

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO DE ENSINO DE FÍSICA

DANIEL ORTEGA DA CRUZ

**UMA ABORDAGEM HISTÓRICA DA PROPAGAÇÃO,
REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ PARA O ENSINO
MÉDIO**

SANTO ANDRE – SP

2018

Daniel Ortega da Cruz

**UMA ABORDAGEM HISTÓRICA DA PROPAGAÇÃO, REFLEXÃO E
REFRAÇÃO DA LUZ PARA O ENSINO MÉDIO**

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

Orientador: Prof. Dr. Breno Arsioli Moura

Santo André - SP

2018

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cruz, Daniel Ortega

Uma Abordagem Histórica da Propagação, Reflexão e Refração
da Luz para o Ensino Médio / Daniel Ortega Cruz. — 2018.

200 fls. : il.

Orientador: Breno Arsioli Moura

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Mestrado
Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Santo André,
2018.

1. Ensino de Física. 2. História da Ciência. 3. Óptica
Geométrica. 4. Luz. 5. Três Momentos Pedagógicos. I. Moura,
Breno Arsioli. II. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de
Física - MNPEF, 2018. III. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 30 de Janeiro de 2019.

Assinatura do autor: Daniel Ortega da Costa

Assinatura do orientador: Bruno Lima



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Fundação Universidade Federal do ABC

Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017
ppg.mnpef@ufabc.edu.br

FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Daniel Ortega da Cruz, realizada em 6 de dezembro de 2018:

Prof.(a) Dr.(a) **Breno Arsioli Moura** (Universidade Federal do ABC) – Presidente

Prof.(a) Dr.(a) **Marcelo Oliveira da Costa Pires** (Universidade Federal do ABC) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Marlon Cesar de Alcantara** (Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Celio Adrega de Moura Junior** (Universidade Federal do ABC) – Membro Suplente

Prof.(a) Dr.(a) **Thaís Cyrino de Mello Forato** (Universidade Federal de São Paulo) – Membro Suplente

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha mãe, Nilda, por todos os valores que ela me ensinou. Sua honestidade, caráter e principalmente o valor dado à educação foram fundamentais na minha criação, e sem eles eu não seria capaz de ter chegado até aqui.

Agradeço imensamente à minha esposa Luana pelo amor, carinho e dedicação dados a mim nesse período. Sem a sua cumplicidade e paciência, nos momentos difíceis, eu não teria sido capaz de suportar a pressão. Obrigado por me aguentar e ser meu refúgio. Também agradeço à Elisangela e ao Papai urso que são como pais para mim, o cuidado excepcional que demonstram comigo é, com certeza, uma das maiores razões para me fazer sempre seguir em frente.

Meus sinceros agradecimentos aos meus amigos. Um muito obrigado ao meu grande amigo Batista, parceiro de viagens e amigo para todas as horas, sempre disposto a ajudar, e sempre levantando a minha moral. Muito obrigado ao meu amigo Alfredo, excelente pessoa para dar conselhos e parceiro de jogatinas, e aos seus primos, também. Muito obrigado, também, aos meus sócios da NERD: Rafa, Cris, Leandro, Filippo... ótimos amigos e parceiros de churrasco. Muito obrigado também aos meus amigos do mestrado Thiago, João e Estrela, nosso grupo superou todos os desafios e permaneceu unido do início ao fim.

Agradeço também aos meus alunos e ex-alunos por sempre me apoiarem na carreira de professor e serem fundamentais na minha constante construção pessoal e profissional.

Agradeço muito ao meu orientador Breno por ter me aceitado e orientado. Seu apoio foi fundamental durante essa árdua caminhada. Serei eternamente grato por seus ensinamentos durante esse longo período.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pois o presente trabalho só se tornou possível devido ao seu apoio.

Maior

Eu sou maior do que era antes

Estou melhor do que era ontem

Eu sou filho do mistério e do silêncio

Somente o tempo vai me revelar quem sou

As cores mudam

As mudas crescem

Quando se desnudam

Quando não se esquecem

Daquelas dores que deixamos para trás

Sem saber que aquele choro valia ouro

Estamos existindo entre mistérios e silêncios

Evoluindo a cada lua a cada sol

Se era certo ou se errei

Se sou súdito se sou rei

Somente atento à voz do tempo saberei

(Daniel Espíndola)

Resumo

Este trabalho apresenta uma abordagem histórica das concepções sobre a propagação retilínea, reflexão e refração da luz de René Descartes, Christiaan Huygens e Isaac Newton, com o propósito de discutir possibilidades para o ensino de óptica em um contexto do Ensino Médio. Em um primeiro momento, serão discutidos aspectos gerais de suas ideias, a fim de compreendermos, de maneira diacrônica, como esses autores pensavam sobre os fenômenos luminosos. Esse estudo inicial foi fundamentado em diversos trabalhos historiográficos disponíveis na literatura especializada. Posteriormente, serão apontadas algumas possibilidades de utilização dessa abordagem histórica em sala de aula, através do uso das fontes primárias e da experimentação investigativa, vinculadas à dinâmica didático-pedagógica de Demétrio Delizoicov, os três momentos pedagógicos. Nossa intenção é minimizar o tratamento essencialmente geométrico da óptica, que ainda hoje persiste no ensino de física. A partir disso, pretendemos oferecer subsídios para novas abordagens dos conteúdos de óptica, discutindo-os de maneira mais problematizadora e crítica, e incentivando uma percepção mais adequada da construção do conhecimento científico.

Palavras-chave: ensino de física, história da ciência, óptica geométrica, luz, três momentos pedagógicos

Abstract

This work presents a historical approach to the concepts of rectilinear propagation, reflection and refraction of light by René Descartes, Christiaan Huygens and Isaac Newton, with the purpose of discussing possibilities for the teaching of optics in a context of high school. In a first moment, general aspects of their ideas will be discussed, in order to understand diachronically how they thought about luminous phenomena. This initial study was based on several historiographical works available in the literature. Subsequently, some possibilities of using this historical approach in the classroom will be pointed out, through the use of primary sources and investigative experimentation linked to the three pedagogical moments. Our intention is to overcome the geometric treatment of optics, which still persists today in physics teaching. From this work, we intend to offer subsidies for new approaches to optical contents, discuss them in a more problematic and critical way, and encourage a more adequate perception of the construction of scientific knowledge.

Keywords: physics teaching, history of science, geometrical optics, light, three pedagogical moments

Sumário

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1. HISTÓRIA DA CIÊNCIA E ENSINO DE FÍSICA	4
CAPÍTULO 2. O TEMA E OS AUTORES ESCOLHIDOS: A PROPAGAÇÃO, REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ POR DESCARTES, HUYGENS E NEWTON	10
2.1. René Descartes	10
2.1.1. <i>Uma visão geral das concepções</i>	<i>10</i>
2.1.2. <i>Da propagação retilínea.....</i>	<i>13</i>
2.1.3. <i>Da reflexão da luz.....</i>	<i>16</i>
2.1.4. <i>Da refração da luz.....</i>	<i>20</i>
2.2. Christiaan Huygens	28
2.2.1. <i>Uma visão geral sobre as concepções</i>	<i>28</i>
2.2.2. <i>Da propagação retilínea.....</i>	<i>35</i>
2.2.3. <i>Da reflexão da luz.....</i>	<i>36</i>
2.2.4. <i>Da refração da luz.....</i>	<i>39</i>
2.3. Isaac Newton	44
2.3.1. <i>Uma visão geral sobre as concepções</i>	<i>44</i>
2.3.2. <i>Da propagação retilínea.....</i>	<i>46</i>
2.3.3. <i>Da reflexão e refração da luz.....</i>	<i>47</i>
CAPÍTULO 3. OS REFERENCIAIS PARA A CONSTRUÇÃO DO MINICURSO	63
3.1. Os três momentos pedagógicos (3MP).....	63
3.2. Natureza da Ciência (NdC)	67
3.3. Experimentação investigativa.....	71
3.4. Leitura contextualizada	74
CAPÍTULO 4. A PROPOSTA E SUA APLICAÇÃO	77
4.1. A proposta	77
4.2. A aplicação	80

<i>4.2.1. Aplicação do primeiro módulo – Propagação retilínea da luz</i>	<i>82</i>
<i>4.2.2. Aplicação do segundo módulo – Reflexão da luz</i>	<i>86</i>
<i>4.2.3. Aplicação do terceiro módulo – Refração da luz.....</i>	<i>89</i>
<i>4.2.4. Aplicação do quarto módulo – Natureza da Ciência</i>	<i>92</i>
CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
PRODUTO EDUCACIONAL	103

INTRODUÇÃO

Ao longo de muito tempo, pesquisadores de diversas áreas vêm falando em mudanças na educação e nos métodos de ensino, porém isso parece não ter chegado às salas de aula, em grande escala. A Física continua sendo ensinada de uma maneira abstrata, prezando-se muito pela apresentação de conceitos e aplicação de fórmulas em problemas padrão, favorecendo a memorização em detrimento do pensamento crítico.

O problema é ainda maior quando se trata da óptica, disciplina que, em geral, é marginalizada no Ensino Médio. Normalmente, os alunos aprendem apenas a parte geométrica da óptica, sem se preocupar muito com aplicações científicas e com a parte fenomenológica, às vezes sem saber que os fenômenos ópticos permeiam o seu cotidiano. Segundo Peduzzi (1997), a aprendizagem com ênfase na resolução de problemas e exercícios que privilegiam a abstração, em geral, trazem bons resultados em avaliações quantitativas. Mas tão somente, essa abordagem quantitativa seria suficiente?

Esse empecilho não é novo e nem desconhecido pelas legislações vigentes, visto que esse obstáculo já foi, há algum tempo, abordado pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), como podemos observar no trecho abaixo:

O ensino de Física tem-se realizado frequentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos (BRASIL, 2002, p. 22).

Para Rosa & Rosa (2012), o sistema educacional brasileiro encontra-se em péssima situação por conta do favorecimento dessa forma abstrata de aprendizagem, vazia de significado.

O sistema educacional brasileiro, em particular o ensino de Ciências (Física), encontra-se em vias de colapso, deixando clara a inviabilidade de continuar privilegiando a transmissão dos saberes e o acúmulo de informações que a escola privilegiou (ROSA & ROSA, 2012, p.1).

Diante desse cenário, Darroz e colaboradores (2015) esperam do ensino de Física uma abordagem em que o aluno seja capaz de ter um papel mais ativo em sua

aprendizagem, que não aja apenas como um espectador, mas que seja o ator principal dessa trama.

O que se espera do ensino de Física é que o estudante seja capaz de compreender o mundo no qual está inserido, não como um mero espectador, mas como um agente transformador. Para isso, o conhecimento científico abordado em sala de aula deve adquirir significados para o aluno, a fim de que ele possa transpor esse aprendizado para o seu cotidiano (DARROZ et al, 2015, p. 71).

Pensando em buscar alternativas para esse ensino de Física tradicional e completamente abstrato, mais especificamente da óptica geométrica, é que elaboramos essa proposta. Ela consiste em um minicurso que tem por objetivo abordar três fenômenos básicos da óptica: a propagação, a reflexão e a refração da luz. Para isso, utilizaremos elementos e estudos da História e Natureza da Ciência – principalmente as ideias de René Descartes (1596-1650), Christiaan Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727) –, a experimentação investigativa e a concepção dos “três momentos pedagógicos” (Delizoicov, 1982).

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. No capítulo 1, discutiremos em linhas gerais o porquê da inserção da História da Ciência (HC) no Ensino de Física. A partir daí serão apresentados argumentos e justificativas para utilizar a HC como caminho para um modelo de ensino mais problematizador e crítico, com o aluno sendo o protagonista de seu aprendizado. Ainda neste capítulo serão discutidos os trabalhos de alguns autores que utilizaram a HC com essa finalidade.

No capítulo 2, estudaremos as biografias e as fontes primárias dos três filósofos naturais escolhidos, bem como diversos trabalhos historiográficos disponíveis na literatura especializada que abordam suas concepções sobre a luz. A partir daí serão discutidos aspectos gerais de suas ideias, a fim de compreendermos, de maneira diacrônica, como pensaram sobre a propagação retilínea, a reflexão e a refração da luz, além de entender também as concepções gerais que eles tinham sobre luz e matéria.

No capítulo 3, discutiremos de forma mais aprofundada os referenciais para a construção do minicurso. Na primeira parte falaremos da dinâmica didático-pedagógica escolhida, os três momentos pedagógicos, a qual terá como função guiar a sequência de aulas. Na segunda parte, apresentaremos algumas discussões acerca

da Natureza da Ciência e alguns aspectos abordados, com o intuito de levar esse tema para a sala de aula, e dar subsídios para que os alunos entendam a importância dos modelos científicos estudados na construção do conhecimento científico. Na terceira parte, falaremos da experimentação investigativa, a qual terá como finalidade fazer com que o aluno seja capaz de utilizar seus conhecimentos prévios para formular hipóteses e criar discussões. Por fim, abordaremos o conceito de leitura contextualizada de fontes primárias, que se trata de um recurso para trabalhar com textos históricos originais em sala de aula.

No capítulo 4, discutiremos a aplicação piloto do produto educacional, comentando sobre o percurso metodológico desenvolvido, além de uma apresentação das características da turma em que o minicurso foi utilizado e o contexto dessa aplicação. Nas Considerações Finais, falaremos sobre as impressões obtidas no decorrer da aplicação.

Anexado à presente dissertação encontra-se o minicurso. Vale salientar ao leitor que vários assuntos discutidos nessa dissertação também foram abordados no minicurso, de modo que a leitura possa soar repetitiva. Entendemos que isso é natural, uma vez que o minicurso pode ser utilizado independentemente da leitura e análise dessa dissertação, embora esta certamente contribua para sua melhor compreensão e utilização mais profícua em sala de aula.

CAPÍTULO 1. HISTÓRIA DA CIÊNCIA E ENSINO DE FÍSICA

A incorporação da História da Ciência (HC) no Ensino de Física não é uma iniciativa nova. Existe uma grande busca pela reaproximação entre a história e o ensino da Ciência há muitos anos. Este tema também está presente em currículos internacionais, como por exemplo, o Projeto 2061, nos Estados Unidos e o PLON¹ na Holanda (MATTHEWS, 1995). Diversos autores defendem e expõem razões para a implementação da HC em sala de aula, a exemplo: (GIL PÉREZ, 1993; MATTHEWS, 1994; VANNUCCHI, 1996; PEDUZZI, 2001; MARTINS, 2006). Além disso, também encontramos recomendações nos parâmetros curriculares nacionais, o PCN.

Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional (BRASIL, 2002, p. 22).

Além disso, a incorporação da HC pode ser utilizada como um excelente recurso pedagógico para ensinar qualquer disciplina com cunho científico, pois com ela é possível tornar as aulas mais desafiadoras e reflexivas, ao passo que ela permite que o aluno compreenda melhor o significado dos conceitos trabalhados em sala de aula. A HC pode tornar a Ciência mais humana, pois nela estão inseridos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade, não estando isenta como é entendido no senso comum (MATTHEWS, 1995).

No entanto, é importante que a historiografia da Ciência seja trabalhada nos moldes atuais, sendo necessário destacar que o comportamento dos cientistas e da comunidade científica, o contexto social e cultural, entre outras coisas, são elementos indispensáveis e indissociáveis em uma reconstrução histórica, (CRUZ, 2006) pois, se trabalhada de forma caricata e anacrônica, pode acabar prejudicando a compreensão dos estudantes, provocando distorções históricas.

Segundo Peduzzi (2001), a incorporação da História da Ciência no ensino ajuda o aluno a compreender como se dá a construção do conhecimento científico,

¹ O PLON teve duração de 1972 até 1986.

contribuindo para desmistificar a ideia de método científico universal, e deixando claro que teorias científicas não são definitivas e irrevogáveis e que a Ciência é mutável. Para ele, essa incorporação melhora a relação professor/aluno e ajuda a enriquecer a cultura do aluno, tornando mais fácil a compreensão de conceitos mais abstratos, e munindo-o de subsídios para estruturar e compreender como se dá a construção do conhecimento científico.

A seguir, comentaremos o trabalho de alguns autores que fizeram o uso da História da Ciência como base, seja para orientação ou construção de um material didático, para a construção de um curso ou uma sequência de aulas, ou para o tema de uma tese ou dissertação.

Alcantara e Braga (2017) discutem a inserção de elementos histórico-culturais para o ensino de instrumentos ópticos. Em seu trabalho, eles apresentam essa discussão a partir de uma abordagem contextual da História da Ciência com a finalidade de dar subsídios para a construção de materiais didáticos. Para isso, eles utilizam uma ferramenta chamada Análise de Redes Sociais (ARS), com o intuito de entender melhor a disseminação da informação e as relações entre cientistas, filósofos e artistas de uma rede. Assim, a partir das fontes primárias e outros documentos relacionados, eles buscam mostrar como essa rede pode oferecer uma visão interdisciplinar e complexa sobre os instrumentos ópticos.

Como o estudo diz respeito a instrumentos ópticos, os autores decidiram utilizar uma Rede de Relações Sociais holandesa, e colocam Constantijn Huygens (1596 – 1687) como personagem central. Para ter acesso a essa rede, eles fizeram uso de uma plataforma chamada *ePistolarium*², onde podemos encontrar um acervo com uma série de cartas trocadas no século XVII. Na figura 1.1 vemos a rede criada como exemplo pelos autores.

² Plataforma on-line em que contém cerca de 20.000 cartas da República Holandesa do século XVII.

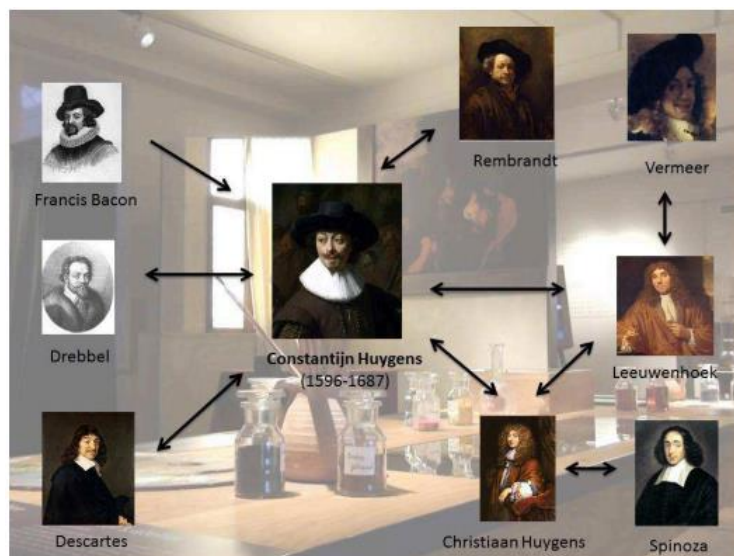


Figura 1.1: Rede de Relações sociais utilizada como exemplo pelo autor. Ela mostra as principais relações que Constantijn mantinha com os principais filósofos e artistas da época (ALCANTARA & BRAGA, 2017, p. 117).

Dessa forma, eles têm um objeto central encontrado nos escritos da rede construída em cima de Constantijn, as lentes, e sugerem uma divisão para se trabalhar de forma interdisciplinar o uso dos instrumentos ópticos: as lentes nas Ciências, as lentes na pintura e os filósofos e as lentes. Essa montagem transcende o “engessamento” dos materiais didáticos convencionais que linearizam o conhecimento.

Entendemos que a montagem de Redes Históricas possui uma dinâmica que ultrapassa a rigidez dos livros didáticos. Se analisarmos a Figura 1, por exemplo, perceberemos que, ao final deste artigo, ela está ultrapassada. Vários outros personagens apareceram ao longo do texto. Por conseguinte, podemos concluir que a montagem de Redes Históricas pode contribuir para o Ensino de Ciências. Não é necessário mergulhar em cada personagem ou instrumento. Cabe ao professor definir qual o tamanho, a profundidade, o tempo didático e a temática para a qual dirigirá sua Rede de Relações Pessoais (ALCANTARA & BRAGA, 2017, p. 126).

Melo (2010) defende a utilização da História da Ciência no ensino de Física, e, investiga em sua tese as possíveis contribuições que a HC pode ter no processo de conceitualização e aprendizagem dos alunos na Física escolar. Para isso, explora o potencial didático do modelo de Huygens para a luz, a fim de abordar as origens históricas de conceitualização do modelo atual de ondas e possibilitar essa formação conceitual nas ideias dos alunos.

Em seu trabalho, Melo (2010) critica a transposição didática convencional, pois acredita que ela descontextualiza e dessincretiza os conceitos científicos tal como eles são, mascarando completamente o contexto histórico das descobertas científicas e apresentando uma falsa ideia sobre a construção da ciência. Essa transposição tradicional apresenta a Física de uma forma linear, como uma sequência lógica de definições, prezando pela longa exposição de definições, classificações, fórmulas e algoritmos para resolução de problemas padrão. Ela acredita que esse método convencional prioriza a memorização e não a significação dos conceitos.

Como as situações didáticas são sempre as mesmas, o processo de conceitualização se torna um exercício de memorização, de natureza mecânica e repetitiva, já que, em geral, não há transferência para outras situações.

Assim, é possível que, o eventual 'sucesso' de estudantes, nessa tradição de ensino, mascare, na verdade, um engessamento (doutrinação), em um processo educativo conservador (RICARDO, 2003, p.3). De fato, se o contrato didático se baseia em uma racionalidade constante, talvez, seja uma interpretação falsa o 'sucesso' escolar apresentado por alguns estudantes (MELO, 2010, p. 4).

Com o intuito de se contrapor a esse método tradicional, Melo (2010) propõe em seu trabalho, um modelo de ensino que defende uma aprendizagem significativa, formulada na conceitualização do real, que engloba um "movimento contínuo e gradativo de significação e resignificação de conceitos" (MELO, 2010, p. 4). Esse modelo permite que por meio de uma abordagem contextual da ciência, imersa em episódios históricos, o aluno possa adquirir uma visão crítica e significativa dos conhecimentos escolares, que, por sua vez, fomentarão a aprendizagem dos conceitos físicos.

[...] os episódios históricos da ciência devem explicitar o mecanismo de conceitualização dos conceitos científicos, como um resgate à fenomenologia da física. Em outro sentido, à luz da história da ciência pode ser possível motivar o aluno a se interessar pelo ensino de física, ilustrar a ciência como uma atividade humana, desmistificar o método científico, incrementar a cultura geral do aluno, priorizando assim, um ensino em e sobre ciência (MELO, 2010, p. 5).

Barros (1998), também defende a inserção da História da Ciência no ensino de Física. O autor aponta duas maneiras possíveis de se utilizar a HC em sala de aula. A primeira delas como um instrumento que tem como função auxiliar o professor a compreender as dificuldades dos estudantes, e a segunda fazendo com que os alunos reflitam sobre a Natureza da Ciência. Segundo ele, e consoante com Melo (2010),

ignorar a dimensão histórica e desprezar a não linearidade da ciência traz uma visão deturpada de sua amplitude.

Ignorar a dimensão histórica da Ciência reforça uma visão distorcida e fragmentada da atividade científica (Castro, 1995), pois ao desprezar o papel do pensamento divergente e de opiniões conflitantes no processo de construção do conhecimento científico estamos subestimando a criatividade do trabalho científico (BARROS, 1998, p.83).

Barros (1998), inicialmente, apresenta uma descrição da evolução das ideias na óptica, da Grécia Antiga até a óptica moderna. O intuito é fazer com que os alunos percebam quais foram as principais dificuldades encontradas pelos cientistas e a forma como foram superadas, ao tentar explicar a luz e a visão. Da mesma forma, o autor busca identificar e relacionar as dificuldades que os estudantes encontram para entender e explicar esses fenômenos.

Em seguida, Barros (1998) propõe a discussão de um episódio histórico que pode ser levado para a sala de aula, acerca da luneta de Galileu Galilei (1564 – 1642). A partir desse episódio, o autor afirma que se pode discutir as descobertas proporcionadas por esse telescópio e debater alguns elementos das relações existentes entre Ciência e Tecnologia.

Barros (1998) acredita que a partir desse trabalho, é possível descobrir e interpretar a extensão das ideias e explicações sobre os conceitos físicos em diversas culturas, o que torna possível compreender melhor as ideias e explicações dos alunos. Isso faria com que o professor conseguisse entender melhor as ideias do aluno, criando uma relação dialógica entre os dois, fugindo um pouco do modelo tradicional, expositivo e de memorização.

Portanto, a elaboração de uma proposta de ensino de óptica baseada na História da Ciência poderá servir como um instrumento para promover a aprendizagem deste conteúdo em sala de aula, proporcionando ao professor subsídios para alcançar um melhor entendimento das respostas dos seus alunos frente a fenômenos associados à propagação retilínea da luz, reflexão, refração, imagens, cores, sombras etc., além de uma compreensão mais aprofundada da natureza da Ciência e das complexas relações entre desenvolvimento científico e tecnológico (BARROS, 1998, p. 83).

Os trabalhos mostrados indicam algumas possibilidades de como utilizar a História da Ciência no ensino da Física, com o intuito de torná-la mais interessante do ponto de vista dos estudantes e proporcionar o diálogo na relação professor-aluno. Assim, além de escaparmos do modelo tradicional, fazemos com que o aluno aprenda

de forma mais significativa, entendendo melhor a forma como a Ciência é construída e compreendendo a não linearidade de sua estrutura.

