interferência entre os sinais direto e refletido, construtiva, quando o sinal for máximo, e destrutiva, quando o sinal for mínimo.
- d) Absorção do sinal pela camada, que depende de sua altura em relação à Terra.
- e) Variação do índice de reflexão da camada, o qual é uma função da altura.

(Fepar-PR) O fenômeno da formação de franjas de interferência só ocorre quando as fontes de luz utilizadas forem coerentes, isto é:

- a) apresentarem a mesma fase
- b) forem de mesma amplitude
- c) apresentarem as mesmas frequências, amplitudes e fases
- d) constituírem um feixe de raios paralelos
- e) forem de luz brancas

5 Conclusão

A proposta desse trabalho surgiu da necessidade que vem incentivando vários pesquisadores do ensino: a busca por novas metodologias que promovam uma aprendizagem mais significativa. É certo que o modelo tradicional de transmissão de conhecimento não está apresentando bons resultados e, cada vez mais, percebe-se que há um incremento do fracasso escolar. No que tange o ensino de Ciências verifica-se que o currículo extenso aliado ao desestímulo dos profissionais educadores, estão promovendo a cultura de uma abordagem conteudista que pouco incentiva a ação investigativa. As aulas estão resumidas a explanação de assuntos seguidas da realização de exercícios de assimilação que pouco incentivam a criatividade e a curiosidade, tampouco o aprendizado.

Visando propor uma alternativa de ensino mais atraente, este material, fundamentado na teoria de aprendizagem proposta por David Ausubel sobre a aprendizagem significativa, constitui um roteiro de experimentos para a abordagem dos fenômenos ondulatórios da luz. A proposta foi devidamente elaborada e o próximo passo é realizar a aplicação desse projeto na busca de resultados educacionais. A ação do professor na aplicação desse material é fundamental para que se consiga obter os objetivos delimitados. Esse papel não se resume a transmitir informações, mas sim, incentivar o senso investigativo e propor novas ideias de pesquisa com o intuito de incrementar o ensino.

Por fim, no que se refere a Física, toda a atividade foi elaborada com o intuito de se verificar uma forma de manifestação da luz. Todavia, em uma abordagem mais completa, sabe-se que essa entidade pode se comportar de outra maneira. Na verdade, a luz apresenta um comportamento dual e pode se apresentar como onda ou partícula. Essa última abordagem, porém, não se manifesta consideravelmente no universo macroscópico e passa despercebida pelos sentidos humanos. É interessante que o professor deixe bem clara essa informação. Todo modo de comportamento luminoso depende das condições ao qual ela está submetida. Nos experimentos desenvolvidos nesse trabalho apenas os aspectos ondulatórios foram ressaltados.

É fundamental que as pesquisas voltadas para o ensino de ciências continuem propondo novas metodologias e materiais com o intuito de melhorar a aprendizagem no ambiente escolar. Um ponto crucial que merece bastante destaque diz respeito ao sistema de avaliação. O modelo de provas objetivas não é suficiente e nem eficaz na determinação do desenvolvimento cognitivo. Portanto, ainda há muito o que se pesquisar para melhorar as condições atuais do sistema educacional.

Referências

- ARAGÃO, M. J. História da física. *Rio de Janeiro: Interciência*, p. 84–94, 2006.
- ARAÚJO, M. S. T. de; ABIB, M. L. V. dos S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 25, n. 2, 2003.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. *Física para universitários: óptica e física moderna*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- BEJARANO, N. R. R.; CARVALHO, A. M. P. d. Tornando-se professor de ciências: crenças e conflitos. Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Bauru: Faculdade de Ciências, UNESP, 2003.
- BEJARANO, N. R. R.; CARVALHO, A. M. P. d. A história de eli. um professor de física no início de carreira. SciELO Brasil, 2004.
- BIEZUNSKI, M.; GIL, J. A. N. *História da física moderna*. [S.l.: s.n.], 1993.
- BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCOLOLA, G. J. Tópicos de física, 2: terminologia, ondulatória e óptica. *São Paulo: Saraiva*, 2007.
- BRASIL. *Lei de Diretrizes e Bases da educação Nacional*. [S.l.]: Brasília, MEC, 1996.
- BRASIL, S. Pcn+ ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. *Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília: MEC, SEMTEC, 2002.
- BRAUN, L. F. M.; BRAUN, T. A montagem de young no estudo da interferência, difração e coerência de fontes luminosas. *Caderno catarinense de ensino de física*. Florianópolis. Vol. 11, n. 3 (dez. 1994), p. 184-195, 1994.
- CANTO, T.; COTIDIANO, Q.-N. A. do. Editora moderna. *São Paulo*, p. 23, 2007.
- CARVALHO, A. M. P. d. et al. Ensino de física. *São Paulo: Cengage Learning*, 2010.
- GRIFFITHS, D. J. *Eletrodinâmica*. Tradução: Heloísa Coimbra de Souza; revisão técnica Antônio Manoel Mansanares,-. [S.l.]: São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- JR, F. R.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. d. T. Os fundamentos da física vol. 2. *São Paulo: Moderna*, 1996.
- JUNIOR, F. R.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. de T. *Os fundamentos da física*. [S.l.]: Moderna, 2007.
- MACHADO, K. D. *Equações diferenciais aplicadas à física*. [S.l.]: Editora UEPG, 2004.
- MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. [S.l.]: Editora pedagógica e universitária São Paulo, 1999.

- NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica, vol. 4. *Editora Edgard Blucher Ltda., Sao Paulo*, 1998.
- NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica-vol. 2, fluidos; oscilações e ondas; calor. *Editora Edgard Blücher*, 2002.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. d. H. Teorias de aprendizagem. *Porto Alegre: UFRGS*, 2010.
- PEDROTTI, F. L.; PEDROTTI, L. S. Introduction to optics 2nd edition. *Introduction to Optics 2nd Edition by Frank L. Pedrotti, SJ, Leno S. Pedrotti New Jersey: Prentice Hall, 1993*, 1993.
- PERUZZO, J. Experimentos de física básica: Termodinâmica. *Ondulatória e Óptica, Editora Livraria da Física*, 2012.
- PIRES, A. S. *Evolução das Idéais da Física*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2008.
- POLKINGHORNE, J. Teoria quântica. *Porto Alegre, RS, L&PM, Coleção L&PM Pocket*, v. 985, 2011.
- SILVA, S. de Carvalho Rutz da; SCHIRLO, A. C. Teoria da aprendizagem significativa de ausubel: Reflexões para o ensino de física ante a nova realidade social. *Imagens da Educação*, v. 4, n. 1, 2014.
- TORT, A. C. et al. Uma tradução comentada de um texto de maxwell sobre a ação a distância. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, 2004.

APÊNDICE A – Coerência

Na prática não existem ondas monocromáticas ideais geradas por diferentes fontes, de forma que na 3.28 o termo $\cos \delta$ assume uma dependência com o tempo e se anula devido ao valor médio de sua função (PEDROTTI; PEDROTTI, 1993). Quando isso ocorre não é possível visualizar o padrão de interferência por conta da rapidez com que as ondas se sobrepõem. Nesse caso, as fontes luminosas são ditas incoerentes. A coerência luminosa é uma condição fundamental para a percepção do padrão de interferência constituído por ondas luminosas. Foi exatamente por isso que Young precisou posicionar um primeiro obstáculo com furo antes que o feixe luminoso incidisse sobre as fendas de onde partiram os raios que formaram as faixas brilhantes e escuras no anteparo. Também é por essa razão que não se costuma observar padrões de interferência em compartimentos que são compostos por mais de uma lâmpada por exemplo. Para explicitar o tratamento teórico desse fenômeno, considera-se uma sobreposição de ondas luminosas de mesma frequência angular, advindas de diferentes fontes com defasagens aleatórias num determinado ponto (NUSSENZVEIG, 1998). O campo resultante e a intensidade nesse ponto são dados, respectivamente, por:

$$\vec{E} = \sum_j^N \vec{E}_{0j} \cos(kx_j - \omega t + \phi_j) \quad (\text{A.1})$$

$$I = \epsilon_0 c \left\{ \sum_j^N \langle \vec{E}_{0j}^2 \rangle + 2 \sum_{j < i}^N \langle \vec{E}_{0j} \cdot \vec{E}_{0i} \rangle \right\} \quad (\text{A.2})$$

A A.2 é uma generalização da 3.18, como era de se esperar. Seguindo as mesmas etapas que foram realizadas anteriormente é possível formular um modelo geral que explicita a radiância resultante num determinado ponto devido a sobreposição de N fontes luminosas de mesma frequência angular e defasagens independentes.

$$I = \sum_j^N I_j + 2 \sum_{i < j}^N \sqrt{I_j I_i} \langle \cos \delta' \rangle \quad (\text{A.3})$$

$$\delta' = \sum_{j < i}^N [k(x_i - x_j) + \phi_i - \phi_j] \quad (\text{A.4})$$

Nesse caso o termo de interferência possui uma dependência direta com as diferenças de fase devido a todas as fontes que estão interferindo. Se N assumir um valor

alto, os valores de $\cos \delta'$ tendem a se equilibrar e se as amplitudes forem comparáveis o termo de frequência converge para o zero, fazendo com que os feixes comportem-se como partículas clássicas. Essa é uma definição mais correta para fontes incoerentes. Por essa razão, o manuseio de interferômetros requer a utilização de fontes coerentes para que seja possível visualizar as franjas alternadas. De forma geral, costuma-se utilizar uma única fonte luminosa e dividir o feixe através de técnicas de reflexão e transmissão para posteriormente fazer os sinais se reencontrarem. Com essa técnica, várias variáveis podem ser simplificadas e a única condição para que haja formação do padrão de interferência é a existência de uma diferença de caminho ótico entre os dois feixes subdivididos.