CAPÍTULO 2. O TEMA E OS AUTORES ESCOLHIDOS: A PROPAGAÇÃO, REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ POR DESCARTES, HUYGENS E NEWTON

Neste capítulo, estudaremos as biografias e as fontes primárias dos três filósofos naturais escolhidos, bem como diversos trabalhos historiográficos disponíveis na literatura especializada que abordam suas concepções sobre a luz. A escolha desses três filósofos ocorreu pelo fato da grande importância que tiveram para o estudo da óptica, e pela maior facilidade em encontrar fontes primárias em português. Além disso, serão discutidos aspectos gerais de suas ideias, a fim de compreendermos, de maneira diacrônica, como pensaram sobre a propagação retilínea, a reflexão e a refração da luz, além de entender também as concepções gerais que eles tinham sobre luz e matéria.

2.1. René Descartes

2.1.1. Uma visão geral das concepções

Descartes, um dos principais filósofos do Século XVII, dedicou muito de seu trabalho à óptica. René Descartes, aos 22 anos, faz sua primeira viagem para a Holanda, instalando-se em Breda, onde conheceu Isaac Beeckman (1588-1637). Depois de passar um período na Alemanha e, posteriormente, em Paris, ele retornou à República Holandesa em 1628 (VAN BUNGE, 2001). O filósofo viveu em diversas cidades desse país até 1649, muitas vezes, na companhia de Henricus Reneri (1593-1639), com quem trabalhou com lentes para câmera escura e na construção de telescópios.

Em 1637, fez a sua primeira publicação, o famoso *Discurso do método*, seguido de três tratados científicos: *A Dióptrica*, *Os Meteoros* e *A Geometria*, todos publicados conjuntamente. Neste trabalho, utilizaremos trechos da *Dióptrica*, pois é o livro em que possui os fenômenos da propagação, reflexão e refração da luz. Em 1664, sua obra *O mundo ou tratado da luz*, produzida entre os anos de 1629 e 1633, foi publicada postumamente.

Para compreender um pouco melhor a obra de Descartes, faz-se necessário entender sua concepção de matéria. Embora Descartes rejeitasse o atomismo, não acreditando na existência dos átomos e nem dos espaços vazios, sua Física guarda algumas semelhanças com essa proposta. Ele tenta explicar todos os fenômenos

observáveis por meio dos movimentos invisíveis das partículas que constituem a matéria (MARTINS; SILVA, 2015).

Em *O mundo ou tratado da luz*, ele apresenta uma discussão sobre a concepção da matéria e a divide em três elementos. O primeiro elemento é o mais sutil e mais penetrante de todos, suas partes são as mais diminutas e movem-se mais rápido que as dos outros corpos, de modo que nada seja capaz de pará-las. Descartes imagina que suas partículas não possuem nenhuma grossura e que ele pode ser dividido e moldado de qualquer forma, de modo que não haja lugar que esse primeiro elemento não possa penetrar e preencher completamente. Ele acredita que esse primeiro elemento possa ser encontrado em sua forma pura apenas no Sol e nas estrelas fixas.

O segundo elemento é constituído de partículas redondas e de tamanho médio. Segundo Descartes, não é possível que essas partículas se agrupem sem deixar espaços vazios, que podem ser facilmente preenchidos pelo primeiro elemento. Descartes considera o espaço celeste como constituído do segundo elemento. Já o terceiro elemento é formado de partículas maiores, irregulares e com mobilidade reduzida, dando origem a corpos macroscópicos e opacos. Descartes classifica os planetas, incluindo a Terra, como corpos constituídos pelo terceiro elemento.

Segundo Andrade (2008), para Descartes, esses três elementos combinam três possibilidades de se considerar a velocidade e a grandeza das partículas elementares da natureza. No primeiro elemento as partículas são muito velozes, mas muito pequenas. No segundo elemento elas possuem tamanho e velocidade intermediários. No terceiro elas são muito grandes, mas muito pouco velozes. Nessa perspectiva, a variação dessas partículas está relacionada com a grandeza e com a velocidade.

Para Descartes, na superfície da Terra não existem corpos puros, constituídos de apenas um elemento, todos os corpos que podemos ver são mesclados, isto é, compostos por uma mistura dos três elementos. A chama de uma vela, por exemplo, é um corpo mesclado, pois apesar de, em sua origem, ter partes que se movem muito rápido, se aproximando assim do primeiro elemento, com o passar do tempo ocorre uma diminuição desse movimento, e dessa forma ela vai se aproximando mais do segundo ou do terceiro elemento. Segundo Descartes, nossos sentidos permitem

notar apenas a manifestação do terceiro elemento, pois o primeiro e o segundo são muito sutis e passam despercebidos.

Mas é preciso observar que, embora haja partes desses três elementos misturadas umas às outras em todos esses corpos, todavia, falando com propriedade, são apenas as que, por causa de seu tamanho e da dificuldade que têm de se mover, podem ser atribuídas ao terceiro elemento que compõem todos os que vemos em torno de nós; com efeito, as partes dos outros dois elementos são tão sutis que não podem ser percebidas por nossos sentidos. E é possível representar todos esses corpos como esponjas, nas quais, ainda que haja uma grande quantidade de poros ou de pequenos orifícios que estão sempre cheios de ar, de água ou de qualquer outro líquido semelhante, não se julga, contudo, que tais líquidos entrem na sua composição (DESCARTES, 2009, p. 30-31).

Descartes acredita que as partes que compõem os corpos luminosos e o espaço, primeiro e segundo elemento, são imperceptíveis. Elas são hipoteticamente estabelecidas e apenas os efeitos que elas produzem podem ser testados empiricamente.

Já em sua *Dióptrica*, diferentemente de como faz no *Mundo ou tratado da luz*, Descartes não se preocupa muito com a concepção de matéria. Ele foca mais em explicar os fenômenos relacionados à luz. Assim, divide sua obra, basicamente, em três grandes campos teóricos que ele próprio, no início de sua obra, indica a ordem em que pretende investigá-los.

[...] Começarei pela explicação do movimento da luz e de seus raios luminosos; depois, tendo feito uma breve descrição das partes do olho, eu darei detalhadamente de que modo se faz a visão; e, em seguida, após ter anotado todas as coisas que são capazes de torná-la mais perfeita, mostrarei como podem ser ajudadas pelas invenções que descreverei (DESCARTES, 2010, p. 452).

O primeiro campo teórico por ele tratado descreve fenômenos tais como a propagação retilínea da luz, a reflexão e a refração da luz, apresentados nos dois primeiros discursos (I e II). O segundo campo teórico descreve a instrumentalização da matemática por meio de exames fisiológicos, que é tratada nos Discursos III, IV, V e VI da obra. O terceiro descreve a elaboração e a manipulação de instrumentos ópticos que são trabalhados nos demais discursos. Nesta dissertação, abordaremos apenas o primeiro campo, pois é a parte que está relacionada com os fenômenos que serão estudados adiante.

No discurso I de sua *Dióptrica*, Descartes faz uso de várias analogias para explicar os fenômenos luminosos. Como exemplo, Descartes utiliza a analogia do cego que tateia o mundo a sua volta com uma bengala para explicar a propagação da luz através de um meio material. Posteriormente, a analogia do barril contendo vinho com uvas amassadas é utilizada para introduzir o conceito de matéria sutil, que preenche os espaços “vazios”, e explicar a propagação retilínea. Depois, menciona a analogia do tenista com a raquete, que permite Descartes relacionar o movimento da bola de tênis ao movimento da luz, com uma explicação puramente mecânica.

Ao utilizar a analogia do cego que tateia com a bengala, Descartes afirma que, por ter uma grande afinidade com aquela situação, uma pessoa cega seria capaz de distinguir pedras de água, de areia ou qualquer outro tipo de objeto. Depois de explorar bem esse episódio, Descartes deixa subentendido no seguinte trecho, que o movimento da luz requer um meio material para se propagar, assim como o movimento transmitido pela bengala para a mão do cego.

[...]desejo que vós penseis que a luz, nos corpos que denominamos luminosos, nada mais é que um certo movimento ou uma ação muito rápida e muito viva, que passa para nossos olhos por intermédio do ar e de outros corpos transparentes, da mesma maneira que o movimento ou resistência dos corpos, que esse cego encontra, passam para sua mão por intermédio de sua bengala[...] (DESCARTES, 2010, p. 453).

No trecho seguinte, Descartes descarta a materialidade da luz, pois ele dá a entender que não acredita que seja necessário que corpúsculos partam do objeto em direção aos olhos para que se enxergue alguma coisa, assim como não é necessário que algum corpúsculo parta do objeto e alcance a mão do cego. Descartes entende que a propagação da luz ocorre como uma espécie de pressão que se propaga através dos elementos presentes na matéria até chegar aos nossos olhos.

[...] tereis ocasião de julgar que não é necessário supor que ocorra alguma coisa de material desde os objetos até nossos olhos, para fazer que vejamos as cores e a luz, nem mesmo que haja algo nesses objetos que seja semelhante às ideias ou aos sentimentos que temos deles. Da mesma forma, que não sai nada dos corpos que um cego sente, que deva passar ao longo de sua bengala até a sua mão [...] (DESCARTES, 2010, p. 453).

2.1.2. Da propagação retilínea

Descartes discute a propagação retilínea da luz nas duas obras que estudamos nesse trabalho, a *Dióptrica* e *O mundo ou tratado da luz*.

Para discutir a propagação retilínea da luz, em sua *Dióptrica*, Descartes faz uso da analogia do barril cheio de uvas amassadas e vinho. Ele compara as uvas, matéria mais espessa, ao segundo elemento que está presente no espaço entre o Sol e a Terra, e o vinho, matéria mais fluida, à ação do Sol, corpo composto do primeiro elemento, que está sendo transmitida até a Terra. Para Descartes, assim como o vinho consegue escoar, sem encontrar qualquer resistência, desde a boca do barril até os orifícios feitos em seu fundo, a luz emitida pelo Sol também consegue atravessar todo o espaço até chegar na superfície da Terra sem encontrar resistência, como podemos observar na figura 2.1.

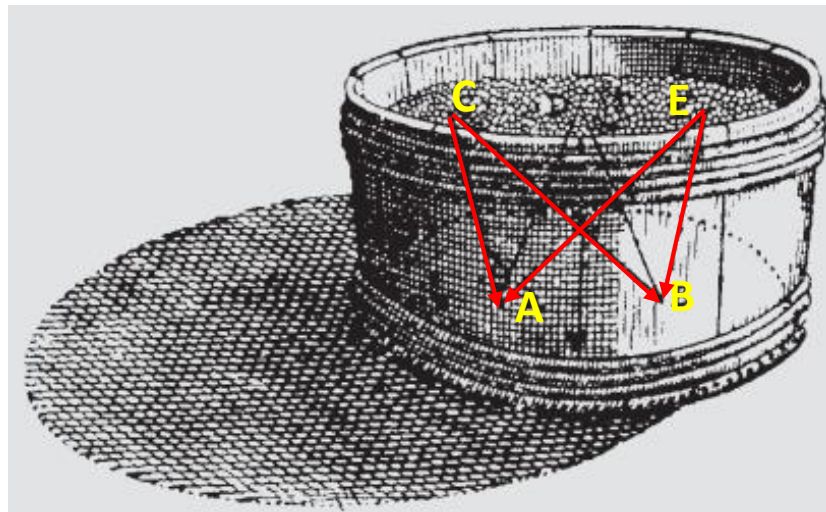


Figura 2.1: A figura representa uma analogia à propagação retilínea da luz. Setas foram inseridas na figura para representar a direção e o sentido dessa propagação (DESCARTES, 2010, p. 454, ADAPTADO).

Pois pode-se muito bem conceber que as partes do vinho, que estão, por exemplo, em direção a C, tendem para B e, ao mesmo tempo, para A, apesar de elas não poderem atualmente mover-se em direção a esses dois lados ao mesmo tempo, e tendem exatamente em linha reta em direção a B e a A, ainda que elas não se possam mover tão exatamente em linha reta, por causa dos cachos de uvas que estão entre eles. Assim, pensando que não é tanto o movimento, mas a ação dos corpos luminosos que deve ser tomada como sua luz, vós deveis julgar que os raios dessa luz não são outra coisa senão as linhas segundo as quais tende essa ação. De sorte que há uma infinidade de tais raios que vêm de todos os pontos dos corpos luminosos em direção a todos os pontos daqueles que eles iluminam, de modo que podeis imaginar uma infinidade de linhas retas, segundo as quais as ações, que vêm de todos os pontos da superfície do vinho CDE, tendem em direção a A, e uma infinidade de outras, segundo as quais as ações, que vêm desses mesmos pontos, tendem também em direção a B, sem que umas impeçam as outras. De resto, esses raios devem ser sempre imaginados assim, exatamente

retos, quando eles só passam por um único corpo transparente, que é por toda parte igual a si mesmo (DESCARTES, 2010, p. 455).

Neste trecho Descartes explica o que hoje chamamos na óptica geométrica de princípio da independência dos raios luminosos. Ele utiliza a ideia de que a partir de um ponto do corpo luminoso partem vários raios luminosos (linhas retas nas quais tende a ação dos corpos luminosos) em todas as direções. Como está representado na figura por meio de setas, o vinho, assim como os raios de luz fariam, parte do ponto C e consegue chegar em A e B, da mesma forma que o vinho que sai de E chega em A e B. Todos cruzando-se no meio do caminho, mas sem provocar interferência na trajetória um do outro. Por fim, neste mesmo trecho, Descartes confirma a retilinearidade dos raios de luz.

Na obra *O mundo ou tratado da luz*, como na *Dióptrica*, Descartes discute a propagação retilínea da luz por meio de analogias. Ele utiliza, implicitamente, a ideia já construída por ele da propagação da luz por meio da transmissão de uma “pressão”, exemplo do cego com a bengala. Descartes compara a “pressão” exercida na bengala à tendência da ação dos corpos luminosos, e a bengala propriamente dita (local onde se propaga a “pressão”) ao espaço por onde os raios de luz se propagam (segundo elemento). Assim, argumenta que essa propagação acontece de forma retilínea mesmo que os dois corpos, corpo luminoso e olho, não estejam alinhados. Para justificar esse argumento, ele faz uso de duas analogias: a mão que empurra um objeto através de um bastão torto e uma fileira de bolinhas em contato.

Primeiro, Descartes sugere que se imagine um galho torto, com partículas menores em sua composição, não necessariamente alinhadas, com o qual é possível transmitir uma ação, como um empurrão por exemplo. É possível utilizar esse galho para empurrar outros objetos. Assim, Descartes imagina o empurrão como uma ação sendo transmitida através dessas partículas menores, e mesmo sendo torto, o galho consegue transmitir o empurrão em linha reta. Dessa maneira, Descartes imagina a propagação da luz através das partículas do segundo elemento, que mesmo não estando sempre perfeitamente alinhadas, são capazes de transmitir a luz em linha reta. Além do exemplo do galho, ele também faz analogia com uma urna cheia de bolinhas. Elas são mencionadas no trecho a seguir e podem ser observadas na figura 2.2.

No que diz respeito às linhas ao longo das quais é comunicada essa ação [propagação da luz] – e que são propriamente os raios da luz –, é preciso observar que elas diferem das partes do segundo elemento por intermédio das quais essa mesma ação se comunica e que não são nada de material no meio por onde passam, mas designam apenas em que sentido e segundo qual determinação o corpo luminoso age contra aqueles que ilumina; e, assim, não se deve deixar de concebê-las como perfeitamente retas, embora as partes do segundo elemento, que servem para transmitir essa ação, ou seja, a luz, não possam estar quase nunca tão exatamente colocadas uma sobre a outra de modo a comporem linhas totalmente retas. É desse modo que podeis facilmente conceber que a mão A empurra o corpo E segundo a linha reta AE, ainda que ela o empurre somente por meio do bastão BCD, que é torto. E é desse modo também que a bola marcada com 1 impele a que está marcada com 7 por intermédio das duas marcadas com 5 e 5, tão diretamente quanto por intermédio das outras: 2, 3, 4 e 6 (DESCARTES, 2009, p. 99-100).

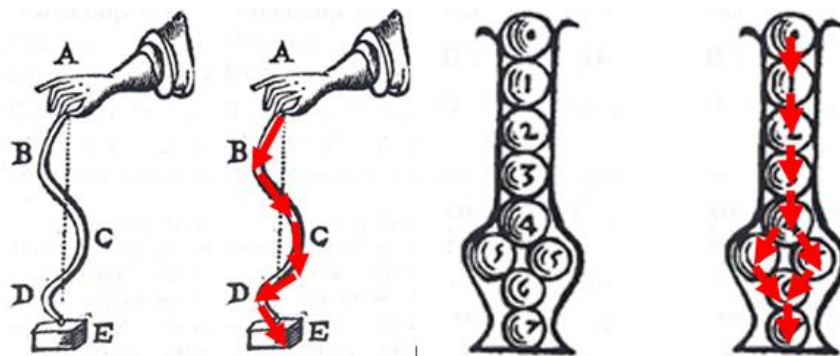


Figura 2.2: Essas figuras também são analogias para indicar a propagação retilínea da luz. As setas foram introduzidas para indicar a direção e o sentido dessa propagação (DESCARTES, 2009, p. 100, ADAPTADO).

2.1.3. Da reflexão da luz

Em sua última analogia, nos dois primeiros discursos, Descartes discute o exemplo de um jogador de tênis³ que arremessa uma bola contra algumas superfícies a fim de explicar os fenômenos da reflexão e refração da luz.

A começar pela reflexão, Descartes exhibe a figura 2.3 e argumenta:

³ Faz-se necessário esclarecer para o leitor que a palavra “tênis” não se refere ao jogo que conhecemos hoje que carrega esse nome, trata-se de seu antecessor direto conhecido como “Tênis real” ou “Jeu de paume” na França.

linha FE, e esses dois movimentos ocorrem num mesmo intervalo de tempo (figura 2.4).

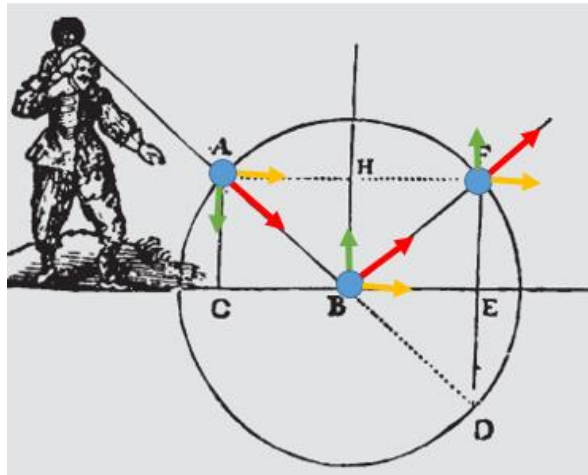


Figura 2.4: A figura representa a reflexão da bola de tênis e as setas inseridas indicam a direção e sentido das componentes do movimento⁴ (DESCARTES, 2010, p. 458, ADAPTADO).

Na figura, as setas representam apenas o sentido do movimento. A seta laranja que representa o movimento horizontal, permanece sempre apontando no mesmo sentido, enquanto a seta verde, que representa o movimento vertical, teve uma inversão no sentido devido à resistência que o solo impôs ao seu movimento.

Em seguida, é fácil de compreender que o encontro com o solo pode impedir apenas uma dessas duas determinações e de modo algum a outra. Pois ela deve impedir aquela que fazia a bola descer de AF para CE, por causa de ela ocupar todo o espaço que está abaixo de CE; mas por que ela impediria a outra que a faria avançar para a mão direita, visto que ela não lhe é de modo algum oposta nesse sentido? (DESCARTES, 2010, p. 458).

Neste trecho, Descartes argumenta que o solo é capaz de inverter o sentido do movimento vertical da bola por conta do solo que está abaixo da superfície, o que não ocorre no movimento horizontal porque não há nada que possa oferecer essa resistência.

Para descobrir, então, para qual lado exatamente essa bola deve retornar, descrevemos um círculo de centro B, que passa pelo ponto A, e dizemos que no mesmo tempo que ela tiver empregado para mover-se desde A até B, ela deve infalivelmente empregar para retornar de B até qualquer ponto da circunferência desse círculo, na medida em que todos os pontos que estão à

⁴ Vale salientar que Descartes não pensava em movimento vetorial, apesar da semelhança na imagem.

mesma distância deste B quanto de A encontram-se nessa circunferência, e supomos ser o movimento dessa bola sempre igualmente rápido. Depois, a fim de saber precisamente a qual de todos os pontos dessa circunferência ela deve retornar, traçamos três linhas retas AC, HB e FE perpendiculares a CE, de tal modo que não haja nem mais nem menos distância entre AC e HB do que entre HB e FE; dizemos que no mesmo tempo que a bola empregou para avançar em direção ao lado direito, a partir de A, um dos pontos da linha AC, até B, um daqueles da linha HB, ela deve também avançar da linha HB até algum ponto da linha FE; pois todos os pontos dessa linha FE estão igualmente distantes de HB nesse sentido, tanto um como o outro, e igualmente distantes daqueles da linha AC, e ela está também igualmente determinada a deslocar-se para esse lado quanto ela estava antes. Ora, ocorre que ela não pode chegar, ao mesmo tempo, em qualquer ponto da linha FE, e conjuntamente a qualquer ponto da circunferência do círculo AFD, a não ser ao ponto D, ou ao ponto F, tanto mais que só há esses dois, onde elas se interceptam; ainda que o solo a impeça de passar para D, deve-se concluir que ela deve ir infalivelmente para F.” (DESCARTES, 2010, p. 459).

A fim de analisar melhor o movimento da bolinha na reflexão, Descartes faz um círculo com centro em B (ponto onde a bola toca a superfície) e argumenta que o mesmo tempo que ela levar para ir de A até B, ela deve ser capaz de ir de B até qualquer outro ponto da circunferência (a distância é a mesma, trata-se do raio). Então, ele traça três retas verticais, AC, HB e FE, e diz que estão igualmente espaçadas e que o tempo que um ponto que sai da reta AC leva para chegar a HB deve ser o mesmo para ir de HB até FE. Assim, Descartes conclui que a bolinha poderia ocupar o ponto F ou o ponto D, mas como D está abaixo do solo, a bola só pode estar em F.

Vedes, assim, facilmente como se faz a reflexão, a saber, segundo um ângulo sempre igual àquele que denominamos ângulo de incidência. Como um raio, vindo do ponto A, incide no ponto B sobre a superfície do espelho plano CBE, e reflete-se para F, de tal modo que o ângulo de reflexão FBE não é nem maior nem menor que o ângulo de incidência ABC (DESCARTES, 2010, p. 458).

Por fim, Descartes conclui que os triângulos ABC e FBE são iguais, o que quer dizer que os ângulos de incidência e reflexão também são. Vale ressaltar que Descartes chamava de ângulo de incidência o ângulo formado com a horizontal, como está representado na figura 2.5.

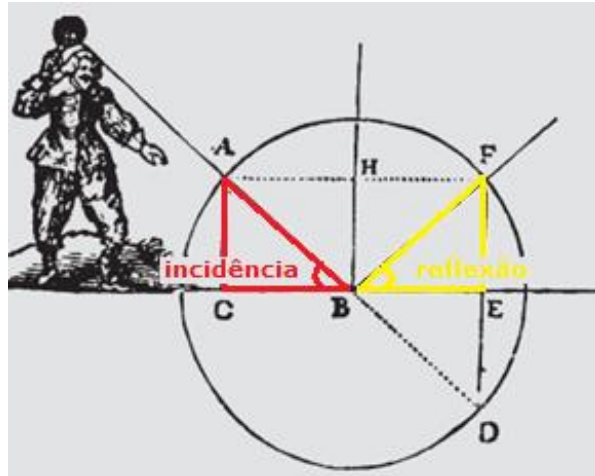


Figura 2.5: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão (DESCARTES, 2010, p. 458, ADAPTADO).

2.1.4. Da refração da luz

Para explicar a refração, em sua *Dióptrica*, Descartes novamente pensando na analogia da raquete, supõe um tenista golpeando uma bola em direção ao solo seguindo uma linha reta, como mostrado na figura 2.6. No entanto, ao invés de a bola encontrar o solo, ela encontra uma rede que faz com que sua velocidade diminua apenas na direção vertical, pois, segundo ele, existe uma ação praticada pela rede que se opõe ao movimento nessa direção, reduzindo a velocidade vertical e mantendo constante a velocidade na direção horizontal.

Consideremos também que das duas partes, das quais podemos imaginar que essa determinação é composta, só aquela que fizesse tender a bola do alto para baixo poderia ser alterada de algum modo pelo encontro com a tela; e no que concerne àquela que a faria tender para a mão direita, ela deve sempre permanecer a mesma, porque essa tela não lhe é de maneira alguma oposta nesse sentido (DESCARTES, 2010, p. 460).

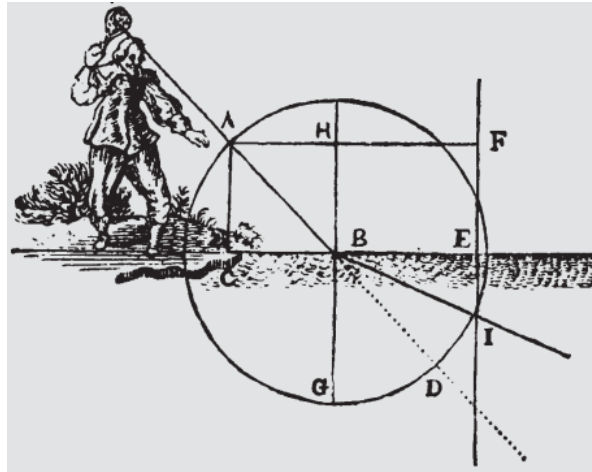


Figura 2.6: A figura representa o tenista da analogia de Descartes para a refração da luz (DESCARTES, 2010, p. 459).

Descartes utiliza o argumento de que se essa velocidade vertical cai pela metade, ela levará o dobro do tempo para percorrer uma distância igual à que percorreria se não tivesse mudado o meio de propagação, fazendo com que EI seja metade de ED. Logo após, Descartes substitui o exemplo da rede por água e mantém a mesma proporção na redução da velocidade, o que faz com que se chegue ao mesmo resultado.

Descartes chega até a esboçar em seu tratado um modelo que se assemelha muito ao que conhecemos hoje como reflexão total. Utilizando a mesma analogia do tenista com a raquete, ele percebe que quanto maior é o ângulo de incidência formado pelos pontos ABH, menor é o ângulo de refração formado pelos pontos IBE, e essa diminuição ocorre até que chega um ponto onde a bola, ao invés de entrar na água, é rebatida como se tivesse atingido uma superfície sólida (figura 2.7).

Podemos aqui considerar que ela é tanto mais desviada pela superfície da água ou da tela quanto mais obliquamente ela a encontra, de tal modo que, se ela a encontra em ângulos retos, como quando ela é impulsionada de H para B, ela deve passar além, em linha reta, para G, sem nenhum desvio. Mas, se ela é impulsionada conforme uma linha como AB, que seja bem inclinada sobre a superfície da água ou da tela CBE, que a linha FE, sendo traçada como antes, não corta o círculo AD, essa bola não deve de maneira alguma penetrá-la, mas repicar de sua superfície B para o ar L, do mesmo modo que se ela tivesse encontrado o solo [...] (DESCARTES, 2010, p. 460-461).

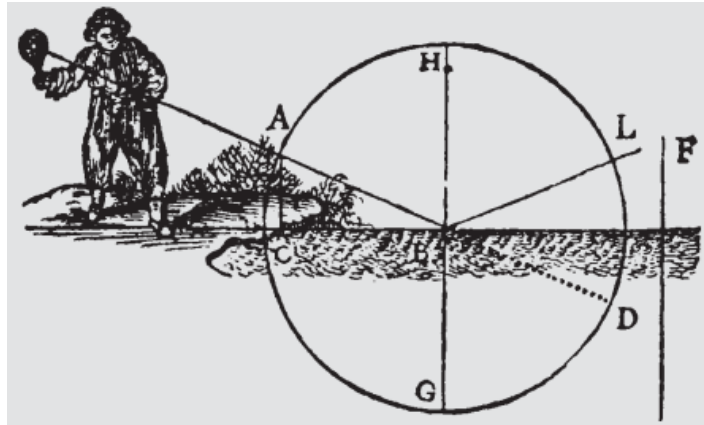


Figura 2.7: A figura representa o tenista da analogia de Descartes para a reflexão total da luz (DESCARTES, 2010, p. 461).

Posteriormente, ele apresenta a figura 2.8 e imagina que um tenista arremesse a bola, assim como antes, de A para B, mas quando ocorre a mudança de meio, a bola toma um novo impulso de uma raquete imaginária CBE que aumenta a sua velocidade vertical.

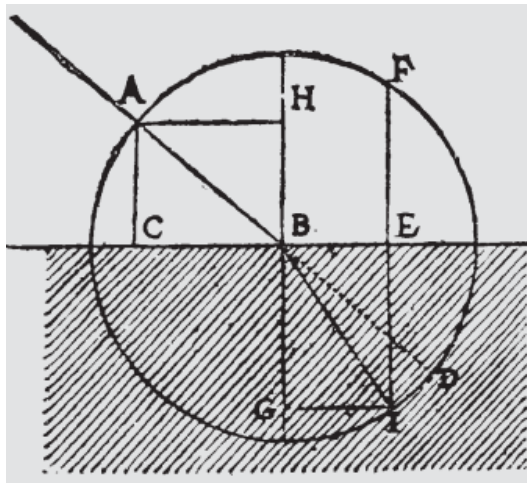


Figura 2.8: A figura representa a refração da luz (DESCARTES, 2010, p. 461).

Mas façamos ainda aqui uma outra suposição: pensemos que a bola, tendo sido primeiramente impulsionada de A para B, é ainda uma vez impulsionada, estando no ponto B, pela raquete CBE que aumenta a força de seu movimento, por exemplo, de um terço, de modo que ela possa percorrer depois o mesmo caminho em dois momentos, quando antes ela o fazia em três (DESCARTES, 2010, p. 461).

No trecho acima, Descartes exemplifica dizendo que a raquetada imaginária faz com que a velocidade na direção vertical aumente de um terço, o que quer dizer

que, no mesmo intervalo de tempo, a distância vertical percorrida será de um terço maior. Sendo assim, na figura, AC equivale a $\frac{2}{3}$ de FE.

Produzirá o mesmo efeito se ela encontrar no ponto B um corpo de natureza tal que ela passe, através de sua superfície CBE, um terço mais facilmente do que pelo ar. (DESCARTES, 2010, p. 461)

Neste pequeno trecho, Descartes deixa a entender que a raquetada imaginária está relacionada à facilidade que a bola tem para atravessar o corpo, quanto maior a facilidade, mais rápido será o movimento.

Ora, pode-se também tomar o inverso desta conclusão e dizer que, já que a bola, que vem de A em linha reta até B, é desviada ao estar no ponto B e toma seu curso de B para I, isso significa que a força ou a facilidade com a qual ela entra no corpo CBEI está para aquela com a qual ela sai do corpo ACBE, assim como a distância existente entre AC e HB está para aquela existente entre HB e FI, isto é, como a linha CB está para a BE (DESCARTES, 2010, p. 461).

Aqui Descartes mostra a proporção entre as linhas, o que podemos transformar em uma relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração e as velocidades. Descartes diz que a facilidade de propagação no meio ACBE está para a facilidade de propagação no meio CBEI (razão entre as velocidades de propagação nos dois meios) assim como, a linha CB está para BE (razão entre os senos dos ângulos de incidência e refração, pois $CB = AH$ e $BE = GI$, que representam os catetos opostos. Esses catetos estão representados na figura 2.9.

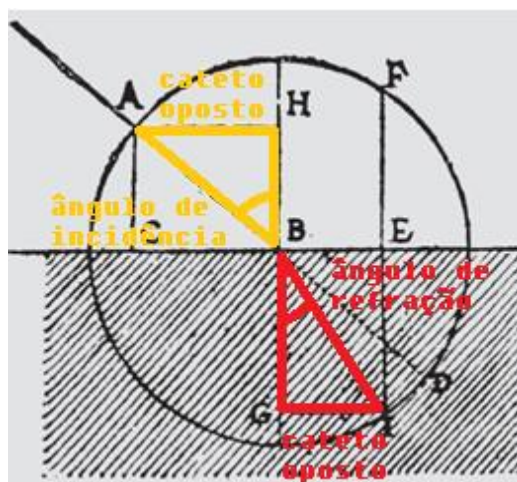


Figura 2.9: A figura representa a refração da luz e nela foram inseridos os triângulos destacados (DESCARTES, 2010, p. 461, ADAPTADO).

Enfim, visto que a ação da luz segue nisso as mesmas leis que o movimento dessa bola, é preciso dizer que quando seus raios passam obliquamente de um corpo transparente para um outro, que os recebe mais ou menos facilmente que o primeiro, eles se desviam de tal modo que se encontram sempre menos inclinados sobre a superfície desses corpos, do lado onde está aquela que os recebe mais facilmente do que o outro; e isso justamente na proporção em que ela os recebe mais facilmente do que faz o outro. É necessário, apenas, ficar atento para que essa inclinação seja medida pelas quantidades das linhas retas, como CB ou AH, e EB ou IG [...] (DESCARTES, 2010, p. 462).

Em seguida afirma que a luz segue as mesmas leis do movimento e, portanto, seu comportamento estará relacionado com a facilidade de movimento no meio. Dessa forma, os raios de luz que adentram obliquamente estarão menos inclinados nos meios que os recebem mais facilmente. Quando Descartes refere-se a essa inclinação, ele está falando dos segmentos de reta representados na figura por AH e GI, os catetos opostos. Como no corpo transparente de baixo, na figura 2.10, a luz penetra com mais facilidade do que no corpo transparente de cima, GI é menor do que AH, o que quer dizer que o raio está menos inclinado.

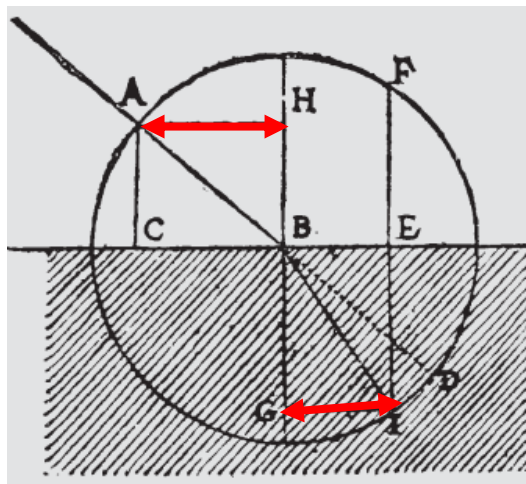


Figura 2.10: A figura representa a refração da luz e nela estão destacados os catetos opostos (DESCARTES, 2010, p. 461, ADAPTADO).

Segundo Ramos (2010), quando Descartes realizou os experimentos da *Dióptrica*, por meio das hipóteses e analogias, ele tinha como intenção demonstrar uma lei matemática já conhecida, a lei dos senos. Descartes utilizou a analogia do deslocamento da bola para compreender o movimento da luz e mostrou o modo como ele pretendia estabelecer a lei de refração. Da figura acima, em sua demonstração,

Descartes chegou no resultado $BE = 2/3BC$. Daí pode-se admitir que a razão CB/BE é o modo pelo qual a lei dos senos aparece em a *Dióptrica* de Descartes.

Em seguida, Descartes afirma que as mesmas leis do movimento da bola de tênis se aplicam à propagação da luz, e que as refrações dependem da natureza particular dos corpos onde elas ocorrem. Depois, ele justifica o desvio da luz em meios mais refrativos devido a um aumento da velocidade o qual acaba por atribuir a quantidade de matéria sutil presente nos corpos.

Mas, talvez, vós vos surpreendereis, ao realizar essas experiências, de encontrar que os raios da luz inclinam-se mais no ar do que na água, sobre as superfícies onde ocorre sua refração, e ainda mais na água do que no vidro, ao contrário de uma bola que se inclina mais na água do que no ar, e não pode de modo algum atravessar o vidro. Pois, por exemplo, se é uma bola que, ao ser impulsionada no ar de A para B, encontra no ponto B a superfície da água CBE, ela se desviará de B para V; e, se for um raio, ele irá, ao contrário, de B para I; o que deixareis de achar estranho, se vos lembrardes da natureza que eu atribuí à luz, quando disse que ela não era outra coisa que um certo movimento ou uma ação recebida em uma matéria muito sutil, que preenche os poros de outros corpos, e considerardes que, como uma bola perde mais de sua agitação ao dar contra um corpo mole do que contra um que é duro, e que ela rola menos facilmente sobre um tapete do que sobre uma mesa lisa, assim a ação dessa matéria sutil pode ser muito mais impedida pelas partes do ar que, sendo moles e mal unidas, não lhe fazem muita resistência, do que por aquelas da água que lhe fazem mais; e ainda mais, por aquelas da água do que pelas do vidro ou do cristal. De modo que, à medida que as pequenas partes de um corpo transparente são mais duras e mais compactas, mais facilmente elas deixam a luz passar, pois essa luz não deve expulsar nenhuma delas para fora de seus lugares, enquanto que uma bola deve expulsar aquelas da água para encontrar passagem entre elas (DESCARTES, 2010, p. 462-463).

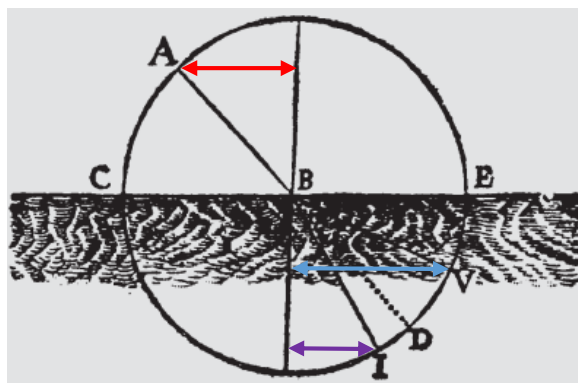


Figura 2.11: A figura mostra a trajetória da luz e da bola no ar e na água. As setas coloridas inseridas mostram a inclinação (DESCARTES, 2010, p. 463, ADAPTADO).

No trecho acima, Descartes justifica a inclinação (medida do cateto oposto aos ângulos de incidência e refração) das trajetórias, utilizando a natureza da luz e sua

concepção de matéria. Segundo ele, a luz é uma ação que segue as leis do movimento, e dessa forma consegue passar com mais facilidade pela água do que pelo ar, devido à forma como a matéria está organizada. A figura 2.12 representa essa organização.

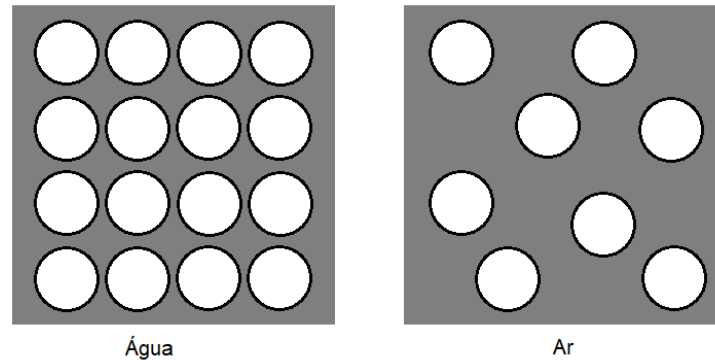


Figura 2.12: A figura mostra a organização dos elementos na água e no ar (elaborada pelo autor).

Na figura acima, as esferas brancas representam o segundo elemento, e a parte cinza que preenche os intervalos, representa o primeiro elemento. Na explicação de Descartes, quanto menos unidas estão as partes do segundo elemento, ou seja, quanto mais afastadas estão essas partes, mais flexível se torna o corpo transparente, e a luz ao passar pela matéria sutil perde movimento. Por isso a luz, que não é nada material, é mais rápida nos corpos transparentes mais unidos e menos rápida nos mais desunidos, o que faz com que ela seja mais inclinada na água do que no ar.

Já se pensarmos na bola de tênis, que é material, para passar no corpo transparente mais unido, ela teria que empurrar uma quantidade maior da matéria do segundo elemento, perdendo velocidade. Por isso a trajetória da bola é mais inclinada na água do que no ar.

Segundo Shapiro (1973), há uma contradição na teoria de Descartes. Sua lei dos senos e a relação das velocidades obtida na *Dióptrica* foram baseadas na refração de uma bola; em consequência ele obtém um resultado "padrão" para uma teoria da emissão de luz onde a velocidade da luz é maior na água do que no ar. Mas, a teoria de Descartes é do *continuum* e não uma teoria de emissão de luz. Em sua obra *O mundo ou tratado da luz* ele tenta justificar a sua posição:

9) e 10) Em relação à reflexão e à refração, já as expliquei suficientemente em outro lugar (*Dióptrica*). Entretanto, uma vez que me servi na ocasião do

exemplo do movimento de uma bola em vez de falar dos raios de luz, a fim de que meu discurso se tornasse mais inteligível, resta-me ainda aqui a vos fazer considerar que a ação de se mover ou a inclinação a se mover, que é transmitida de um lugar para outro por meio de inúmeros corpos que se tocam e que se encontram ininterruptamente em todo o espaço que há entre eles, segue exatamente a mesma via pela qual essa mesma ação poderia fazer o primeiro desses corpos, caso os outros não estivessem no seu caminho, sem que haja nenhuma outra diferença exceto a de que seria preciso certo tempo a esse corpo para se mover, enquanto a ação que está nele pode, por intermédio dos que o tocam, se estender a todo tipo de distância em um instante [...] (DESCARTES, 2009, p. 102-103).

Além disso, segundo Shapiro (1973), Descartes ainda tinha uma considerável dificuldade para superar. De acordo com o que foi exposto em sua *Dióptrica*, na refração de uma bola ela se desvia de modo a se afastar da reta normal ao penetrar num meio mais denso, por exemplo, a água, em que se move com velocidade menor do que no ar. Já o comportamento da luz, no entanto, é exatamente o oposto disso; pois ela se curva em direção à reta normal ao passar do ar para a água. Descartes “explica” isso em sua *Dióptrica*:

[...] o que deixareis de achar estranho, se vos lembrardes da natureza que eu atribuí à luz, quando disse que ela não era outra coisa que um certo movimento ou uma ação recebida em uma matéria muito sutil, que preenche os poros de outros corpos, e considerardes que, como uma bola perde mais de sua agitação ao dar contra um corpo mole do que contra um que é duro, e que ela rola menos facilmente sobre um tapete do que sobre uma mesa lisa, assim a ação dessa matéria sutil pode ser muito mais impedida pelas partes do ar que, sendo moles e mal unidas, não lhe fazem muita resistência, do que por aquelas da água que lhe fazem mais; e ainda mais, por aquelas da água do que pelas do vidro ou do cristal. De modo que, à medida que as pequenas partes de um corpo transparente são mais duras e mais compactas, mais facilmente elas deixam a luz passar, pois essa luz não deve expulsar nenhuma delas para fora de seus lugares, enquanto que uma bola deve expulsar aquelas da água para encontrar passagem entre elas (DESCARTES, 2010, p. 463).

Para Shapiro (1973), quando olhamos para as duas passagens conseguimos perceber a contradição. Na primeira, a única diferença que Descartes admite entre o movimento de uma bola e a propagação da luz é a de que a bola tem uma velocidade finita, ao passo que a luz é apenas uma inclinação para o movimento e se propaga instantaneamente. Já na segunda, ele argumenta que são dois processos físicos completamente diferentes. Descartes foi forçado a admitir, embora implicitamente, que existe uma distinção entre um movimento propriamente dito e uma tendência ao movimento.

2.2. Christiaan Huygens

2.2.1. Uma visão geral sobre as concepções

Huygens começou a trabalhar com óptica logo no início de sua carreira, no ano de 1653. Em seus estudos iniciais, a natureza da luz não era o tema principal, se preocupando mais com a óptica geométrica e estudando o funcionamento de alguns instrumentos ópticos, como telescópios e microscópios. O resultado desses estudos foi agrupado em uma obra chamada de *Dioptrica*, composta por vários escritos redigidos entre 1653 e 1692. Boa parte desse material foi publicado após sua morte, em 1703, e a totalidade desses escritos foi organizada e publicada entre os séculos XIX e XX pela *Dutch Society of Sciences*.

Huygens começou a se preocupar com a natureza da luz por volta de 1676, quando percebeu que para explicar fenômenos como a reflexão e refração, precisaria pensar na concepção da luz como pulsos propagados pelo éter (BOS, 2007, p. 1220). O desfecho dessas ideias veio com a conclusão de sua principal obra *O Tratado sobre a Luz*, finalizado em 1678, mas publicado somente em 1690.

A elaboração do *Tratado sobre a Luz* teve significativa influência das ideias de Descartes. A obra é dividida em seis capítulos e cada um explica um fenômeno: a propagação retilínea, a reflexão, a refração, a refração no ar, a dupla refração e a forma dos corpos para produzir a reflexão e refração. Esta será a obra de Huygens que utilizaremos em nosso trabalho, em especial os capítulos I, II e III, pois estes se enquadram perfeitamente com o nosso propósito, estudar a propagação, reflexão e refração da luz.

Huygens é conhecido por conseguir explicar a refração segundo um modelo vibracional.⁵ Ao ver de Shapiro (1973), Huygens nega de forma bem explícita a periodicidade das ondas de luz devido a sua analogia com o som, no entanto, desconfia que ele tenha reconhecido que sua teoria se aplicava igualmente a pulsos e ondas periódicas e acredita que a admissão dessa periodicidade seria uma restrição não justificada para sua teoria.

⁵ Apesar de Huygens afirmar que a luz é uma onda, o conceito de onda utilizado por ele não é o mesmo que utilizamos hoje, pois as ondas para ele não têm comprimento de onda e frequência definidos. Então, defendemos que a teoria de Huygens é vibracional e não ondulatória. No entanto, ao longo do texto, manteremos os termos na forma que foram traduzidos na edição em português do *Tratado*.

Ao longo de sua obra, o *Tratado Sobre a Luz*, é notável sua capacidade inventiva e habilidade ao lidar com a geometria para justificar esse modelo “vibracional”, alternativo ao modelo corpuscular, também muito explorado na época. Logo no início de sua obra, Huygens aponta grande insatisfação em aceitar como verdades alguns resultados tirados da experimentação – tais como a propagação retilínea dos raios luminosos, a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão, a regra dos senos na refração – e propõe esclarecê-los utilizando os princípios aceitos na Filosofia de sua época. Antes de começar a falar da reflexão e refração, é necessário entender quais eram suas as concepções prévias, por que ele opta por vibrações e não corpúsculos, e como ele lida com alguns conceitos – tais como a propagação da luz, a transparência e opacidade dos corpos.

Para Huygens, a luz consiste da vibração da matéria:

[...] considera-se certo que a sensação de visão é excitada pela impressão de algum movimento de uma matéria que age sobre os nervos no fundo de nossos olhos e essa é ainda uma outra razão para se crer que a luz consiste em um movimento da matéria que se encontra entre nós e os corpos luminosos (HUYGENS, 1986, p. 12).

Huygens utiliza alguns argumentos para se opor à natureza corpuscular da luz, tais como a extrema velocidade da luz, seu espalhamento por todos os lados e o fato dos raios luminosos se cruzarem sem se atrapalhar. Para ele seria absurdo um corpúsculo se movimentar com velocidade tão alta. Caso a luz fosse um objeto se deslocando do corpo até o olho do observador, como uma flecha, seria impossível essa flecha se espalhar por todos os lados, e ainda mais impossível, sendo algo material, se cruzar com outra sem se atrapalhar. Huygens utiliza esses argumentos para fortalecer sua teoria vibracional, e então, recorre à propagação do som no ar para justificar a propagação da luz.

Sabemos que, por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em toda a volta do lugar onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte do ar a outra. A propagação desse movimento se faz com igual velocidade para todos os lados e devem se formar como superfícies esféricas que crescem sempre e que chegam a atingir nossas orelhas. Ora, não há dúvida de que a luz também não venha do corpo luminoso até nós por algum movimento impresso à matéria que está entre os dois – pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passe de um até o outro. Se a luz gasta tempo para essa passagem [...] seguir-se-á que esse movimento impresso à matéria é sucessivo e que, conseqüentemente, ele se espalha, assim como o som, por ondas esféricas. Eu as chamo ondas por semelhança àquelas que vemos formarem-se na água quando aí se joga uma pedra e que representam uma propagação

sucessiva circular – embora proveniente de uma outra causa e somente em uma superfície plana (HUYGENS, 1986, p. 12).

Para Huygens, explicando a propagação da luz, as vibrações devem surgir individualmente de cada ponto do objeto luminoso, formando várias ondas, como representado na figura 2.13. Além disso, para gerar a luz, a agitação do corpo deve ser muito mais rápida e violenta do que aquela necessária para gerar o som.

[...] sobre a produção da luz, cada pequeno lugar de um corpo luminoso, como o Sol, uma vela, ou um carvão ardente, gera ondas cujo centro é esse lugar. Assim, na chama de uma vela, sendo distinguidos os pontos A, B e C, os círculos concêntricos descritos em torno de cada um desses pontos representam as ondas que deles provém. [...] Como as percussões no centro dessas ondas não possuem uma sequência regular, também não se deve imaginar que as ondas sigam umas às outras por distâncias iguais (HUYGENS, 1986, p. 21).

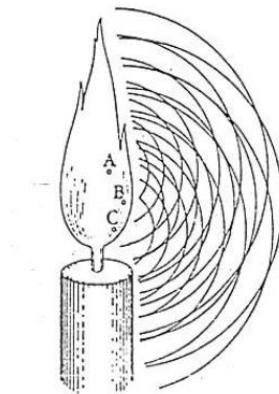


Figura 2.13: A figura representa a propagação dos pulsos luminosos (HUYGENS, 1986, p. 20).

É interessante ressaltar que para explicar a propagação da luz, Huygens recorre ao uso da matéria etérea. Segundo ele, o éter está presente na essência de tudo e é composto de pequenos corpúsculos de dureza e capacidade de restituição perfeita, pelos quais o movimento vibracional da luz pode ser transmitido, de forma análoga ao movimento de uma esfera rígida que se choca com uma fileira de esferas idênticas (figura 2.14). Essa ideia é parecida com o que hoje chamamos de pêndulo de Newton, em que a primeira esfera colide com a fileira e apenas a última se desloca.

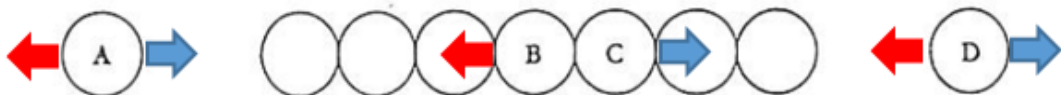


Figura 2.14: A figura representa a transmissão do movimento. Setas foram incluídas para indicar a direção e o sentido dessa propagação (HUYGENS, 1986, p. 21, ADAPTADO).

Não deve parecer inconcebível, por outro lado, que essa prodigiosa quantidade de ondas se atravessasse sem confusão e sem se apagarem umas às outras. É certo que uma mesma partícula de matéria pode servir a diversas ondas, provenientes de diferentes lados, ou mesmo de lados contrários [...] Tal pode ser provado pela fila de bolas iguais, de matéria dura, de que se falou acima. Se lançarmos contra ela, ao mesmo tempo, dos dois lados opostos, bolas semelhantes A e D, ver-se-á que cada uma retorna com a mesma velocidade que tinha inicialmente, e toda a fila permanece em seu lugar, embora o movimento tenha passado por todo seu comprimento, de forma dupla. Se esses movimentos contrários se encontram na bola B do meio, ou em alguma outra como C, ela deve se contrair e se recuperar dos dois lados e assim servir ao mesmo tempo para transmitir esses dois movimentos (HUYGENS, 1986, p. 21).

Esse excerto de Huygens explica um dos argumentos que ele utiliza para descartar a materialidade da luz. Segundo ele, se a luz fosse algo material, não seria possível que os raios se atravessassem sem ter suas trajetórias desviadas, princípio que hoje conhecemos como “independência dos raios luminosos”. A figura 2.15 ilustra bem essa situação, do lado esquerdo temos duas ponteiros laser com os feixes luminosos se atravessando sem interferência em suas trajetórias. Já, o lado direito ilustra o que aconteceria caso a luz fosse algo material, as trajetórias dos feixes luminosos sofreriam desvios.

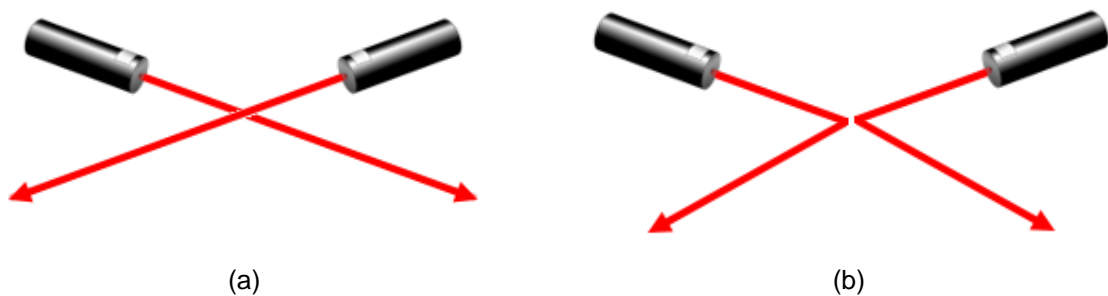


Figura 2.15: A figura (a) representa os feixes luminosos se atravessando sem sofrer desvio. A figura (b) representa o desvio nas trajetórias iniciais (<<http://www.1001freedownloads.com/free-clipart/laser-3-2>> ADAPTADO. Acesso em: 11 nov. 2018).

Huygens explica isso através de uma analogia ao movimento⁶ das esferas que se chocam com uma fileira de esferas paradas. A esfera A que inicialmente se move para a direita, transfere seu movimento para a fileira, esse movimento passa por B e C, e termina sendo transmitido para D, que termina se movendo para a direita. Ao mesmo tempo, a esfera D, que se move inicialmente para a esquerda, transfere seu movimento para a fileira que termina transferindo-o para esfera A, que passa a movimentar-se para a esquerda.

Outro aspecto importante da propagação da luz abordado por Huygens é a propagação progressiva da luz.

Deve-se também saber que, embora as partículas do éter não estejam alinhadas em retas, como em nossa fileira de bolas, mas confusamente, de modo que uma toque várias outras, isso não impede que elas transportem seu movimento e que elas o propaguem sempre para frente (HUYGENS, 1986, p. 19).

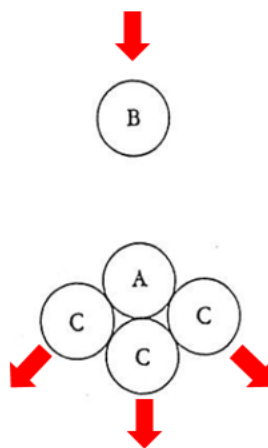


Figura 2.16: A figura mostra a transmissão do movimento entre as esferas rígidas. As setas vermelhas foram inseridas para indicar o sentido (HUYGENS, 1986, p. 19, ADAPTADO).

Na figura 2.16, as setas indicam o sentido das colisões, ele imagina que a bola B toca a bola A, transmitindo totalmente o seu movimento e permanecendo parada. Dessa forma, o movimento é transmitido de A para as bolas C, que posteriormente podem transmitir seus movimentos para outras esferas rígidas e assim sucessivamente. Outro ponto importante de sua argumentação é a explicação da propagação da luz a longas distâncias. Ele afirma:

⁶ Vale salientar que o termo utilizado não se refere ao conceito de movimento que utilizamos hoje. Para Huygens, a palavra “movimento” diz respeito a grandeza física que conhecemos como momento linear ou quantidade de movimento. No entanto, manteremos o uso da palavra traduzida do original.

[...] o que pode parecer muito estranho e até inacreditável é que ondulações produzidas por movimentos de corpúsculos tão pequenos possam se propagar, por exemplo, desde o Sol ou desde as estrelas até nós. Pois a força dessas ondas deve se enfraquecer à medida que elas se afastam de sua origem, de modo que a ação de cada uma em particular se tornará sem dúvida incapaz de se fazer sentir por nossa visão (HUYGENS, 1986, p. 21).

Huygens justifica que uma infinidade de ondas provenientes do corpo que se quer observar unifica-se formando uma onda com força suficiente para estimular os órgãos visuais.

Assim esse número infinito de ondas que nascem no mesmo instante em todos os pontos de uma estrela fixa, talvez grande como o Sol, não formam sensivelmente mais do que uma só onda, que pode ter força suficiente para produzir uma impressão em nossos olhos [...] Deve-se ainda considerar na emanação dessas ondas que a cada partícula de matéria atingida por uma onda não deve comunicar seu movimento apenas à partícula próxima que está na linha reta traçada do ponto luminoso; mas que ela também o comunica necessariamente a todas as outras que a tocam, e que se opõem a seu movimento. De modo que deve ocorrer que em torno de cada partícula se produza uma onda da qual essa partícula seja o centro (HUYGENS, 1986, p. 22).

A essa ideia, hoje, dá-se o nome de “princípio de Huygens”. A figura 2.17, retirada do *Tratado sobre a Luz*, retrata o funcionamento desse princípio.

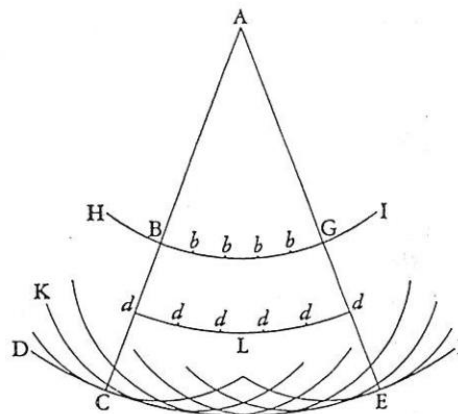


Figura 2.17: Representação da propagação da luz para Huygens (HUYGENS, 1986, p. 23).

Segundo Huygens, à medida que a luz se propaga, a cada partícula tocada, é criada uma nova onda com centro naquela partícula. Por exemplo, é criada uma onda com centro em A, essa onda é chamada DCF. Mas o que explica a onda DCF, distante de A, não ser tão fraca é que ao passo que o movimento vai sendo transmitido ao longo da matéria, a partícula B é tocada e então é criada uma nova onda, KCL, assim

como o ponto G quando tocado, cria a onda LEF e todos os pontos indicados por *b* criam também uma onda com centro neles. Assim, todas essas ondas, fracas se comparadas a DCF, juntam-se posteriormente ao chegar simultaneamente para compor DCF, o que hoje chamamos de frente de onda.

[...] cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem o ponto luminoso A por centro, propagar-se-á no arco CE, terminado pelas retas ABC, AGE (HUYGENS, 1986, p. 23-24).

No desenho apresentado por Huygens, o ponto luminoso A emite uma frente de onda, e essa frente de onda de arco de circunferência BG com centro em A se propaga perturbando novos pontos, como os pontos B e G, por exemplo. Assim, ao serem perturbados, esses novos pontos emitirão novas frentes de onda com novos arcos de circunferência, agora com os centros em B e G, por exemplo. Os pontos representados por *b* no desenho também criarão novas frentes de onda, e assim por diante.

Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas pelo espaço CAE se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor, juntas, uma onda que limite o movimento na circunferência CE, que é sua tangente comum [...] as partes das ondas particulares que se propagam fora do espaço ACE são fracas demais para produzir luz (HUYGENS, 1986, p. 23-24).

Neste ponto Huygens quer dizer que todas essas frentes de onda se juntam para formar uma de onda maior e mais intensa, unidas por uma tangente comum. Ainda afirma que de todas essas ondas que se propagam pelo espaço, as que estão fora do arco CE não podem ser vistas, pois não possuem intensidade suficiente (figura 2.18).

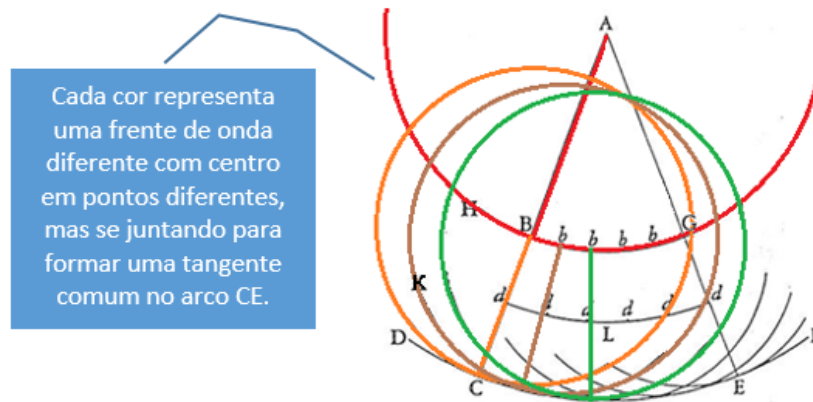


Figura 2.18: A figura representa os pontos que o arco BG perturba criando novas frentes de onda, com centro neles, compondo uma nova frente de onda com uma tangente em comum, o arco CE. Os círculos coloridos foram inseridos para facilitar a visualização (HUYGENS, 1986, p. 23, ADAPTADO).

2.2.2. Da propagação retilínea

Para justificar a propagação retilínea da luz, Huygens recorre a argumentos geométricos. De acordo com ele, a onda que se propaga na direção de BC, com centro em A, se propagará no meio criando várias ondas particulares, assim como a que se propaga em GE, também com centro em A, criará várias ondas particulares que se juntarão com as de BC para formar uma frente de onda comum compreendida entre o arco de circunferência CE, que é a tangente comum. Qualquer onda que ficar fora desse setor circular não deve ser considerada, pois será fraca demais para gerar luz.

[...] cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem o ponto luminoso A por centro, propagar-se-á no arco CE, terminado pelas retas ABC, AGE. Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas pelo espaço CAE se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor, juntas, uma onda que limite o movimento na circunferência CE, que é sua tangente comum [...] as partes das ondas particulares que se propagam fora do espaço ACE são fracas demais para produzir luz (HUYGENS, 1986, p. 23-24).

Sendo assim, Huygens despreza as frentes de onda que estão fora do arco ACE, pois elas são muito fracas para produzir luz. Dessa forma, podemos imaginar a propagação da luz da seguinte forma, segundo a figura 2.19.

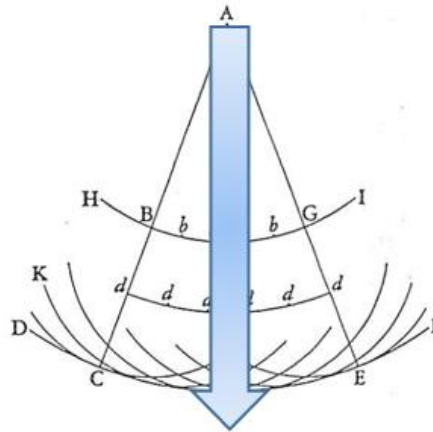


Figura 2.19: A figura representa a propagação retilínea da luz. A seta foi inserida com o propósito de indicar a direção e o sentido dessa propagação (HUYGENS, 1986, p. 23, ADAPTADO).

Krapas e colaboradores (2011, p. 137) comentam que tal consideração foi feita na tentativa de Huygens explicar a propagação retilínea da luz. Para os autores, esse talvez fosse o seu maior desafio, visto que se a luz fosse uma onda ela deveria sofrer a difração, assim como o som, mas a experiência mostrava o contrário, a luz se propagando em linha reta, o que ia completamente contra a natureza de seu modelo.

2.2.3. Da reflexão da luz

Tendo agora conhecido o que hoje chamamos de “princípio de Huygens” podemos entender, no viés de Huygens, como se dá a reflexão da luz nos corpos. Ele inicia o capítulo dedicado a reflexão em sua obra com a figura 2.20:

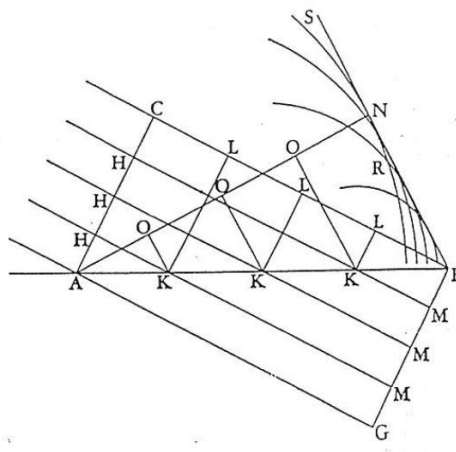


Figura 2.20: Modelo para a reflexão da luz proposto por Huygens (HUYGENS, 1986, p. 25).

Seja uma superfície plana e polida, de algum metal, vidro ou outro corpo, AB, que inicialmente considerarei como perfeitamente unida (reservar-me-ei a falar das desigualdades de que ela não pode estar isenta ao fim desta demonstração). Uma linha AC, inclinada em relação a AB; representa uma parte dae uma onda de luz, cujo centro esteja tão longe que essa parte AC possa ser considerada como uma linha reta... (HUYGENS, 1986, p. 25 - 26).

Nesta parte Huygens sugere que se imagine uma superfície plana na qual acontecerá a reflexão e uma onda AC, inclinada, com centro localizado tão longe, de forma que AC possa ser considerada uma reta.

O ponto C da onda AC, em um certo espaço de tempo, terá avançado até o plano AB no ponto B, seguindo a reta CB, que se deve imaginar proveniente do centro luminoso, e que conseqüentemente é perpendicular a AC. Ora, nesse mesmo espaço de tempo, o ponto A da mesma onda, que foi impedido de comunicar seu movimento para além do plano AB, pelo menos em parte, deve ter continuado seu movimento na matéria que está acima desse plano, e isso em um alcance igual a CB, produzindo sua onda esférica particular, segundo o que foi dito acima. Essa onda é representada aqui pela circunferência SNR, cujo centro é A e cujo semidiâmetro AN é igual a CB (HUYGENS, 1986, p. 25 - 26).

Aqui deve-se imaginar que o ponto A, assim como o ponto C, se propaga no tempo com uma certa velocidade, e quando o ponto C chegar em B, teria o ponto A chegado em G, não fosse o corpo AB servindo como obstáculo. Não podendo ir até G, no ponto A será criada uma perturbação, uma onda esférica particular com centro em A, que se propagará até N formando a onda SNR, de modo que a distância AG seja igual à CB e, por consequência, igual à AN.

Considerando-se em seguida os outros pontos H da onda AC, nota-se que eles não apenas terão chegado à superfície AB por retas HK paralelas a CB, mas além disso terão gerado ondas esféricas particulares do centro K, no diáfano (diáfano quer dizer meio que permite a passagem da luz, no caso aqui exemplificado ele se refere ao ar), representadas aqui pelas circunferências cujos semidiâmetros são iguais a KM, quer dizer, às continuações de HK até a reta BG paralela a AC. Porém todas essas circunferências possuem por tangente comum a linha reta BN, ou seja, a mesma que se traçou de B tangente ao primeiro desses círculos, cujo centro era A e cujo semidiâmetro NA é igual a BC, como é fácil ver (HUYGENS, 1986, p. 25-26).

Os pontos representados por H, ao tocarem a superfície gerarão ondas esféricas particulares com centro em K, e todas essas ondas no mesmo intervalo de tempo, irão se encontrar formando uma tangente comum com a onda SNR, que é a reta BN, como mostram as figuras 2.21 e 2.22.

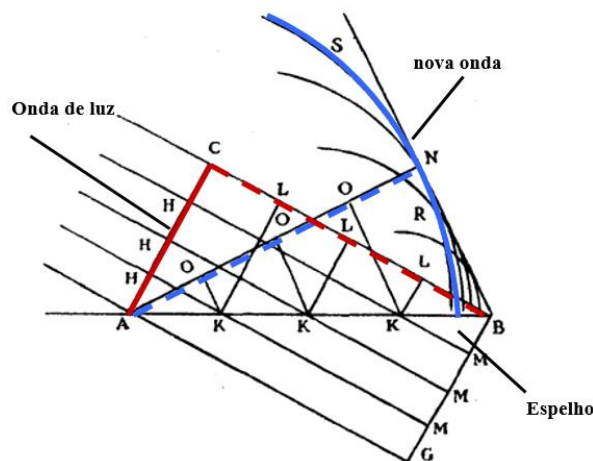


Figura 2.21: A figura representa a onda refletida. As linhas desenhadas foram inseridas para representar os pulsos incidente e refletido (HUYGENS, 1986, p. 25, ADAPTADO).

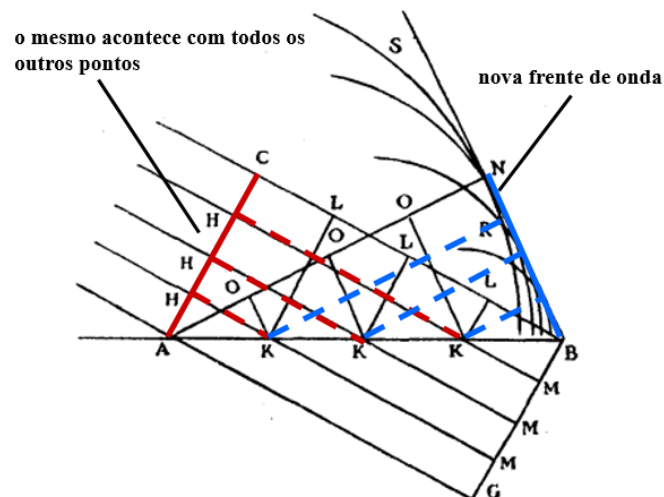


Figura 2.22: A figura representa a nova frente de onda com a tangente comum (HUYGENS, 1986, p. 25, ADAPTADO).

Ora, daqui surge que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Pois sendo os triângulos ACB e BNA retângulos, e tendo o lado AB comum e o lado CB igual a NA, segue-se que os ângulos opostos a esses lados serão iguais, e portanto também os ângulos CBA e NAB. Mas como CB, perpendicular a CA, indica a direção do raio incidente, também NA, perpendicular à onda BN, marca a direção do raio refletido; portanto esses raios estão igualmente inclinados em relação ao plano AB. (HUYGENS, 1986, p. 25 - 26).

Por fim, aqui Huygens determina a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão, mostrando que, como os triângulos ACB e BNA são retângulos e têm o lado AB em comum, CB é igual a NA, portanto, os ângulos NAB e CBA são iguais, como mostrado na figura 2.23.

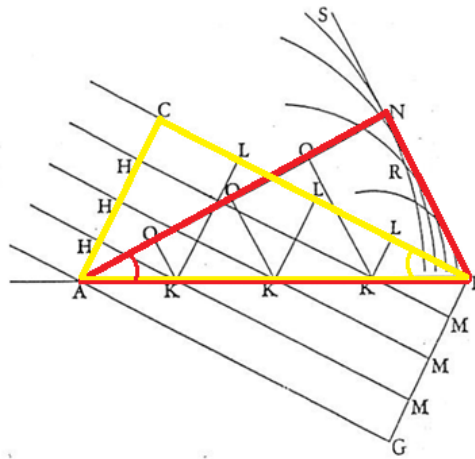


Figura 2.23: A figura representa os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão (HUYGENS, 1986, p. 25, ADAPTADO).

2.2.4. Da refração da luz

Huygens utiliza também o conceito de ondas luminosas para explicar a refração, e justifica a transparência dos corpos de três maneiras possíveis.

Primeiramente, mesmo se a matéria etérea não penetrasse de forma nenhuma os corpos transparentes, suas próprias partículas poderiam comunicar sucessivamente o movimento das ondas, da mesma forma que o éter – supondo-se que, como estas, tivessem natureza elástica. E isso é fácil de conceber quando se refere à água e outros líquidos transparentes, que são compostos de partículas destacadas. Mas pode parecer mais difícil com relação ao vidro e outros corpos transparentes e duros, pois sua solidez parece não permitir que eles recebam movimento senão em toda sua massa ao mesmo tempo (HUYGENS, 1986, p. 29).

Neste argumento Huygens supõe que o éter não penetra na matéria, suas vibrações são apenas transmitidas através das partículas do corpo. A princípio, isso seria fácil de conceber em corpos líquidos, mas difícil de aceitar quando se trata dos sólidos, porque é intuitivo pensar na matéria que compõe o líquido se agitando para formar os pulsos, pois o líquido é mais maleável, já os sólidos são pouco maleáveis, dessa forma é mais difícil imaginar essa vibração. Para resolver essa questão, ele supõe que os corpos sólidos são formados por partículas que estão apenas colocadas umas do lado das outras e mantidas juntas por uma pressão externa. No entanto, Huygens vê problemas em aceitar que o éter não penetre nas substâncias e indica isso no trecho que segue.

Pode-se portanto dessa maneira conceber a transparência sem que seja necessário que a matéria etérea, que serve para a transmissão da luz, passe [pelo material transparente] ou que encontre poros no mesmo para aí

insinuar-se. Mas a verdade é que não somente essa matéria passa, mas passa com grande facilidade. Uma prova disso é a experiência de Torricelli... (HUYGENS, 1986, p. 29).

A “experiência de Torricelli” mencionada por Huygens, consiste em preencher completamente um tubo com mercúrio e virá-lo de cabeça para baixo de modo que o mercúrio desça fazendo aparecer uma região que permite a passagem da luz, e segundo a concepção de Huygens, preenchida de matéria etérea, o que o faz concluir que o éter penetra facilmente na matéria. Isso o leva a uma segunda proposição.

A segunda maneira de explicar a transparência, e que parece mais plausível, é dizendo que as ondas de luz se propagam na matéria etérea que ocupa continuamente os interstícios ou poros dos corpos transparentes. Pois como ela passa por eles continuamente, e com facilidade, segue-se que eles se encontram sempre preenchidos por ela (HUYGENS, 1986, p. 30).

E por fim a terceira proposição:

[...] a terceira e a última maneira pela qual se pode conceber a transparência, que é supondo que o movimento das ondas de luz se transmite indiferentemente pelas partículas da matéria etérea, que ocupando os interstícios dos corpos, e pelas partículas que o compõem, de modo que esse movimento passa de umas para outras (HUYGENS, 1986, p. 31).

Nesta suposição, Huygens afirma que a onda pode se propagar tanto pelas partículas do éter quanto pelas partículas do próprio corpo. Essa proposição é a mais completa para Huygens, pois ele faz uso dela para explicar o fenômeno da refração no cristal da Islândia.⁷ Segundo Huygens, a matéria etérea está presente nos interstícios de toda a matéria, o que permitiria a passagem da luz. Para justificar a opacidade dos corpos, nessa perspectiva, ele argumenta:

De onde se dirá então que provém sua opacidade? Será porque as partículas que os compõem são moles...capazes de mudar de forma recebendo a colisão das partículas etéreas, amortecendo o seu movimento e impedindo assim a continuação das ondas de luz? Tal não pode ser... O que encontro de mais verossímil sobre isso é dizer que os corpos dos metais, que são quase os únicos verdadeiramente opacos, possuem partículas moles entremeadas com as duras, de modo que umas servem para causar reflexão, e outras para impedir a transparência. Os corpos transparentes, pelo contrário, contêm apenas partículas duras, que possuem a faculdade de elasticidade, e servem, juntamente com as da matéria etérea, como foi dito, para a propagação da luz (HUYGENS, 1986, p. 32).

⁷ As explicações de Huygens para esse fenômeno não serão abordadas nesse trabalho. O que pode ser visto em Moura (2014).

Fica claro neste trecho que Huygens apela para sua terceira suposição da estrutura da matéria, onde ele afirma que existem partículas de matéria etérea inseridas no meio da matéria do corpo, e ambas estão relacionadas ao comportamento da luz naquele meio. Para Huygens, as partículas duras são capazes de transmitir enquanto as moles são capazes de impedir a propagação da luz no meio, assim justificando a opacidade dos corpos.

Huygens inicia a discussão sobre a refração, ao contrário de Descartes, supondo que há diminuição na velocidade durante a mudança no meio de propagação. Ele mostra um raio de luz denominado AB incidindo obliquamente em uma determinada superfície FG e “quebrando-se” no ponto B, formando o raio BC, como indica a figura 2.24. Dessa forma, ressalta que os senos dos ângulos CBE e ABD sempre mantêm a mesma razão para um determinado corpo transparente, independente da inclinação da reta AB. Sendo assim, afirma que a proporção entre as velocidades na mudança ar/vidro é muito próxima de 3 para 2, ao passo que na mudança ar/água é muito próxima de 4 para 3.

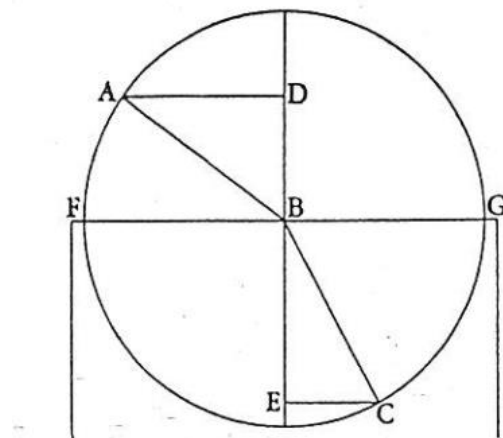


Figura 2.24: A figura representa os triângulos CBE e ABD contidos em uma circunferência (HUYGENS, 1986, p. 32)

[...] seja a reta AB, que representa uma superfície plana, que limita os corpos transparentes que se encontram para C e para N [...] que a linha AC represente uma parte da onda de luz, cujo centro seja suposto tão longe que essa parte possa ser considerada como uma linha reta. O ponto C da onda AC, em um certo espaço de tempo, terá avançado até o plano AB, seguindo a reta CB, que se deve imaginar proveniente do centro luminoso, e que consequentemente cortará AC em ângulos retos. Ora, ao mesmo tempo, o ponto A teria chegado a G pela reta AG, igual a paralela a CB, e toda a parte da onda AC estaria em GB, se a matéria do corpo transparente transmitisse o movimento da onda tão depressa quanto o éter (HUYGENS, 1986, p. 33).

Neste primeiro momento, Huygens afirma que assim como na reflexão, no caso da refração, deve-se imaginar uma onda com centro tão distante que possa ser considerada uma linha reta AC, e então conclui que AC chegaria em GB caso o meio transparente transmitisse o movimento da onda com a mesma rapidez que o ar (figura 2.24).

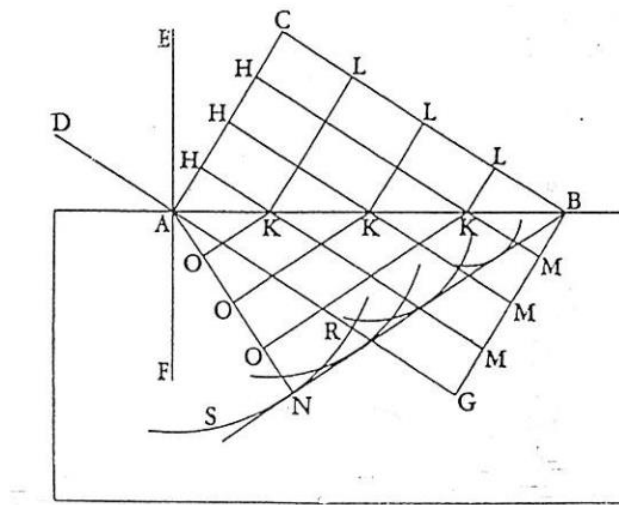


Figura 2.24: A figura representa o esquema de refração para Huygens (HUYGENS, 1986, p. 33).

Mas suponhamos que ele transmite esse movimento menos velozmente, por exemplo, de um terço. O movimento terá portanto se espalhado desde o ponto A, na matéria do corpo transparente, por uma distância igual a dois terços de CB, fazendo sua onda esférica particular, segundo o que foi dito antes. Essa onda é portanto representada pela circunferência SNR, cujo centro é A, e seu semidiâmetro é igual a $\frac{2}{3}$ de CB. Se considerarmos depois os outros pontos H da onda AC, aparecerá que ao mesmo tempo em que o ponto C chegou a B, eles não somente terão chegado à superfície AB, por retas HK paralelas a CB, mas além disso terão gerado, dos centros K, ondas particulares no [corpo] diáfano, representadas aqui por circunferências cujos semidiâmetros são iguais a $\frac{2}{3}$ das linhas KM, quer dizer, aos $\frac{2}{3}$ das continuções de HK até a reta BG; pois esses semidiâmetros teriam sido iguais aos KM inteiros, se os dois [corpos] diáfanos fossem da mesma penetrabilidade (HUYGENS, 1986, p. 34).

Aqui Huygens supõe que a onda AC perturbará o meio transparente no qual penetrará, gerando em cada ponto em que toca uma nova onda esférica particular, assim como foi visto na reflexão. No entanto, esse meio deve reduzir de $\frac{1}{3}$ a sua velocidade fazendo com que a distância AN (raio da circunferência SNR com centro

no ponto A) seja igual a $\frac{2}{3}$ da reta CB, assim como todos os pontos K gerarão ondas esféricas particulares e seus raios equivalerão a $\frac{2}{3}$ das retas KM.

Ora, todas essas circunferências possuem comum a linha reta BN, que é a mesma que do ponto B tangencia a circunferência SNR, que consideramos primeiramente. É pois fácil ver que todas as outras circunferências vão tocar a mesma reta BN, desde B até o ponto de contato N, que é o mesmo onde cai AN perpendicular sobre BN. É portanto BN, que é como se fosse formada por pequenos arcos dessas circunferências, que limita o movimento que a onda AC comunicou ao corpo transparente, e é aí que esse movimento que se encontra em muito maior quantidade do que em qualquer outra parte [...] (HUYGENS, 1986, p. 34).

Aqui Huygens diz que todas as ondas esféricas particulares formadas terão uma tangente comum que será a reta BN, e essa tangente representa a onda se propagando no corpo transparente, como representado na figura 2.25.

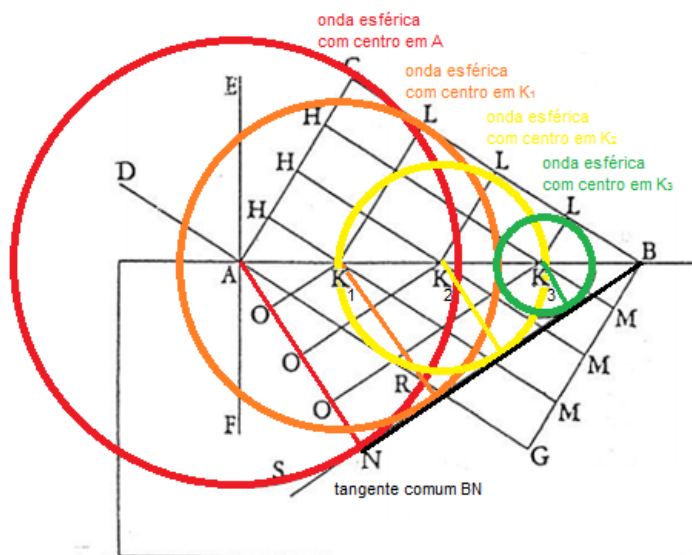


Figura 2.25: A figura representa as ondas circulares e a tangente comum do modelo de Huygens (HUYGENS, 1986, p. 33, ADAPTADO)

Daí é fácil reconhecer essa propriedade principal das refrações, ou seja, que o seno do ângulo DAE possui sempre a mesma razão para o seno do ângulo NAF, qualquer que seja a inclinação do raio DA, e essa razão é a mesma que a da velocidade das ondas no [corpo] diáfano que está para AE, para sua velocidade no diáfano que está para AF. Considerando AB como raio de um círculo, o seno do ângulo BAC é BC, e o seno do ângulo ABN é NA. Mas o ângulo ABN é igual cada um deles, adicionado a CAE, forma um ângulo reto. E o ângulo ABN é igual a NAF, uma vez que cada um deles forma com BAN um ângulo reto. Portanto o seno do ângulo DAE está também para o seno de NAF como BC para NA. Mas a razão entre BC e NA era a mesma que a das velocidades da luz na matéria que está para AE e na que está para AF. Portanto o seno do ângulo DAE está também para o seno do ângulo NAF como as referidas velocidades da luz (HUYGENS, 1986, p. 34).

Neste ponto Huygens explora um pouco da sua habilidade com a geometria para deduzir a chamada lei dos senos para a refração, mostrando que: $\frac{\text{sen } DAE}{\text{sen } NAF} = \frac{V_{AE}}{V_{AF}}$. Para chegar nessa relação, ele explora os triângulos retângulos ABC e ABN formados na figura, mostrando que os senos dos ângulos BAC e ABN são iguais aos senos dos ângulos DAE e NAF, respectivamente, e que a razão entre eles, CB/AN, é igual a razão entre as velocidades. Esses triângulos estão representados na figura 2.26.

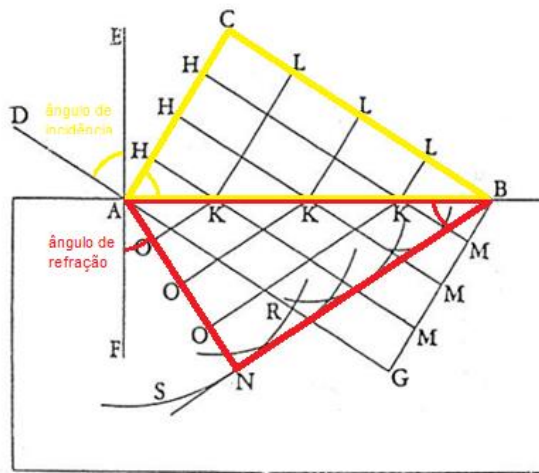


Figura 2.26: Foram inseridos na figura os triângulos utilizados na relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração (HUYGENS, 1986, p. 33, ADAPTADO).

2.3. Isaac Newton

2.3.1. Uma visão geral sobre as concepções

Newton iniciou seus estudos em óptica no ano de 1664, quando ainda estudava na Universidade de Cambridge. Suas primeiras anotações foram feitas em um caderno que ele mesmo intitulou como *Quaestiones quaedam philosophicae* [Algumas questões filosóficas], e nele abordou vários tópicos, dentre eles: “Sobre as cores”, “Sobre a visão”, “Sobre a luz” etc. Nessa época, Newton estudou por conta própria vários autores, Walter Charleton (1619 – 1707), Robert Boyle (1627 – 1691), entre outros. Dessa forma, foi pela leitura de Charleton e Boyle, que Newton foi levado a uma teoria corpuscular para a luz e uma teoria atômica para a matéria (MARTINS; SILVA, 2015).

Já no início de suas obras é possível perceber que Newton tende a negar a teoria vibracional e adotar uma teoria corpuscular para a natureza da luz. Em um dos tópicos de seu caderno de anotações, intitulado “*Sobre a luz*”, Newton registrou algumas críticas à teoria cartesiana para a propagação da luz. Como já mencionado, Descartes supunha que a luz era uma pressão ou tendência ao movimento. Newton argumentou que “a luz não pode ocorrer por pressão, pois, nesse caso, enxergaríamos tão bem ou melhor à noite do que de dia” (NEWTON, 2002, p. 28).

Em 1672, Newton publicou o artigo que tornou seus estudos sobre a luz conhecidos, a “*Nova teoria sobre luz e cores*”. Seu artigo tratava da refrangibilidade e da composição da luz branca. Em seus famosos experimentos com prismas, Newton defendeu a ideia de que a luz branca era uma mistura heterogênea de raios e que o prisma apenas as separava. Na época, esse artigo provocou muitas críticas e comentários de filósofos naturais importantes, tais como Robert Hooke (1635-1703) e Huygens, pois sua proposta contrapunha o que era aceito na época sobre a luz branca do Sol, de que ela era uma substância simples e homogênea e que as cores eram qualidades adquiridas.

Em 1704, Newton publicou sua obra final sobre a luz e as cores, a *Óptica*. A obra foi dividida em três livros que também estão divididos em partes. Esta será a obra de Newton que utilizaremos nesse trabalho, em especial os livros I e II, que abordam os fenômenos da propagação, reflexão e refração da luz. O Livro I fala sobre a natureza heterogênea dos raios de luz e das cores dos objetos, e têm caráter bastante experimental, pois é nele que Newton inclui seus experimentos com prismas e a descrição de seu telescópio refletor. É nesse livro também que Newton discute a propagação retilínea da luz, sem muita especulação, pois para ele isso já era um fato conhecido desde a Grécia Antiga, então ele apenas utiliza isso como uma definição.

O Livro II é mais conhecido por conter estudos sobre os “anéis de Newton”, fenômeno que hoje conhecemos como interferência, mas também inclui outras discussões. Esse livro é dividido em partes, nas quais Newton faz observações, descrições dos experimentos e proposições. A parte que mais interessa para nosso trabalho encontra-se nas proposições de 8 a 10, onde Newton discute a reflexão e refração da luz supondo a existência de uma força ou poder que age à distância entre luz e matéria. Por fim, no Livro III, Newton fala sobre a “inflexão” da luz, fenômeno que

hoje conhecemos como difração, e além disso, a terceira parte contém uma série de questões em que Newton discute a natureza da luz e outros temas.

Para compreender a propagação retilínea da luz, a reflexão e a refração no viés newtoniano, é necessário entender que ao longo de sua obra *Óptica* ele teve interpretações diversas para o assunto. Para alguns fenômenos, como a propagação retilínea, ele simplesmente corroborou a ideia já existente desde muito antes, de que a luz se propagava em linha reta. Já para outros fenômenos, como a refração, ele apresentou várias explicações, sem necessariamente apresentar relações umas com as outras.

Ao longo deste texto tentaremos expor essas explicações de maneira organizada, mas para isso, talvez antes, faça-se necessário compreender como Newton encarava a natureza da luz. Hoje, no meio científico, a maioria o associa ao modelo corpuscular da luz, no entanto, estudos recentes, como Moura (2016) e Shapiro (2002), apontam que Newton nunca defendeu explicitamente a materialidade da luz, sempre o fez de maneira cautelosa e implícita dentro de suas especulações.

Segundo Shapiro (2002, p. 227-228), para Newton a materialidade da luz era apenas uma “hipótese provável” evidenciada pela experimentação, mas “insuficiente” para ser tomada como verdade universal. Por isso, Newton não caracteriza a luz como matéria, muito provavelmente para evitar conflitos e disputas com pessoas que estudavam o mesmo assunto na época e tinham uma concepção diferente da sua.

2.3.2. Da propagação retilínea

Newton inicia seu livro I do *Óptica* assumindo algumas definições e axiomas. Mencionaremos, dentre as várias delas, as mais significativas para este trabalho.

Definição I

Por raios de luz entendo as partes mínimas da luz e as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas.
(NEWTON, 1996, p. 39)

Quando Newton coloca os raios contidos em linhas, ele está querendo dizer que são linhas retas, e que a luz se propaga em linha reta. Um pouco depois, Newton

discute de maneira bem sucinta a propagação retilínea e a velocidade finita da luz no trecho:

Normalmente os matemáticos consideram os raios de luz como linhas que se estendem do corpo luminoso para o corpo iluminado, e a refração desses raios como a curvatura ou a interrupção dessas linhas quando passam de um meio para outro. E com isso os raios e as refrações podem ser considerados como tais se a luz fosse propagada num instante. Mas por um argumento tirado das equações das épocas dos eclipses dos satélites de Júpiter, parece que a luz se propaga no tempo e gasta cerca de sete minutos para vir do sol até nós; em consequência disso preferi definir os raios e as refrações em termos gerais que possam concordar com a luz em ambos os casos (NEWTON, 1996, p. 39-40).

Neste ponto, quando Newton diz que os matemáticos consideram os raios como linhas, fica subentendido que são linhas retas, admitindo, dessa forma, como verdadeira a propagação retilínea da luz. Ele não se atém muito a discutir a causa desse fenômeno porque isso era algo já evidenciado desde a Grécia Antiga, sendo o registro mais antigo publicado a cerca de 300 a.C por Euclides (360 a.C. – 295 a.C.).

2.3.3. *Da reflexão e refração da luz*

Esta é uma seção que quebra um pouco o padrão no qual o material vinha sendo escrito, pois aqui a reflexão e a refração serão estudadas em conjunto, diferentemente das seções anteriores. Isso acontece porque em Newton a análise dos dois fenômenos não é feita separadamente.

É conveniente ressaltar que, ao longo de seus estudos, Newton fez uso de mais de um modelo para explicar os fenômenos da reflexão e refração. Neste trabalho, comentaremos os que aparecem no *Óptica*: o modelo da força que age a distância entre a luz e a matéria e o modelo da fácil transmissão e fácil reflexão. Como uma introdução a essa discussão, abordaremos as menções anteriores de Newton no *Óptica* a respeito da refração e da reflexão.

2.3.3.1. *Primeiras explicações*

Newton inicia suas discussões acerca da reflexão e refração da luz expondo a definição II e III que são mostradas na sequência. Na primeira definição ele discute o conceito de refringência, que para ele é a tendência que os raios têm de serem desviados de suas trajetórias. Segundo ele, quanto mais refringente é um meio, maior

será o desvio com relação à sua trajetória original. Na segunda, Newton define reflexão como um fenômeno onde os raios incidem em um determinado meio e retornam ao meio de origem.

Definição II

A refringência dos raios de luz é a tendência de serem refratados ou desviados da trajetória quando passam de um corpo ou meio transparente para outro. E uma refringência maior ou menor dos raios é a tendência de se desviarem em maior ou menor grau da sua trajetória em incidências semelhantes no mesmo meio (NEWTON, 1996, p. 39).

Definição III

A reflexibilidade dos raios é sua tendência a ser refletidos ou a voltar para o mesmo meio, vindas de qualquer outro meio sobre cuja superfície incidem. E os raios que voltam com maior ou menor facilidade são os raios mais ou menos reflexíveis (NEWTON, 1996, p. 40).

Na sequência, Newton define de maneira clara e objetiva que o ângulo que o raio incidente forma com a perpendicular é chamado de ângulo de incidência, e o que o ângulo que o raio refletido forma com a perpendicular é chamado de ângulo de reflexão. Outrossim, que o ângulo que o raio refratado forma com a perpendicular é chamado de ângulo de refração.

Definição IV

Ângulo de incidência é o ângulo em que a reta descrita pelo raio incidente forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência (NEWTON, 1996, p. 40).

Definição V

Ângulo de reflexão ou refração é o ângulo em que a reta descrita pelo raio refletido ou refratado forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência (NEWTON, 1996, p. 41).

Definição VI

Os senos de incidência, reflexão e refração são os senos dos ângulos de incidência, reflexão e refração (NEWTON, 1996, p. 41).

De novo, como já era fato conhecido dos gregos, Newton expõe de forma bem objetiva nos axiomas II e IV a igualdade dos ângulos na reflexão e a trajetória da luz na refração.

Axioma II

O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. (NEWTON, 1996, p. 42)

Axioma IV

A refração do meio mais rarefeito para o meio mais denso se dá em direção à perpendicular, isto é, de forma que o ângulo de refração seja menor do que o ângulo de incidência. (NEWTON, 1996, p. 42)

A seguir é mostrado o axioma V, a figura 2.27 que explica a reflexão e a refração e um pequeno trecho, todos retirados do *Óptica*.

Axioma V

O seno de incidência está para o seno de refração em uma certa razão precisa ou muito aproximada (NEWTON, 1996, p. 42).

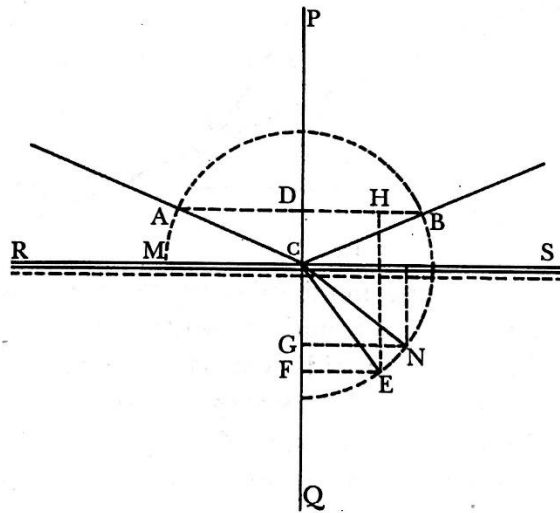


Figura 2.27: A figura representa o esquema utilizado por Newton para explicar a refração e reflexão (NEWTON, 1996, p. 42).

Suponhamos então que RS representa a superfície de água estagnada e que C é o ponto de incidência, no qual qualquer raio vindo no ar através do ponto A, da reta AC, é refletido ou refratado, e sei para onde esse raio irá depois de refletido ou refratado; do ponto de incidência situado na superfície da água levanto a perpendicular CP e prolongo-a para baixo até Q; (NEWTON, 1996, p. 42)

No trecho posterior, Newton utiliza a mesma figura para explicar a reflexão da luz.

Faço incidir sobre a perpendicular CP o seno de incidência AD; e se eu quiser o raio refletido, prolongo AD até B de forma de que DB seja igual a AD e obtenho CB. Então essa linha CB é o raio refletido; o ângulo de reflexão BCP e seu seno BD são iguais ao ângulo e ao seno de incidência como têm de ser pelo axioma II (NEWTON, 1996, p. 42).

No trecho acima, através da geometria, Newton prova a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão. A partir do raio incidente que ele chama de AC, ele traça a reta AD, cateto oposto ao ângulo ACP (ângulo de incidência), e então traça DB, formando a reta CB que representa o raio refletido. Como DB é o cateto oposto ao ângulo BCP (ângulo de reflexão), e AD e DB são iguais, os senos dos ângulos ACP e BCP são iguais, e, portanto, os ângulos ACP e BCP são iguais. Na figura 2.28 estão indicados esses catetos.

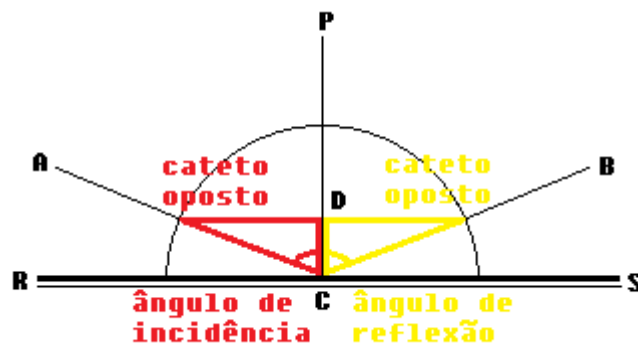


Figura 2.28: A figura é uma adaptação da original e nela estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão.

No trecho que segue, Newton agora utiliza a figura para explicar a refração da luz.

Mas se eu quiser o raio refratado, prolongo AD até H de forma que DH possa estar para AD assim como o seno da refração está para o seno de incidência, isto é (se a luz for vermelha), assim como 3 está para 4; e ao redor do centro C e no plano ACP, como o raio CA descrevendo um círculo ABE, obtenho uma paralela à perpendicular CPQ com a reta HE cortando a circunferência em E e ligo CE, esta linha CE é a reta do raio refratado. Prolongando EF perpendicularmente à reta PQ, essa linha EF é o seno de refração do raio CE, o ângulo de refração sendo ECQ, este seno EF é igual a DH, e consequentemente está para o seno de incidência AD assim como 3 está para 4 (NEWTON, 1996, p. 44).

Neste trecho, Newton indica como obtém a razão entre os senos de incidência e de refração. Ele prolonga a reta AD até H, de modo que DH corresponda a $\frac{3}{4}$ de AD, então desenha uma circunferência com centro em C e que passa pelo ponto A, e então traça uma reta perpendicular a partir do ponto H até encontrar a circunferência para formar o ponto E. A partir de E traça uma perpendicular à reta PQ e chama de EF, de modo que EF seja igual a DH. Como AD e EF representam os senos dos

ângulos ACP (ângulo de incidência) e ECQ (ângulo de refração), respectivamente, e está na razão de $\frac{3}{4}$, pode-se dizer que a razão entre os senos de incidência e refração também está na razão de 3 para 4.

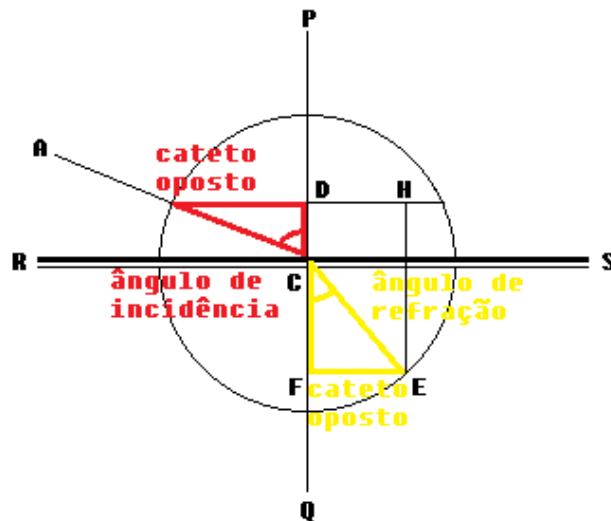


Figura 2.29: A figura é uma adaptação da original e nela estão representados os triângulos utilizados na relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração.

Nas definições e axiomas acima citados, Newton não se preocupa em demonstrar nenhum deles, ele apenas os assume como verdadeiros e toca seu trabalho baseado nesses pilares. Muito embora, não o faça de maneira explícita, sua argumentação sugere que ele adotava uma concepção corpuscular para a luz, especialmente ao definir os raios de luz como “as partes mínimas da luz”.

De acordo com Moura (2008), com a finalidade de não se comprometer com o pressuposto de que a luz era formada por pequenos corpúsculos, Newton utiliza o termo “raio de luz” para isso. No trecho a seguir vemos um exemplo:

Por raios de luz entendo as partes mínimas da luz e as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas.

Pois é evidente que a luz consiste em partes, tanto sucessivas como contemporâneas, porque no mesmo lugar podemos deter a que chega em dado momento e deixar passar a que chega imediatamente depois; e ao mesmo tempo podemos detê-la em qualquer lugar e deixá-la passar em qualquer outro (NEWTON, 1996, p. 39).

Ainda consoante com Moura (2008), o termo “raio de luz” se enquadra na hipótese de que a luz é composta por corpúsculos menores, no entanto, isso não foi

tratado abertamente nos Livros I e II. Newton só fez especulações explícitas a respeito da composição da luz nas *Questões* do Livro III.

Os raios de luz não são corpos minúsculos exibidos pelas substâncias que brilham? Pois tais corpos atravessarão meios uniformes em linhas retas sem se curvar em direção à sombra, o que é da natureza dos raios de luz. Também serão capazes de possuir várias propriedades, e de conservar imutáveis suas propriedades ao atravessar vários meios, o que é outra condição dos raios de luz. (NEWTON, 1996, p. 271)

Segundo Moura (2016), essa afirmação negativa em forma de questão tem uma resposta implícita: sim, os raios de luz são esses corpos minúsculos. Já (COHEN, 1956, p. 164) entende que essas questões não eram questionamentos verdadeiros, elas tinham o intuito de servir como um álibi para que Newton pudesse discutir sobre esses assuntos sem se comprometer.

Com isso, entendemos que no axioma V, Newton utilizou, implicitamente, um modelo corpuscular para a luz com a finalidade de explicar a reflexão e refração, imaginando a interação do corpúsculo contra a superfície refletora/refratora através de choques. No entanto, é somente isso que podemos afirmar, não há evidências de que o modelo utilizado por Newton tenha sido corpuscular e, tampouco, que ele tenha imaginado esses corpúsculos colidindo contra a matéria.

2.3.3.2. *Força à distância entre a luz e a matéria*

Após as definições e axiomas apresentados no Livro I, onde Newton não se preocupa muito em explicar a natureza da luz ou as causas da reflexão e refração, ele resolve, em seu Livro II, explorar um pouco mais essas causas. Com efeito, inicia essa discussão afirmando, em forma de proposição, que a causa da reflexão da luz não é choque das partes da luz contra a matéria, como é mostrado a seguir.

Proposição 8

A causa da reflexão não é o choque da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos, como geralmente se acredita (NEWTON, 1996, p. 199).

Esse é o ponto de partida para a nova ideia que será discutida adiante, a reflexão e a refração da luz explicadas por meio de uma força que age à distância, o primeiro modelo pensado por Newton para explicar esses fenômenos. Ao longo desta

seção estudaremos alguns trechos do Livro II do *Óptica*. Também estudaremos algumas proposições que confirmam esse modelo e os trechos que remetem a essas proposições, explicando o que o levou a acreditar em tal modelo.

Vale salientar que essa nova teoria a respeito da interação da luz com a matéria por meio de uma força, em nada altera a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão que foi demonstrada na primeira parte, e, tampouco, modifica a razão entre os senos, também demonstrada na primeira parte. Isso ocorre porque essa nova explicação não é dependente da natureza da luz. É conveniente dizer também que Newton estuda a reflexão e a refração de forma parecida, pensando na ação de uma força perpendicular à superfície, no Livro I de seu *Principia*, no entanto, ele faz o estudo para colisões entre corpos sólidos, não para a luz, apesar de afirmar que existem semelhanças entre esses fenômenos.⁸

Newton entende que a origem da reflexão e da refração está associada a uma força que age a longa distância entre a luz e a matéria. No pequeno excerto representado a seguir, com o intuito de reforçar a proposição 8, ele argumenta que se a reflexão ocorresse por meio do choque entre a luz e a matéria, ela deveria ser mais forte quando ocorresse do ar para o vidro do que do vidro para o ar. O que o leva a pensar dessa forma é a rigidez dos dois materiais, pensando na mecânica, quanto mais rígido um corpo, melhor a restituição durante a colisão, e portanto melhor a reflexão. Fazendo um paralelo, podemos pensar numa bolinha de borracha sendo atirada contra um piso duro e depois contra um tapete, em qual dessas situações o resultado da reflexão seria melhor? A resposta é o piso duro, pois a restituição do piso duro é melhor do que a do tapete.

Isto se evidenciará pelas considerações seguintes. Primeiro, porque na passagem da luz do vidro para o ar há uma reflexão tão forte quanto na sua passagem do ar para o vidro, ou até um pouco mais forte, e muito mais do que na sua passagem do vidro para a água [...] (NEWTON, 1996, p. 199).

Então, pensando dessa forma, na passagem do raio de luz do ar para o vidro, por ser mais duro, o vidro deveria oferecer uma reflexão mais forte. Mas como o próprio Newton relata, isso não ocorre, a reflexão ocorre igual ou mais fraca. Então, como argumento final, Newton utiliza o trecho citado adiante que diz que um corpo

⁸ Para mais detalhes o leitor pode consultar o Livro I do *Principia* (NEWTON, 2016, p. 289 - 297).

polido nada mais é do que um corpo com ranhuras imperceptíveis a olho nu, então mesmo polido, o corpo possui irregularidades, e sendo assim, se a reflexão ocorresse devido a colisão entre luz e matéria, esses raios de luz deveriam ser tão espalhados no vidro mais polido quanto no menos polido. É aí que Newton atribui a causa da reflexão a uma força, presente no corpo, que age a distância, e que age de maneira uniforme pelo corpo inteiro, não apenas em um único ponto.

Finalmente, se os raios de luz refletidos se chocassem com as partes sólidas dos corpos suas reflexões nos corpos polidos não poderiam ser tão regulares como são. Pois polindo-se vidro com areia, potéia ou trípole não é imaginável que essas substâncias possam, ao raspar e friccionar o vidro, efetuar em todas as suas partículas menores um polimento acurado, de modo que todas as suas superfícies sejam verdadeiramente planas ou verdadeiramente esféricas e pareçam todas da mesma forma, de maneira a comporem, juntas, uma substância uniforme. Quanto menores forem as partículas dessa substância, menores serão as ranhuras pelas quais elas desgastam e riscam o vidro continuamente até ele ficar polido; porém, como elas nunca são tão pequenas, não podem desgastar o vidro de outra forma senão raspando-o, riscando-o e quebrando as protuberâncias; portanto não o podem polir de outra forma senão trazendo a sua aspereza a um grau muito pequeno, de forma que as ranhuras e desgastes da superfície se tornem muito pequenos para serem visíveis. Assim, se a luz fosse refletida ao chocar-se com as partes sólidas do vidro, ela seria tão espalhada pelo vidro mais polido quanto pelo mais áspero. Resta pois o problema de saber como o vidro polido por substâncias abrasivas pode refletir a luz tão regularmente quanto o faz. E esse problema dificilmente será resolvido de outra forma que não dizendo-se que a reflexão de um raio é efetuada, não por um ponto único do corpo refletor, mas por algum poder do corpo que está espalhado uniformemente por toda sua superfície e pela qual ele age sobre o raio sem contato imediato (NEWTON, 1996, p. 200 - 201).

Na proposição 9, mostrada a seguir, Newton afirma que a reflexão e a refração ocorrem por meio de uma força que é exercida pelo material refletor/refrator.

Proposição 9

Os corpos refletem e refratam a luz em virtude de uma mesma força, exercida variadamente em variadas circunstâncias (NEWTON, 1996, p. 203).

Para Newton, a reflexão e a refração ocorrem por meio de uma mesma força, o que determina se essa força irá refratar ou refletir o raio de luz é o seu poder refrator, que depende das características do material, que, no caso do exemplo, está relacionado com a espessura do vidro, como é mostrado no trecho a seguir.

[...] a luz é alternadamente refletida e transmitida por lâminas finas de vidro através de muitas sucessões, à medida que a espessura da lâmina aumenta numa progressão aritmética. Pois aqui a espessura do vidro determina se a força pela qual o vidro atua sobre a luz fará com que ela seja refletida ou permitirá que seja transmitida (NEWTON, 1996, p. 203).

Na proposição 10, mostrada a seguir, Newton afirma que a luz se move mais rápido nos corpos do que no vácuo porque a força que está relacionada com a refração é proporcional à densidade do corpo. O que quer dizer que corpos mais densos, tem um poder refrator maior, o que faz com que a luz atravesse com maior rapidez.

Proposição 10

Se a luz for mais veloz nos corpos do que no vácuo, na proporção dos senos que medem a refração dos corpos, as forças dos corpos para refletir e refratar a luz serão muito aproximadamente proporcionais às densidades dos mesmos corpos, exceto que os corpos oleosos e sulfurosos refratam mais do que outros da mesma densidade (NEWTON, 1996, p. 44).

Segundo Moura (2008, p.124), embora Newton tenha afirmado que essa força poderia tanto refletir quanto refratar o raio, ele estudou apenas a segunda situação. Pois sua proposição 10 não fornece argumentos suficientes para explicar a reflexão por meio de uma força atrativa, porque segundo ele a força age sempre para frente, o que torna a reflexão impossível.

Nos trechos que seguem, Newton explicou a refração por meio da figura 2.30 na qual temos um raio que incide no ponto C e é refratado até o ponto R. Segundo a descrição, esse raio incidente forma um ângulo tão pequeno com a reta normal que é praticamente paralelo à linha AB.

Seja AB a superfície plana refratora de qualquer corpo e IC um raio que incide muito obliquamente sobre o corpo em C, de forma que o ângulo ACI possa ser infinitamente pequeno, e seja CR o raio refratado (NEWTON, 1996, p. 204).

[...] se CR representa o movimento do raio refratado, e esse movimento for dividido em dois movimentos CB e BR, dos quais CB é paralelo ao plano refrator e BR perpendicular a ele, CB representará o movimento do raio incidente e BR o movimento gerado pela refração, como os ópticos tem explicado ultimamente (NEWTON, 1996, p. 204).

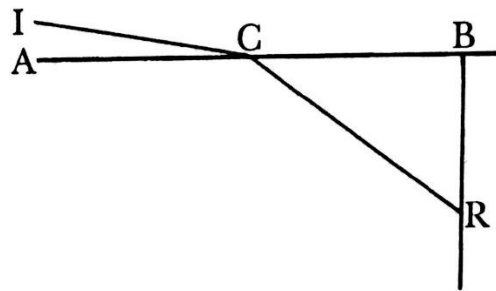


Figura 2.30: Raio de luz sofrendo refração e a representação da força refratora (NEWTON, 1996, p. 204).

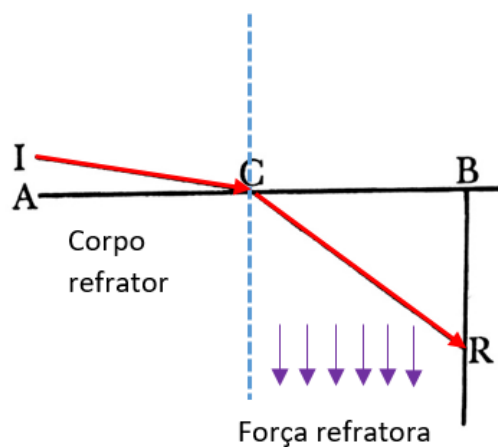


Figura 2.31: Raio de luz sofrendo refração e a representação da força refratora (NEWTON, 1996, p. 204, ADAPTADO).

No trecho que segue, Newton afirmou que quando o raio incide quase que paralelamente à linha AB, praticamente todo o movimento perpendicular que esse raio adquire (direção de BR) vem da ação da força refratora, estimulando-o para frente, no sentido de B para R. Ele ainda afirma que após a passagem completa do raio, sofrendo a ação dessa força que age em todas as partes do material, a velocidade adquirida na direção perpendicular será proporcional à raiz quadrada da força refratora.

Ora, se qualquer corpo ou coisa, movendo-se através de um espaço qualquer de uma dada extensão e terminado em ambos os lados por dois planos paralelos, for estimulado para frente em todas as partes desse espaço por forças que tendam diretamente para frente em direção ao último plano e que, antes de sua incidência no primeiro plano, não tinha nenhum movimento em direção a ele, ou tinha apenas um movimento infinitamente pequeno; e se as forças existentes em todas as partes desse espaço entre os planos forem iguais umas às outras a distâncias iguais dos planos, mas a distâncias diversas forem maiores ou menores em qualquer proporção dada, o movimento gerado pelas forças na passagem completa do corpo ou coisa

através do espaço estará numa proporção subduplicada das forças, como os matemáticos entenderam facilmente (NEWTON, 1996, p. 204).

A seguir, Newton reafirmou o que foi exposto no trecho anterior e disse que sendo assim, a força refratora do corpo é aproximadamente proporcional à densidade.

Portanto, se no espaço de atividade da superfície refratora do corpo for considerado como tal espaço, o movimento do raio gerado pela força refratora do corpo durante sua passagem através desse espaço (isto é, o movimento BR) deve estar numa proporção subduplicada dessa força refratora. Digo, portanto, que o quadrado da linha BR, e por consequência a força refratora do corpo, é muito aproximadamente proporcional à densidade do mesmo corpo (NEWTON, 1996, p. 205).

Newton encara a ação dessa força como a responsável por vários fenômenos ópticos, como a reflexão total e os “anéis de Newton”, assim, utiliza-os como exemplo para justificar sua proposição. Em suas próprias palavras: “[...] quando a luz emerge do vidro para o ar tão obliquamente quanto possível, se sua incidência for tornada ainda mais oblíqua ela se torna totalmente refletida. Pois a força do vidro após ter refratado a luz tão obliquamente quanto possível, se a incidência for tornada ainda mais oblíqua, torna-se muito forte para deixar qualquer de seus raios passar e, por consequência, causa reflexões totais.”

Para Moura (2008), o que Newton chama de “espaço de atividade da superfície refratora”, em outras palavras, o local em que a força de refração age sobre os raios de luz, mostra que Newton acreditava que ela agia por uma determinada extensão, e não decaía com o quadrado da distância, assim como a força de atração gravitacional.

Mais adiante, no Livro III de seu *Óptica*, Newton retoma essa discussão da força refratora, mais precisamente na *Questão 31*, onde especula com mais detalhes a natureza dessa força.

Não têm as pequenas partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais elas agem à distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inflectindo-os, mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza? Pois sabe-se que os corpos agem uns sobre os outros pelas ações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e o curso da natureza, e não tornam improvável que possa haver mais poderes atrativos além desses. Não examino aqui o modo como essas atrações podem ser efetuadas. O que chamo de atração pode-se dar por impulso ou por algum outro meio que desconheço. Uso esta palavra aqui apenas para expressar qualquer força pela qual os corpos tendem um para o outro, seja qual for a causa [...] (NEWTON, 1996, p. 274).

Newton entendia que essa força refratora tinha uma natureza diferente das forças gravitacional, magnética e elétrica. Uma das razões já citadas é o “espaço de atividade”, a força refratora, diferente das outras não tem sua ação diminuída com o quadrado da distância.

De acordo com Moura (2008), Newton não foi capaz de aplicar seu caráter indutivista nesse modelo, suas explicações não tão claras e, às vezes, contraditórias, fizeram com que sua teoria adquirisse uma condição mais especulativa.

Portanto, assim como para a materialidade da luz, Newton não foi muito além da especulação ao tratar as forças entre a luz e a matéria. Apresentando explicações obscuras e, por vezes, contraditórias, ele não conseguiu fundamentar seu tratamento mecânico para a luz por meio de justificativas plausíveis, fazendo com que ele adquirisse um forte caráter especulativo (MOURA, 2008, p. 126)

2.3.3.3. *Estados de fácil transmissão e fácil reflexão*

Com o intuito de explicar a formação de anéis coloridos em filmes finos e reflexões parciais em corpos transparentes, Newton propôs uma nova explicação para a interação entre a luz e a matéria, os estados de fácil transmissão e fácil reflexão. Segundo Moura e Silva (2008), os primeiros indícios da teoria dos estados da luz apareceram no artigo *A hipótese da luz*. Por essa razão, passaremos primeiro por suas principais considerações, para depois entender a teoria dos estados presente no *Óptica*.

Nesse trabalho, Newton elaborou uma discussão a respeito da constituição do éter e sua interação com a luz. O artifício de ter classificado seu artigo como uma hipótese deu a Newton a possibilidade de elaborar modelos para a luz e o éter sem se contrapor a nenhum filósofo natural da época, como já havia ocorrido com seu trabalho *Nova teoria de luz e cores*. No entanto, esse conteúdo de caráter mais especulativo, que vai contra o indutivismo pregado por Newton, não foi utilizado explicitamente no seu *Óptica*.

Moura e Silva (2008) destacam de forma resumida na *Hipótese da luz* de Newton, as cinco considerações feitas por ele acerca da natureza do meio etéreo e sua interação com a luz. São elas:

1. Existiria um meio etéreo no Universo responsável por fenômenos ópticos, elétricos, pela gravitação e outros;
2. O éter seria capaz de sustentar movimentos vibratórios;
3. O éter penetraria nos pequenos poros dos corpos, sendo que o corpo que possuísse menos poros (como o vidro) teria menos éter em sua composição, sendo um meio mais refrator que os outros que possuíam mais poros, como o ar.
4. A luz consistiria em raios sucessivos, que diferiam uns dos outros em aspectos como "grandeza, forma ou vigor".
5. A luz interagiria com o éter. Para Newton, a luz seria capaz de causar vibrações de diversas intensidades no éter, as quais interfeririam no movimento dos raios de luz.

(MOURA & SILVA, 2008, p. 92)

O conteúdo desse artigo é importante nesse trabalho para entendermos como Newton explicou as reflexões e refrações parciais, e posteriormente entender como essa hipótese resultou no conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão.

No trecho que segue, Newton explica as reflexões e refrações parciais através da interação dos raios de luz com o meio etéreo. Segundo Newton, os raios de luz provocam vibrações no éter, em movimento de contração e expansão alternados. Sendo assim, quando o raio incide no éter comprimido, e portanto muito denso, ele sofre reflexão. Já quando incide no éter expandido e mais rarefeito consegue atravessá-lo sofrendo refração.

[...] supondo que a luz incidente sobre uma superfície etérea refratora ou refletora a coloque num movimento vibratório; que a superfície física seja sempre mantida num movimento vibratório pela incidência perpétua dos raios, e que o éter nela existente seja continuamente expandido e comprimido, alternadamente, suponho que, se um raio de luz incidir sobre ela quando estiver muito comprimida, ela será densa e dura demais para permitir que o raio a atravesse e, portanto, irá refleti-lo; mas se os raios que incidem sobre ela noutros momentos, quando ela está expandida pelo intervalo entre duas vibrações, ou não muito comprimida e condensada, atravessam-na e são refratados. (NEWTON, 2002, p. 44)

Vale salientar que Newton também utilizou esse modelo das vibrações no éter para explicar o fenômeno dos anéis coloridos. No entanto, segundo Moura e Silva (2008), apesar dessa explicação permitir uma boa compreensão qualitativa das reflexões e refrações parciais, ela não é capaz de explicar a reflexão total. Pois Newton não relacionou a intensidade das vibrações geradas no éter com a inclinação dos raios incidentes, o que torna difícil de acreditar que a partir de uma certa inclinação essas vibrações deixariam o éter tão concentrado a ponto de refletir todos os raios.

Ademais, de acordo com Moura e Silva (2008), esse modelo puramente hipotético impediu Newton de utilizá-lo explicitamente seu *Óptica*, obra em que Newton se propôs a manter um caráter mais indutivista. Então, buscando alternativas ele trocou a ideia de vibrações no éter pela teoria dos estados da luz.

Então, em seu *Óptica*, a partir da décima segunda proposição Newton trabalha o conceito dos estados de fácil transmissão e fácil reflexão da luz. No entanto, ele não explicita se esses estados são propriedades inerentes da luz ou se surgem da interação da luz com a matéria. Além disso, veremos que essa teoria aponta contradições.

A seguir vemos a décima segunda proposição:

Proposição 12

Todo raio de luz, em sua passagem através de qualquer superfície refratora, assume uma certa constituição ou estado transitório que ao longo da trajetória do raio retorna em intervalos iguais e faz com que em cada retorno o raio tenda a ser facilmente transmitido através da próxima superfície refratora e, entre os retornos, a ser facilmente transmitido por ela. (NEWTON, 1996, p. 210)

Nela percebemos que Newton utiliza uma ideia de “constituição ou estado transitório” para os estados da luz, e mais, ao que tudo indica é a passagem pelo meio que provoca esses estados, isso fica claro no trecho: “em sua passagem através de qualquer superfície refratora, assume uma certa constituição ou estado transitório”. Para Moura e Silva (2008), Newton está recorrendo a uma hipótese de vibração, semelhante àquela utilizada na *Hipótese da luz*.

De acordo com Shapiro (1993), Newton desenvolveu a teoria dos estados quando estudou os anéis coloridos. Segundo ele essa ideia surgiu quando Newton percebeu que o modelo das vibrações no éter explicava muito bem esse fenômeno, decidindo transformar a hipótese em teoria.

Após a proposição 12, Newton lança em seu *Óptica* a definição da teoria dos estados, e logo em seguida a proposição 13.

Definição

Chamarei de estados de fácil reflexão aos retornos da tendência de qualquer raio para ser refletido; aos de sua tendência para ser transmitido, estados de fácil transmissão; e ao espaço que se sucede entre cada retorno e o retorno seguinte, intervalo de seus estados (NEWTON, 1996, p. 212).

Na definição, Newton explica como se comportam os raios nos determinados estados. Sendo assim, um raio em estado de fácil reflexão, ao incidir sobre a superfície transparente seria refletido, e um raio em estado de fácil transmissão ao incidir sobre uma superfície transparente seria refratado.

Proposição 13

O motivo pelo qual as superfícies de todos os corpos espessos transparentes refletem parte da luz que sobre ele incide e refratam o restante é que alguns raios, em sua incidência, estão em estados de fácil reflexão e outros em estados de fácil transmissão (NEWTON, 1996, p. 212).

Na proposição 13, Newton deixa subentendido que os raios, ao incidirem na superfície, já estão em seus estados de fácil transmissão ou fácil reflexão, ou seja, os estados são propriedades inerentes da luz, não são modificações adquiridas na passagem pelo meio, o que contradiz o que foi afirmado na proposição 12. De acordo com Moura e Silva (2008), podemos entender que se tratam de duas origens diferentes para os estados.

Mais adiante, quando Newton justifica a proposição 13, vemos novamente essa contradição. Observemos o trecho que segue:

Portanto, a luz se acha em estados de fácil reflexão e fácil transmissão antes de incidir sobre os corpos transparentes. E provavelmente ela assume esses estados na sua primeira emissão dos corpos luminosos e continua neles durante toda sua trajetória. Pois esses estados são de natureza duradoura [...] se os raios, que ao entrarem no corpo assumem estados de fácil transmissão, chegam à superfície mais distante do corpo antes de perder esses estados, eles devem ser transmitidos. (NEWTON, 1996, p. 213 -14).

Nas proposições seguintes Newton discute o fenômeno dos anéis coloridos em filmes espessos, utilizando o conceito de estados para justificar alguns resultados obtidos de suas observações.

Por fim, a teoria dos estados volta aparecer em seu livro III, nas *Questões*, onde Newton resolve abordar diversos assuntos em forma de perguntas, de caráter especulativo e ao mesmo tempo afirmativo, com o intuito de estabelecer suas ideias não completamente formalizadas, mas sem se comprometer. Como podemos ver na *Questão 29*.

Para colocar os raios de luz em estados de fácil reflexão e fácil transmissão, basta que eles sejam corpúsculos que por seus poderes de atração, ou por

alguma outra força, excitem vibrações naquilo que agem, vibrações estas que, sendo mais rápidas do que os raios, os ultrapassem sucessivamente e os agitem de modo a aumentar e diminuir alternadamente suas velocidades, colocando-os assim nesses estados. (NEWTON, 1996, p. 272)

Reparemos que nesse trecho, por se tratar das *Questões*, campo em que Newton utiliza para especular sem qualquer receio, ele resgata abertamente a hipótese das vibrações no éter presentes em seu artigo, e une essa ideia com o conceito da força que age entre a luz e a matéria.

CAPÍTULO 3. OS REFERENCIAIS PARA A CONSTRUÇÃO DO MINICURSO

Neste capítulo, discutiremos de forma mais aprofundada os referenciais para a construção do minicurso. Na primeira parte falaremos da dinâmica didático-pedagógica escolhida, os três momentos pedagógicos, que terá como função guiar a sequência de aulas. Na segunda parte, apresentaremos algumas discussões acerca da Natureza da Ciência e alguns aspectos abordados, com o intuito de levar esse tema para a sala de aula e dar subsídios para que os alunos entendam a importância dos modelos científicos estudados na construção do conhecimento científico. Na terceira parte, falaremos da experimentação investigativa, que terá como finalidade fazer com que o aluno seja capaz de utilizar seus conhecimentos prévios para formular hipóteses e criar discussões. Por fim, abordaremos o conceito de leitura contextualizada de fontes primárias, que se trata de um recurso para trabalhar com textos históricos originais em sala de aula.

3.1. Os três momentos pedagógicos (3MP)

Como mencionado nos capítulos anteriores, o ensino da Física, desde muito tempo, vem sendo praticado da mesma forma, prezando-se muito pela apresentação de conceitos e aplicação de fórmulas em problemas padrão, favorecendo a memorização em detrimento do pensamento crítico. Com isso, observamos a necessidade de propor algo que fuja dessa atmosfera conteudista e abstrata.

Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2011) e Muenchen (2006) são alguns dos autores que acreditam que os programas curriculares das escolas precisam mudar. Para eles, esse currículo tradicional, baseado na transferência de conhecimentos, favorece o que Freire chamava de "educação bancária". Esse modelo "bancário" de educação visa apenas a transmissão de conhecimento do professor para o aluno, colocando o aluno numa posição passiva somente recebendo informação, e o professor como aquele que tudo sabe. O professor deposita o conteúdo na cabeça dos alunos da mesma forma que alguém deposita dinheiro no banco (FREIRE, 1996).

É tentando lutar contra esse modelo de educação que utilizaremos nessa proposta um instrumento pedagógico que permita ensinar ciência de uma maneira mais problematizadora e crítica, os três momentos pedagógicos (DELIZOICOV, 1982). Trata-se de uma dinâmica didático-pedagógica, construída em um viés freireano de

educação, baseada em um processo dialógico entre professor e aluno, que permite que, ao final do processo, ambos adquiram uma melhor compreensão a respeito do tema estudado.

Os três momentos pedagógicos são caracterizados por:

1º Momento (Problematização Inicial) – são apresentadas situações reais ou questões que fazem parte do cotidiano do aluno. Nesse momento os alunos são estimulados a expor o que pensam a respeito das situações abordadas e o professor toma nota de seus conhecimentos prévios. A finalidade desse momento é fazer com que o aluno se defronte com suas interpretações e tente explicá-las com base nos conhecimentos que possui, ou que perceba que para compreender alguns fenômenos, muitas vezes, precisará atingir um determinado conhecimento que ele ainda não detém.

2º Momento (Organização do Conhecimento) – momento onde o professor auxilia os alunos com os conhecimentos necessários para a compreensão do fenômeno abordado na situação inicial. É o momento onde se desenvolve definições, conceitos e relações.

3º Momento (Aplicação do Conhecimento) – momento em que o professor aborda sistematicamente o conhecimento adquirido pelo aluno para analisar e interpretar tanto as situações iniciais quanto outras relacionadas com o mesmo conhecimento, que possam ser analisadas e explicadas da mesma forma.

Vale salientar que a problematização inicial representa a parte mais importante dos três momentos pedagógicos, pois se não for realizada de forma eficiente, os demais momentos e a aplicação como um todo ficarão comprometidos. Por isso, deve-se ter um cuidado especial com o primeiro momento, buscando sempre uma problematização enriquecedora e dialógica, pois ela é considerada o cerne da proposta. A seguir veremos alguns exemplos de autores que fizeram uso dos três momentos pedagógicos em seus trabalhos. Esses trabalhos apresentam algo em comum com o nosso trabalho que vai além do uso dos 3MP, um deles utiliza a História da Ciência e experimentação e o outro fala sobre a Óptica geométrica.

Silva (2013), em seu trabalho, com o intuito de dar sentido ao ensino da Ciência e mostrar que sua construção é algo não linear, propõe a inserção da HC como base para o ensino de Ciências. Sua ideia consiste em utilizar essa abordagem já nos anos

iniciais do Ensino Fundamental, início da escolarização, com a intenção de acompanhar o desenvolvimento cognitivo das crianças de forma gradativa, e para tal propõe utilizar a experimentação como objeto didático.

Para enxergar a diferença que a inserção da HC pode trazer na compreensão do fenômeno abordado, em sua proposta, ela organiza e compara duas turmas, uma que trabalhou apenas com atividades experimentais demonstrativas e outra que utilizou a abordagem histórica. Nas duas aplicações foram utilizados os 3MP como dinâmica de aplicação. A seguir mostraremos dois dos exemplos utilizados por Silva (2013) nas duas abordagens.

Newton e o Espectro de Cores (2º e 3º ano)

Atividade demonstrativa:

1º momento: a professora inicia a aula contando que hoje irão ver que a luz branca é composta por várias cores, as mesmas que aparece no arco-íris, que nada mais é do que a divisão da luz do Sol em seus espectros por meio das gotas d'água em um dia de chuva e Sol. Para exemplificar, a professora mostra fotos do arco-íris.

2º momento: inicia-se o experimento para que os alunos visualizem como a luz se comporta. Usando um prisma, a professora faz com que os raios do Sol passem pelo objeto que os “separa” em seus espectros: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. Para melhorar a visualização, ela coloca uma folha branca onde as cores serão incididas.

3º momento: depois de feito o experimento, a professora entrega uma folha contendo um desenho das linhas dos raios do Sol que passa pelo prisma e pede para que os alunos pintem os raios consoante o que viram na atividade.

Atividade com abordagem histórica:

1º momento: a aula começa com a professora levando um texto³⁵ para ser lido com os alunos. O texto conta a história de um homem chamado Isaac Newton, um grande cientista que mostrou muitas coisas sobre a natureza para pessoas de sua época. Nele é apresentado um estranho acontecimento que Newton percebeu um dia em sua casa.

Primeiras anotações: Estou no ano de 1666 e em meu país a peste toma conta. Outro dia fui à feira de Woolshorpe e lá comprei um prisma de vidro para utilizar como peso de papel, já que tenho muitos em minha mesa. Porém, no mesmo dia em que o levei para casa, pude perceber algo diferente. Como sempre, eu estava estudando em minha sala quando me deparei com uma bela imagem na parede, tal imagem não formava um desenho propriamente dito, mas suas cores eram lindas. Mas de onde vem essa imagem? Passei o dia analisando o que poderia haver de diferente em minha sala, e a única coisa que pude perceber foi o peso de papel. Seriam tais cores vindas do lado de fora?

Ao final da leitura, a professora pergunta se eles já viram algo desse tipo e pede para contarem em que circunstância ocorreu.

2º momento: após levantadas as experiências de cada aluno, a professora propõe que eles continuem lendo a segunda parte do texto. Nessa segunda parte é relatado que Newton ficou tão curioso para saber o que tinha ocorrido que decidiu fazer um estudo sobre o assunto.

Tenho passado os dias tentando compreender de onde vieram as cores em minha parede. Estou começando a achar que elas vieram dos raios do Sol, pois minha janela estava aberta naquele dia. Tentei fazer um experimento hoje, utilizando o meu peso de papel, o prisma, mas ainda estou analisando os resultados.

Ao final, a professora pergunta se os alunos teriam alguma ideia de o que fazer com o prisma para conseguir ver o conjunto e cores. A ideia é questionar os alunos na tentativa de que eles reflitam acerca da questão, por isso, ela irá fazer muitas perguntas do tipo: O que podemos fazer para as cores aparecerem? Como foi que elas apareceram? Será que é apenas com a luz do Sol que isso ocorre? Como a luz consegue se “transformar” em tantas outras?

3º momento: como forma de encerrar a aula, ao final das discussões, a professora propõe que façam juntos um relatório, descrevendo o problema, as ideias de Newton e as conclusões a que eles chegaram a partir a realização do experimento que o cientista também desenvolveu.

(SILVA, 2013, p. 127-128)

Albuquerque e colaboradores (2015) também utilizam os 3MP em sua proposta. Tentando ir na contramão do ensino da óptica geométrica atual, pautado apenas nos aspectos geométricos e ignorando muitas vezes os fenômenos físicos, eles propõem uma mudança nessa forma tradicional de estudo, buscando algo que se aproxime mais das diretrizes curriculares mais atuais, privilegiando o estudo e a explicação dos fenômenos presentes no nosso dia a dia. Dessa forma, eles apresentam uma proposta temática em grupos que foi organizada de acordo com os 3MP.

A seguir é mostrado, de forma resumida, como se deu a organização dessa proposta. Primeiramente, os grupos devem ser divididos e cada grupo deve receber um tema da óptica com uma pergunta que representa a problematização inicial, como segue:

- Olho Humano: o que é necessário para enxergarmos?
- Câmera Fotográfica: como se formam as fotos?
- Arco-íris: como se forma o arco-íris?
- Fotos/filmes 3D: o que é necessário para vermos uma imagem 3D?
- Cor do céu e pôr do Sol: quais as cores do céu e do Sol?

(ALBUQUERQUE et. al., 2015, p. 466)

Em seguida, na organização do conhecimento, os alunos são convidados a desenvolver as seguintes atividades com o auxílio do professor, o qual servirá como mediador nesse processo.

- Elaborar um texto – restringimos o texto a uma página e ele deveria conter alguma informação que o grupo julgou necessário para entender o tema e a questão inicial;
- Preparar uma demonstração experimental – O experimento foi sugerido e elaborado pelo próprio grupo, sendo que esse devia estar relacionado a algum fenômeno físico dos conceitos necessários para explicar a questão inicial;
- Produzir uma apresentação – o grupo elaborou uma apresentação para a turma e os professores usando os mais diversos recursos, como vídeo, slides ou simulações computacionais. Essa apresentação continha uma síntese do que foi discutido ao longo dos dois primeiros momentos da atividade.

(ALBUQUERQUE et. al., 2015, p. 467)

Por fim, para a aplicação do conhecimento, os autores propõem a apresentação do que foi desenvolvido pelos grupos nas etapas anteriores. Esse é o momento em que os grupos compartilham o texto elaborado e fazem a demonstração do experimento construído.

Com base nesses trabalhos enxergamos a possibilidade real de tornar o ensino da física mais significativo para o aluno. Por isso escolhemos aplicar nossa proposta utilizando os 3MP, pois acreditamos que com essa metodologia o aluno ganhará mais autonomia e será sujeito ativo de sua aprendizagem, fugindo assim da “educação bancária”.

3.2. Natureza da Ciência (NdC)

A vontade de fazer com que alunos e professores aprendam sobre a Ciência, e não tão somente a Ciência, fazendo com que estes tenham uma aprendizagem acerca da natureza dos conhecimentos científicos adquiridos e de sua importância histórica, tem se mostrado presente nas últimas décadas. Esse tema tem sido parte de inúmeras pesquisas, nacionais e internacionais, de historiadores, filósofos e educadores. Essa preocupação com o entendimento sobre a natureza dos conhecimentos científicos faz parte da complexa definição de “Natureza da Ciência”.

A NdC em uma visão geral, segundo Lederman (2007), é entendida como um conjunto de saberes sobre as bases epistemológicas envolvidas na construção, estabelecimento e organização do conhecimento científico, podendo abranger desde questões sobre a existência de um método científico até questões como a influência de elementos sociais, culturais, religiosos, políticos e etc. Moura (2014) mostra duas visões distintas sobre a Natureza da Ciência que vêm sendo debatidas entre os

pesquisadores da área. Uma delas é o que chamamos de “aspectos consensuais” que representa uma lista de princípios claros e objetivos que estão envolvidos na construção do conhecimento científico. A outra perspectiva, que não é o nosso foco, fomentada por alguns estudiosos que criticam a ideia dos “aspectos consensuais”, é chamada de “semelhança familiar”.

O entendimento acerca da NdC pode ser levado como condição indispensável para a formação de seres humanos mais críticos, por esse motivo discussões sobre a sua implementação no ensino têm sido frequentes em diversas esferas da educação. Nesse meio a HC surge como um excelente caminho para a inserção da Natureza da Ciência no ensino, e é dessa forma que a NdC, através de seus “aspectos consensuais” será discutida neste trabalho.

Do ponto de vista de alguns autores, quando trabalhamos o conceito de Natureza da Ciência, devemos abordar os “aspectos consensuais” que são tidos como fundamentais no processo de construção do conhecimento científico e são aceitos pela maioria, dentre esses autores podemos citar: William F. McComas e colaboradores, Stephen Pumfrey e Daniel Gil-Pérez e colaboradores.

Há uma infinidade de pressupostos acerca da NdC e podemos concluir que vários deles são consensuais. De uma maneira mais geral, Moura (2014) elencou e dividiu esses pressupostos de modo a pegar os cinco tópicos mais abrangentes que serão apresentados e discutidos brevemente a seguir.

A Ciência é mutável, dinâmica e tem como objetivo buscar explicar os fenômenos naturais. Aqui a discussão deve girar em torno da ideia de que a Ciência não é algo estático, é algo que está em constante transformação e sempre em busca de elaborar modelos que explicam os fenômenos naturais. O professor deve se esforçar, também, para deixar claro que a Ciência não é um conjunto de verdades absolutas, mas sim algo que está em constante mudança.

Não existe um método científico universal. Aqui a ideia é esclarecer que não existe um conjunto de regras universais para fazer Ciência, cada cientista pode utilizar métodos diferentes e chegar em resultados diferentes. O que quer dizer que um mesmo fenômeno pode ser compreendido de modos diferentes.

A teoria não é consequência da observação/experimento e vice-versa. O professor deve deixar claro de que a relação entre teoria e experimento é muito

complexa. A Ciência constrói modelos e explicações baseadas em metodologias e pressupostos epistemológicos, sociológicos e filosóficos que são sempre mutáveis ao longo do tempo devido às mudanças nos contextos científicos, sociais e culturais. Talvez, aqui, caiba ao professor fazer uma breve discussão sobre indutivismo ingênuo, utilizando exemplos bem simplórios para argumentar que não existe observação livre de expectativa ou concepção prévia.

A Ciência é influenciada pelo contexto social, cultural, político etc., no qual ela é construída. Nesse caso, cabe ao professor destacar a não neutralidade da Ciência, mostrar aos alunos que as questões da época, o local onde os cientistas vivem e as influências que sofrem podem ser determinantes na aceitação ou rejeição de suas ideias. Como exemplo, o professor pode citar a diferença nas aceitações dos trabalhos de Newton antes e depois dele se tornar presidente da Royal Society.

Os cientistas utilizam imaginação, crenças pessoais, influências externas, entre outros para fazer Ciência. Neste ponto o professor deve enfatizar que os cientistas nunca estão livres de influências, pois são seres humanos, possuem imaginação, crenças, cometem erros etc. Dessa forma, não existe um modelo pré-definido e único de cientista, cada qual, ao seu modo, se adapta à sua realidade, formando cientistas diferentes em momentos diferentes. O que não significa que um seja melhor do que o outro, significa apenas que são diferentes.

Como podemos perceber, na literatura temos vários autores, e cada um deles com vários pressupostos para a NdC. Alguns completamente divergentes, mas outros convergentes, que são os ditos consensuais. No minicurso vinculado a este trabalho daremos ênfase em discutir dois aspectos da NdC, construídos a partir das discussões de vários trabalhos da literatura especializada (McCOMAS, 1998; PUMFREY, 1991 e GIL-PÉREZ, 2001): o conhecimento científico está em contínua transformação e nenhum modelo científico está à prova de falhas. A seguir mostraremos alguns trabalhos que fazem uso da NdC no ensino de Física.

Monteiro (2014) defende a inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de Física, e em defesa dessa abordagem aponta os possíveis ganhos que ela pode trazer para o aprendizado científico e para a compreensão dos aspectos relacionados à NdC. Dessa forma, em seu trabalho, propõe uma sequência de aulas, a partir da qual será trabalhada a HC, e em cima dela discutidos alguns conceitos relacionados à Natureza da Ciência. Essa sequência teve como foco os alunos dos cursos de

Geofísica e Licenciatura em Física que cursavam a disciplina de Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Como episódio histórico a autora decidiu abordar a história da inércia, com a justificativa de que ela é extremamente importante para conceituar a física clássica e também possui grande potencial para se discutir aspectos da NdC. Dentre os aspectos discutidos nesse trabalho a autora cita:

- O conhecimento científico, enquanto durável tem caráter provisório, assim como seu processo de construção.
- A controvérsia entre os cientistas sempre é possível.
- O conhecimento científico se desenvolve em um contexto cultural de relações humanas e é influenciado por fatores extracientíficos.

(MONTEIRO, 2014, p. 92)

Consoante com Monteiro (2014), Silva (2010) também defende a inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de Física e afirma que um dos eixos para obtermos uma educação científica de melhor qualidade está na compreensão sobre a Ciência, ou seja, nos aspectos da NdC. Dessa forma, em seu trabalho, ele propõe a introdução de elementos da HC para alunos do Ensino Médio, com a finalidade de fomentar o aprendizado da óptica e de alguns aspectos relacionados à NdC. O autor utilizou episódios históricos que abordam a controvérsia existente acerca da natureza da luz, e para tal, apresentou a construção de uma unidade didática que compreende a leitura de fontes primárias seguida de um debate coletivo. Dentre os aspectos relacionados à NdC utilizados pelo autor, citamos.

- Contribuição de culturas diferentes para o avanço científico.
- As teorias são influenciadas por aspectos políticos, sociais e religiosos.
- A ciência é formada por interpretações ambíguas.
- As teorias são formadas por hipóteses e não simplesmente por observações.
- Não existem deduções incontestáveis.
- O conhecimento científico é dinâmico.

(SILVA, 2010, p. 38)

Com base nesses trabalhos enxergamos algumas possibilidades para discutir a NdC em sala de aula, e vemos o potencial que a HC possui para esse tipo de abordagem. Pois ela possibilita que discutamos com os alunos não apenas a Ciência,

propriamente dita, mas sobre a construção da Ciência, estimulando assim um pensamento mais crítico nos estudantes.

3.3. Experimentação investigativa

Consoante ao que foi exposto em capítulos anteriores, vivemos em um cenário em que o ensino de Física tradicional é majoritário nas instituições de ensino. Nesse modelo de ensino, as aulas costumam ser baseadas em exposição de conteúdo, memorização e aplicação de fórmulas e resolução de exercícios padrão, o que não favorece a maioria dos estudantes de nível médio, tornando as aulas maçantes e causando desinteresse. Posto isso, observamos a necessidade de propor algo que fuja um pouco dessa atmosfera conteudista e abstrata, e que seja capaz de engajar os alunos. Utilizaremos a experimentação como ponto de partida.

O uso da experimentação como ponto de partida para que o aluno compreenda melhor os conceitos abordados é uma forma de fazer com que o aluno participe do processo de aprendizagem, que ele tenha aí um papel ativo, abandonando, dessa forma, a postura passiva e sendo capaz de tecer relações entre as observações e dados tomados no experimento de modo a estabelecer uma explicação causal acerca dos resultados de suas ações e/ou interações (CARVALHO et al., 1998).

Para Rosa (2011), com o uso da experimentação o aluno deixa de ser um sujeito passivo passando para a posição de protagonista “pondo em movimento toda sua estrutura cognitiva, revendo antigas concepções pessoais, de modo a, se não substituir, ao menos, vincular a elas novos conhecimentos construídos”. O processo da experimentação faz com que o aluno tenha de utilizar os saberes que possui, seus conhecimentos prévios, pondo-os à prova e sentindo a necessidade de construir novos significados, novas concepções a respeito do mundo fenomenológico que o cerca.

Pensando em tornar o aluno um sujeito ativo de sua aprendizagem e fazer com que ele reveja suas antigas concepções acerca dos fenômenos, como sugere Rosa (2011), é que utilizamos a experimentação vinculada à problematização inicial em nossa proposta. Mais que isso, baseados em uma perspectiva freireana de educação, com o intuito de proporcionar aos alunos um maior senso crítico e torná-los protagonistas de sua aprendizagem, utilizaremos como ponto de partida uma

atividade investigativa, na qual o professor é tido como uma figura mediadora do conhecimento e não apenas transmissora.

Azevedo (2004) considera a atividade investigativa como uma estratégia importante para o ensino da Física e acredita que os alunos aprendem melhor o conhecimento conceitual quando participam de investigações científicas. Ela caracteriza uma atividade investigativa da seguinte forma:

Para que uma atividade possa ser considerada uma atividade de investigação, a ação do aluno não deve se limitar apenas ao trabalho de manipulação ou observação, ela deve também conter características de um trabalho científico: o aluno deve refletir, discutir, explicar, relatar, o que dará ao seu trabalho as características de uma investigação científica (AZEVEDO, 2004, p.21).

Buscamos com essas atividades investigativas tornar o aluno o sujeito de sua aprendizagem, fazer com que ele possua um papel ativo nesse processo e que seja capaz de adquirir novos conhecimentos relacionando-os com aqueles que já possui. Como Azevedo (2004) descreve nesse trecho.

A experimentação baseada na resolução de problemas não é suficiente para a descoberta de uma lei física, tampouco achamos necessário que o aluno passe por todas as etapas do processo de resolução de maneira autônoma, mas que, com base nos conhecimentos que os alunos já possuem do seu contato cotidiano com o mundo, o problema proposto e a atividade de ensino criada a partir dele venham despertar o interesse do aluno, estimular sua participação, apresentar uma questão que possa ser o ponto de partida para a construção do conhecimento, gerar discussões e levar o aluno a participar das etapas do processo de resolução do problema (AZEVEDO, 2004, p.22).

Segundo Guedes (2010), a Experimentação Investigativa (EI) tem como objetivo orientar os estudantes a pensar, debater, justificar ideias e também saber aplicar o conhecimento adquirido em diversas situações. Partindo desses pressupostos, para a experimentação ser considerada investigativa, ela deve induzir ao aluno habilidades como: curiosidade, iniciativa, criticidade, poder argumentativo, etc. Dessa forma, por meio dessa abordagem investigativa o aluno torna-se protagonista em seu processo de aprendizagem, desgarrando-se do papel de simples observador (GUEDES, 2010).

De acordo com Francisco Jr. (2008), a EI deve se contrapor à educação “bancária” de Paulo Freire, na qual o conhecimento é transferido de forma acrítica e apolítica, como uma doação daquele que sabe mais para aquele que sabe menos. É nesse viés que a EI deve propor uma busca incessante pelo conhecimento,

despertando nos alunos um espírito crítico e reflexivo, tornando-os sujeitos de sua aprendizagem, à medida que são capazes de formular hipóteses e discutir sobre o tema (FRANCISCO JR, 2008).

Tentando ir contra o que se chama de “educação bancária”, nessa proposta recorreremos ao uso da EI, consoante com todos os autores citados, com o intuito de despertar nos estudantes um pensamento reflexivo e crítico, fazendo com que eles sejam sujeitos ativos de sua própria aprendizagem. Nosso intuito com o processo da experimentação é fazer com que o aluno seja capaz de utilizar seus conhecimentos prévios para formular hipóteses e criar discussões, construindo novas concepções acerca do tema abordado. A seguir veremos alguns os trabalhos de alguns autores que utilizaram a EI.

Hernandes e colaboradores (2002), de acordo com o que foi apresentado, defendem a “alfabetização científica”, e dessa forma, priorizam, a substituição das atividades experimentais tradicionais por atividades mais flexíveis, de natureza investigativa, que eles intitulam Atividades Experimentais com Roteiro Aberto.

Em seu trabalho, propõem o uso de uma atividade experimental com roteiro aberto para alunos do Ensino Médio. Baseados em seus referenciais teóricos sugerem algumas orientações, divididas em três momentos, que deverão servir para guiar o professor na execução dessa atividade investigativa. Essas orientações são mostradas na sequência.

I. OBSERVAÇÃO/PREVISÃO

1. Observações livre do fenômeno.
2. Elaboração de breves relatos descritivos sobre a situação/fenômeno em observação.
3. Sugestão de explicações para o observado (Elaboração de modelo(s) explicativo(s) apropriado(s) para o fenômeno, levantamento de hipótese e previsão de resultados).
4. Estabelecimento de parâmetros/grandezas/variáveis necessários para analisar o fenômeno e das relações qualitativas e/ou semi-qualitativas entre eles.
5. Sugestão de procedimentos experimentais a serem seguidos para validar/contestar/refutar/verificar estas relações. Escolha de instrumentos de medida mais adequados. Determinação da quantidade de medidas para cada parâmetro (Identificação de procedimentos e seleção de técnicas experimentais).

II. REALIZAÇÃO/FORMALIZAÇÃO

6. A discussão e a comparação entre esses modelos sugere a necessidade de um aspecto quantitativo para desempate desses modelos, explicações e hipóteses. Sendo o professor o responsável na orientação deste momento.

7. Realização da atividade experimental propriamente dita, segundo o(s) procedimento(s) sugerido(s).

8. Realização e organização das informações medidas (obtenção de resultados).

III. COMPARAÇÃO/ANÁLISE

9. Qualificação dos resultados obtidos. (construção de tabelas e gráficos a partir das medidas).

10. Discussão do significado dos resultados obtidos (medidas individuais, médias, cálculos, incertezas).

11. Comparação entre os resultados obtidos na realização com aqueles previstos no item 3.

12. Elaboração de conclusões (procurando referenciar as hipóteses lançadas).

13. Aplicação a novas situações.

(Hernandes et al., 2002, p. 4)

Ao ver dos autores, essas orientações são denominadas roteiros abertos porque baseiam-se na discussão e no diálogo, privilegiando mais o questionamento e a reflexão do que a simples manipulação de instrumentos técnicos.

3.4. Leitura contextualizada

A História da Ciência pode ser utilizada como um excelente recurso pedagógico para ensinar disciplinas científicas, pois com ela é possível tornar as aulas mais desafiadoras e reflexivas, ao passo que ela permite que o aluno compreenda melhor o significado dos conceitos trabalhados em sala de aula. A História da Ciência pode colocar em evidência uma Ciência mais humana, pois nela estão inseridos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade, não estando isenta como é entendido no senso comum (MATTHEWS, 1995).

No entanto, Boss et al. (2016) ressaltam que devemos tomar cuidado com o uso da HC, pois existem obstáculos na sua aproximação com o Ensino de Ciências. Em primeiro lugar, podemos destacar a ausência de materiais históricos em português, que possam auxiliar os professores em sala de aula, e, também, a falta de adequação do conteúdo de História da Ciência presente nos livros didáticos. Além disso, Boss et al. (2016), ao longo de suas experiências com textos históricos em sala de aula, notaram que os alunos apresentam uma dificuldade muito grande na compreensão desses textos, pois eles não são adequados ou compreensíveis aos

estudantes e professores que não trabalham com HC. Utilizando uma citação já sugerida por Boss et al. (2016), segundo Bastos:

[...] os textos de História da Ciência disponíveis para consulta dificilmente se adaptam às necessidades específicas do Ensino de Ciências na escola fundamental e média, talvez porque não reúnam simultaneamente, de modo sintético e numa linguagem acessível, os diferentes aspectos que o professor pretende discutir em sala de aula [...] (BASTOS, 2009, p. 52).

Tendo em vista essa dificuldade, Boss et al. (2016) fizeram uma pesquisa para mapear as principais dificuldades apresentadas pelos estudantes durante a leitura e entendimento de uma fonte primária traduzida, e, também, sugestões de elementos que pudessem facilitar na compreensão desses textos. As principais dificuldades destacadas foram: “vocabulário desconhecido”, “falta de comparação com termos conhecidos”, “parágrafos extensos” e o “entendimento da descrição do experimento”. Como principais sugestões dos elementos que poderiam ser inseridos no texto, obtiveram: “figuras”, “explicitar o vocabulário” e “notas explicativas”. Elementos possíveis de serem inseridos no texto. Com isso, Boss et al. (2016) entendem que as traduções de fontes primárias podem se tornar mais adequadas e inteligíveis com a inserção desses elementos.

É neste âmbito que surge a ideia da leitura contextualizada (LC), pois trata-se de um recurso para facilitar o contato do aluno com a HC, mais precisamente com as fontes primárias. Essas fontes primárias, muitas vezes, têm uma leitura mais difícil que os materiais convencionais, seja pelo uso de termos que não estão presentes no vocabulário dos alunos, seja pela complexidade do raciocínio do autor. É dessa forma que a nossa LC tem como objetivo esmiuçar e explicar o conteúdo da fonte primária, direcionando os alunos às discussões acerca do tema abordado. Como citado anteriormente, através de figuras, vocabulário explicitado e notas explicativas.

A LC tem uma estrutura básica e simples. A contextualização envolve relacionar, descrever e explicar o tema, a linguagem e a estrutura das fontes, ou seja, estudá-las de acordo com o contexto em que foram inseridas, de maneira que os leitores tenham subsídios conceituais para compreendê-las. Fontes cujo tema, linguagem e estrutura são mais próximos dos escritos atuais demandam menos contextualização, enquanto aquelas mais distantes exigem um esclarecimento mais profundo. Por exemplo, ao estudarmos uma fonte medieval sobre o movimento, é preciso esclarecer, o que era entendido por movimento na época, quais termos eram

utilizados e quais seus significados naquele momento – *impetus*, por exemplo, não era o mesmo que *inércia*, no sentido atual do termo –, quais as motivações e expectativas de seus autores, as relações entre o conhecimento sobre o mundo natural e a filosofia, dentre outros pontos. Dessa forma, a leitura da fonte torna-se mais produtiva e os assuntos nela trabalhados mais fáceis de serem compreendidos por um público não especializado em materiais do tipo ou não familiarizados com a História e a Filosofia das Ciências.

No caso das LCs apresentadas neste minicurso, suas elaborações requereram um estudo detalhado das obras dos cientistas escolhidos – Descartes, Huygens e Newton –, bem como do contexto em que foram produzidas. Assim, foram estudados aspectos da história da óptica até o século XVII, as influências de outros pensadores sobre as ideias dos três cientistas, a relação entre eles, a aceitação e rejeição de suas teorias, dentre outros pontos. Não se pretendeu, claramente, realizar um estudo historiográfico novo, mas obter daqueles já existentes as informações necessárias para que fosse possível compreender os assuntos, termos, ideias e experimentos trabalhados por Descartes, Huygens e Newton em suas respectivas obras. Nesse sentido, há diversas obras sobre a óptica nesse período, disponíveis majoritariamente em língua inglesa, Darrigol (2012), Sabra (1981), Shapiro (1973; 1989), Moura (2008), Martins & Silva (2015), entre outras.

O trabalho do pesquisador com a LC de fontes primárias possui quatro momentos distintos. O primeiro momento envolve a escolha da fonte a ser trabalhada e os recortes a serem feitos. A complexidade dos temas tratados na fonte está diretamente relacionada com o nível de contextualização. O segundo momento envolve o estudo de fontes secundárias ligadas aos assuntos e autores das fontes primárias, ou seja, a leitura e análise de estudos historiográficos. O terceiro momento abrange a leitura do texto integral e sua divisão em partes, cada uma sendo contextualizada. O quarto momento implica a organização geral da leitura e a redação de uma proposta de LC com a fonte primária. No caso deste minicurso, esse trabalho já foi realizado pelo autor.

O trabalho do professor com a LC de fontes primárias possui, também, quatro momentos. No primeiro deles, o professor distribui o trecho integral da fonte primária escolhida aos alunos e fornece um tempo para leitura. No segundo momento, o professor solicita aos alunos comentários sobre os assuntos tratados no texto,

buscando fazer conexões entre as diferentes impressões. No terceiro momento, o professor realiza a leitura contextualizada passo a passo do texto, explicando termos, ideias e argumentos, à luz da época. No quarto e último momento, o professor faz a síntese dos assuntos discutidos na fonte, podendo abordar questões relacionadas, tais como as de Natureza da Ciência.

A LC ainda está em fase de desenvolvimento e essa dissertação é o primeiro texto em que ela é discutida. Certamente, nos próximos anos, mais trabalhos fundamentando-a aparecerão, contribuindo para inserir mais fontes primárias em contextos de ensino.

Entendemos que esse aprofundamento a respeito dos referenciais utilizados para a construção do minicurso faz-se necessário para uma melhor compreensão do leitor. Portanto, é recomendada a leitura da dissertação como aporte para a utilização do produto em sala de aula.

CAPÍTULO 4. A PROPOSTA E SUA APLICAÇÃO

Neste capítulo, apresentaremos nossa proposta e discutiremos a aplicação piloto do produto educacional, comentando sobre percurso metodológico desenvolvido, além de uma apresentação das características da turma em que o minicurso foi desenvolvido, bem como o contexto dessa aplicação.

4.1. A proposta

Nossa proposta pedagógica se resume a um minicurso que será aplicado para alunos do Ensino Médio, esse minicurso é o produto educacional gerado pela nossa pesquisa e encontra-se como apêndice dessa dissertação. Nesse minicurso, temos

como motivação principal ensinar a Física de maneira problematizadora, por meio do uso da História da Ciência (HC) e da Experimentação Investigativa (EI). Para isso, ofereceremos ao professor subsídios para discutir historicamente três conceitos da óptica – propagação, reflexão e refração da luz – proporcionando uma compreensão mais abrangente deles, além de oferecer momentos para a promoção de uma postura mais crítica em relação à construção do conhecimento científico. Tudo isso com o principal objetivo de minimizar o tratamento essencialmente geométrico da óptica, que ainda hoje persiste no ensino de Física.

Esse minicurso foi construído sobre quatro fundamentos centrais. O primeiro deles envolve o estudo de fontes primárias da HC. As fontes primárias compreendem, entre outras coisas, os textos originais produzidos pelos cientistas. Em nosso minicurso, utilizamos fontes primárias de três cientistas⁹ do século XVII que estudaram a luz: René Descartes, Christiaan Huygens, e Isaac Newton. Todos os materiais utilizados já foram previamente traduzidos para o português por outros autores. Nossa intenção é aproximar essas fontes do cotidiano da sala de aula, visto que enxergamos nelas um grande potencial para ensinar conceitos básicos de propagação, reflexão e refração da luz, além de servirem como caminho para trabalhar a construção do conhecimento científico, ponto que discutiremos adiante. O estudo das fontes é feito pelo método de Leitura Contextualizada (LC), procedimento já descrito anteriormente.

O segundo fundamento se refere aos Três momentos pedagógicos (3MP), conforme proposto por Delizoicov (1982) e otimizado posteriormente. Trata-se de uma dinâmica didático-pedagógica, baseada em um processo dialógico entre professor e aluno, que permite, ao final do processo, que ambos adquiram uma melhor compreensão a respeito do tema estudado. O terceiro fundamento é a EI. Esse fundamento tem como intuito fazer o aluno pensar, debater e formular hipóteses, adquirindo, dessa forma, um pensamento crítico e reflexivo e o tornando sujeito de sua própria aprendizagem.

Por fim, o quarto e último fundamento é a Natureza da Ciência (NdC). A NdC diz respeito a questões inerentes à construção do conhecimento científico, tais como a não existência de um método científico universal, a relação de questões sociais e culturais no desenvolvimento das ideias científicas, o papel da imaginação dos

⁹ Entendemos que o termo “cientista” não existia no século XVII, sendo mais comum “filósofo natural”. Entretanto, para facilitar, manteremos a palavra utilizada atualmente.

cientistas, entre outras. Nosso minicurso propõe trabalhar com essas questões, promovendo uma visão mais ampla, adequada e crítica sobre a ciência e o fazer científico.

Esse minicurso foi dividido em quatro módulos: propagação retilínea da luz, reflexão da luz, refração da luz e NdC. Os três primeiros módulos contemplam os três momentos pedagógicos de acordo com (Delizoicov, 1982) e o último módulo apresenta uma discussão final acerca da NdC. O curso tem como base o material disponível nos apêndices, incluindo as leituras contextualizadas das fontes primárias.

Recomenda-se para a aplicação do curso um período de 16 aulas, sendo cinco para cada fenômeno e uma para a discussão final acerca da NdC. A estrutura sugerida para os três primeiros módulos do curso é a seguinte: cada fenômeno (cinco aulas) deverá ser dividido em três fases, conforme o quadro 1 abaixo. Já o último módulo fica livre de estruturas.

Quadro 1: Estrutura sugerida para cada atividade.

Momento Pedagógico	Desenvolvimento
Problematização inicial (Aulas 1 e 2)	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento acerca do fenômeno a ser abordado. • Indagações aos alunos. • Execução do experimento (EI). • Conclusão do primeiro momento.
Organização do conhecimento (Aulas 3 e 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Esclarecimentos sobre a aula anterior. • Abordagem histórica - contato com fontes primárias (LC). • Explicação dos modelos propostos no viés dos filósofos naturais.
Aplicação do conhecimento (Aula 5)	<ul style="list-style-type: none"> • Debate acerca da construção do conhecimento científico. • Atividade final.

4.2. A aplicação

A intervenção pedagógica proposta nessa dissertação, o minicurso, foi aplicada em uma escola da rede privada, uma franquia do Colégio Objetivo, localizada na cidade de Vargem Grande Paulista, São Paulo. A aplicação se deu em caráter piloto, e, como não foi objetivo deste trabalho avaliá-la, mas sim propô-la, não procedemos uma investigação profunda a esse respeito.

A escola possui apenas três turmas de Ensino Médio, sendo um primeiro, um segundo e um terceiro ano. A turma escolhida para aplicação foi o segundo ano do EM. O motivo da escolha deu-se pelo fato de o conteúdo programático da apostila dessa turma coincidir com o conteúdo abordado em nossa proposta. Além disso, essa é a turma com maior número de aulas dedicadas à óptica, possibilitando assim um tempo maior para a aplicação do minicurso.

Visto que a escola utiliza um sistema de ensino apostilado, algumas adaptações tiveram de ser feitas no decorrer dessa aplicação. Por exemplo, a reorganização dos módulos propostos pela apostila e resolução dos exercícios propostos para o preenchimento do caderno do aluno. É hábito comum, nas escolas da rede privada com sistema apostilado, alguns pais consultarem a apostila dos filhos. Muitas vezes, de forma errônea, associam o preenchimento da apostila com o cumprimento do conteúdo programático, acreditando que um professor que não segue a apostila não cumpre com o seu papel de educador. Por essa razão, não pudemos deixar de cumprir a apostila durante a aplicação do nosso minicurso.

O conteúdo da apostila é dividido da seguinte forma:

Módulos

- 1 – Princípios da óptica geométrica I
- 2 – Princípios da óptica geométrica II
- 3 – Princípios da óptica geométrica III
- 4 – Objeto e imagem
- 5 – Espelhos planos
- 6 – Campo visual
- 7 – Translação do espelho plano
- 8 – Associação de espelhos planos
- 9 – Espelhos esféricos
- 10 – Construção gráfica da imagem de um pequeno objeto frontal
- 11 – Equação de Gauss

12 – Equação de Gauss – Aumento linear transversal (A)

13 – Índice de refração e leis da refração

14 – Índice de refração e leis da refração

15 – Índice de refração e leis da refração

16 – Reflexão total

(OBJETIVO, 2018, p. 133)

Para a aplicação dividimos da seguinte forma. Os módulos 1, 2 e 3 da apostila contemplam o conteúdo abordado no primeiro módulo do nosso curso. Os módulos 4, 5, 6, 7 e 8 abrangem o conteúdo do segundo módulo. Por fim, os módulos 13, 14 e 15 contemplam o conteúdo do nosso terceiro módulo, totalizando 11 módulos. Dessa forma, à medida que terminamos os módulos do minicurso, resolvemos em sala de aula os exercícios dos módulos relacionados. Os demais módulos da apostila foram tocados normalmente após o término da nossa aplicação.

Outra pequena mudança ocorreu com relação ao número de aulas do minicurso. A proposta original previa um número de 16 aulas. Reduzimos para 13, diminuindo uma aula de cada módulo, para ficar com um número de aulas mais próximo do que temos, de fato, para trabalhar esse conteúdo, os 11 módulos da apostila. Sendo assim, os três módulos do minicurso seguiram essa estrutura básica, totalizando 12 aulas. O quarto módulo, que foi uma discussão acerca da NdC, ficou livre de estruturas e representou a 13ª aula.

Quadro 2: Estrutura modificada dos três primeiros módulos

Momento Pedagógico	Desenvolvimento
Problematização inicial (Aula 1)	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento acerca do fenômeno a ser abordado. • Indagações aos alunos. • Execução do experimento. • Conclusão do primeiro momento.
Organização do conhecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Esclarecimentos sobre a aula anterior. • Abordagem histórica. • Leitura contextualizada.

(Aulas 2 e 3)	<ul style="list-style-type: none"> • Explicação dos modelos propostos no viés dos filósofos naturais.
Aplicação do conhecimento (Aula 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Debate acerca da construção do conhecimento científico. • Atividade final.

Essa aplicação foi realizada por ser requisito obrigatório do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Ressaltamos que não se propôs realizar uma aplicação e análise de dados detalhada, tal qual podemos observar em diversos outros trabalhos da área de ensino de ciências. Sendo assim, embora tenhamos ciência de que esse processo deve levar em conta, por exemplo, pressupostos da pesquisa qualitativa em educação (REF), não pudemos nos furtar de realizá-lo, por conta de sua obrigatoriedade. As descrições a seguir são, portanto, apenas um relato, e não uma análise de dados propriamente dita.

4.2.1. Aplicação do primeiro módulo – Propagação retilínea da luz

No início da primeira aula os alunos foram avisados de que estudariam a óptica geométrica de uma forma alternativa e que a apostila não seria completada na sequência correta, como de costume. Naquele momento eles ficaram sabendo que fariam um curso de óptica com uma abordagem histórica, e que se tratava de parte de uma pesquisa de mestrado.

Tendo sido avisados, começamos a aula. Como proposto no minicurso, na problematização inicial, fizemos algumas indagações aos alunos acerca da propagação retilínea da luz. Foram feitos os questionamentos.

A luz se propaga em linha reta. Essa afirmação é verdadeira ou falsa?

É possível perceber que a luz se propaga em linha reta?

É possível explicar por que a luz se propaga em linha reta?

Depois de ouvir as mais variadas respostas, separamos os alunos em grupos de quatro pessoas e distribuimos os kits, representados na figura 4.1, para cada um dos grupos. Os kits experimentais continham: lanterna, ponteira laser, espelhos

planos, transferidores, réguas, pequenos obstáculos, lápis, papel, anteparos e fita adesiva. Com os kits em mãos, orientamos esses alunos a explorar os materiais da forma como quisessem. Quando achamos que os alunos já estavam mais familiarizados com o material, pedimos que utilizassem aqueles instrumentos para encontrar uma maneira de demonstrar a propagação retilínea da luz. Logo na sequência, distribuímos uma folha de sulfite em branco para cada grupo e pedimos que explicassem por meio de esquemas e texto como o experimento deles indicava a propagação retilínea. Ao final recolhemos a atividade. Essa primeira etapa da aplicação foi concluída em uma aula de 50 minutos.



Figura 4.1: Kit experimental utilizado no primeiro módulo.

Os alunos foram criativos e conseguiram encontrar meios alternativos de demonstrar a propagação retilínea. Como exemplo, um dos grupos perguntou se podia usar um outro instrumento que não estivesse presente no kit. Depois de receber uma resposta afirmativa, um aluno foi até a lousa, pegou o apagador e começou a bater para levantar pó de giz, enquanto outro disparou a ponteira laser na poeira de giz. Assim, pudemos ver um feixe de luz propagando-se em meio ao pó. Após fazer uma breve análise dos comentários feitos pelos alunos na atividade recolhida, percebemos que a noção de propagação retilínea para eles era meio intuitiva, algo que eles encaravam com bastante obviedade.

Na próxima aula de aplicação, o segundo momento, iniciamos comentando algumas implicações da propagação retilínea. Falamos sobre a formação de sombra e penumbra, e fizemos um desenho na lousa relacionando-os com a formação do

eclipse solar. Também comentamos sobre um instrumento óptico muito presente no cotidiano deles, a câmera fotográfica, e mostramos na lousa a construção da imagem de uma câmara escura, bem como a equação que relaciona o tamanho da imagem e do objeto, como representado na figura 4.2.

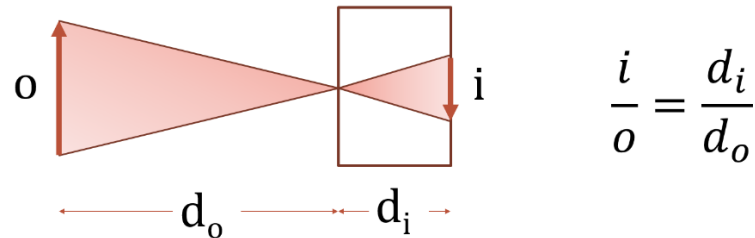


Figura 4.2: Relação entre tamanho da imagem e objeto para câmara escura.

Feito isso, convidamos os alunos a verem como outras pessoas já explicaram esse fenômeno. Para isso, apresentamos a biografia de Descartes, Huygens e Newton, com o intuito de contextualizar os estudantes, fazer com que entendessem um pouco do momento em que viveram e fizeram seus estudos, e sobre suas principais concepções acerca da natureza da luz. Para isso, utilizamos os *slides* que foram colocados como apêndice no produto educacional, mais precisamente a parte 1 do apêndice A.

Em seguida, distribuímos aos alunos os três textos que estão contidos no apêndice B do produto, os trechos das fontes primárias de Descartes, Huygens e Newton, a fim de procedermos à Leitura Contextualizada. A partir daí disponibilizamos alguns minutos para que lessem e discutissem o conteúdo da leitura entre eles, cerca de 30 minutos. Logo após, guiamos uma discussão acerca da forma como esses cientistas explicaram a propagação retilínea, como intitulamos nesse trabalho, e fizemos a chamada leitura contextualizada com os alunos. Assim, fomos discutindo trecho a trecho, explicitando as ideias contidas nas entrelinhas e “traduzindo”, muitas vezes, o vocabulário utilizado nas fontes primárias. Como apoio utilizamos, também, os *slides* que estão na parte 2 do apêndice A. Um guia detalhado de como o professor pode fazer a leitura contextualizada para esse módulo, encontra-se no apêndice C do minicurso. A aplicação dessa etapa foi feita em uma aula dupla de 50 minutos.

Com isso, encerramos as atividades do dia. A participação, como um todo, dos alunos durante a leitura contextualizada foi discreta. Muitos alunos, tímidos, mais

ouviram ou concordaram com os pontos levantados na discussão do que participaram. Mas, os poucos que participaram fizeram alguns comentários interessantes. Um aluno, por exemplo, ao ver no *datashow* a imagem do galho torto de Descartes, rapidamente associou com a analogia do cego com a bengala que havia sido citada anteriormente, e perguntou, com ar piadista, se aquela era a mesma bengala do cego. Achamos interessante a rápida comparação feita pelo aluno, pois demonstrou que ele assimilou a ideia da propagação da luz para Descartes.

Na aula seguinte, demos início ao terceiro momento, a aplicação do conhecimento. Começamos a aula levantando uma pequena discussão acerca da construção do conhecimento científico, reforçando a importância histórica que cada um daqueles modelos teve para a Ciência. Reforçamos que tanto os raios de luz de Newton, quanto a analogia da bengala de Descartes, assim como o princípio de Huygens davam conta de explicar a propagação retilínea da luz, e foram peças importantes na construção do conhecimento científico.

Na sequência, disponibilizamos a atividade final para concretizar a aplicação do conhecimento. A atividade proposta foi o questionário mostrado na sequência. Como não dispúnhamos de tempo para a apresentação dos experimentos, o questionário foi disponibilizado para os alunos via *Google Forms*¹⁰. Dessa forma, ficou combinado que eles executariam essa última atividade em casa. Ao longo da semana, recebemos as respostas do questionário e as imagens dos experimentos propostos por eles.

1. Responda as questões:

- a) Descreva resumidamente como Descartes, Huygens e Newton explicam a propagação retilínea da luz.
- b) Lendo as três descrições sobre a propagação retilínea da luz, qual delas parece mais coerente? Explique.
- c) Pesquise e realize um experimento de câmara escura, e utilize seus conhecimentos acerca da propagação retilínea da luz para calcular o diâmetro aproximado do Sol.

¹⁰ Google Forms é uma ferramenta para criação de formulários e questionários online.

Essa aula acabou sendo mais rápida que as demais, então utilizamos seus minutos finais para resolver os principais exercícios dos módulos 1, 2 e 3 do caderno dos alunos, que ainda não havia sido preenchido.

4.2.2. Aplicação do segundo módulo – Reflexão da luz

Começamos a aula com a problematização inicial, fazendo algumas indagações aos alunos acerca da reflexão da luz. As seguintes perguntas foram feitas.

Na reflexão a luz bate e volta? Isso sempre acontece?

E se a luz atravessasse o objeto, seria reflexão?

Se a luz incidir com uma inclinação bem rente à superfície, ela poderia sair na vertical, após a reflexão?

Existe alguma relação entre o ângulo de incidência e o de reflexão?

É possível medir esses ângulos?

Depois de ouvir as mais variadas respostas, separamos os alunos em grupos de quatro pessoas e distribuímos os kits (figura 4.3) para cada um dos grupos. Os kits experimentais, em suma, foram praticamente os mesmos utilizados no primeiro módulo do curso. Com os instrumentos em mãos, orientamos esses alunos a explorar os materiais da forma como quisessem. Quando achamos que os alunos já estavam mais familiarizados com o material, pedimos que utilizassem aqueles instrumentos para encontrar alguma relação entre os ângulos de incidência e reflexão. Logo na sequência, distribuímos uma folha de sulfite em branco para cada grupo e pedimos que explicassem a relação encontrada por meio de esquemas e texto. Ao final recolhemos a atividade. Essa primeira etapa da aplicação foi concluída em uma aula de 50 minutos.



Figura 4.3: Kit experimental utilizado no segundo módulo.

Os alunos corresponderam às expectativas. Um experimento que chamou a atenção foi o de um aluno que colocou um espelho sobre a mesa, apoiou alguns cadernos de um lado, pediu que um amigo segurasse uma folha de papel na posição vertical e, então, com a mão em cima dos cadernos, mirou o laser no espelho. Logo que o pontinho vermelho do laser despontou no papel branco, o amigo marcou aquela posição com o lápis. Daí pegaram a régua, mediram a altura do pontinho marcado no papel, mediram a altura dos cadernos e constataram que eram muito próximas, a partir disso concluíram que os ângulos eram iguais.

Na aula seguinte, o segundo momento pedagógico, distribuímos alguns espelhos planos para os alunos e falamos sobre objeto e imagem. Além disso, exploramos como se dá a construção de imagens em espelhos planos e as suas características, discutindo a natureza, orientação, tamanho e posicionamento das imagens conjugadas e o campo visual do espelho. Nesse ponto utilizamos o quadro para auxiliar na construção das imagens.

Logo após, convidamos os alunos a ver como outras pessoas já pensaram sobre a reflexão. Assim, distribuímos aos alunos os três textos que estão contidos no apêndice D do produto, os trechos das fontes primárias de Descartes, Huygens e Newton, a fim de procedermos à Leitura Contextualizada. A partir daí disponibilizamos alguns minutos para que lessem e discutissem o conteúdo da leitura entre eles, cerca de 30 minutos. Em seguida, guiamos uma discussão acerca do modelo que esses filósofos naturais utilizaram para explicar a reflexão da luz. Assim, fomos esmiuçando

as fontes primárias e ajudando os alunos a compreenderem melhor os textos. Assim como feito no primeiro módulo, como apoio, utilizamos os *slides* que estão na parte 3 do apêndice A. Um guia detalhado de como o professor pode fazer a leitura contextualizada para esse módulo, encontra-se no apêndice E do minicurso. A aplicação dessa etapa foi feita em uma aula dupla de 50 minutos.

Com isso, encerramos as atividades do dia. A participação dos alunos na discussão não foi muito expressiva, mas comparada a do primeiro módulo, foi melhor. Aos poucos os alunos estão perdendo a timidez e se arriscando mais em participar da aula. Duas perguntas interessantes surgiram, primeiro um aluno perguntou se para Descartes a velocidade era um vetor. Posteriormente, outro aluno perguntou se a força reflexiva de Newton era de origem magnética.

Na próxima aula, demos início ao terceiro momento, a aplicação do conhecimento. Começamos a aula levantando uma pequena discussão acerca da construção do conhecimento científico, reforçando a importância histórica que cada um daqueles modelos tiveram para a Ciência. A ideia é mostrar que qualquer um dos três dá conta de explicar de forma satisfatória a reflexão da luz, apesar de cada qual possuir suas peculiaridades ou limitações, todos foram igualmente importantes para o desenvolvimento científico.

Na sequência, disponibilizamos a atividade final para concretizar a aplicação do conhecimento. A atividade proposta foi o questionário mostrado a seguir. Como no módulo anterior, o questionário foi disponibilizado para os alunos via *Google Forms*. Dessa forma, ficou combinado que eles executariam essa última atividade em casa. Ao longo da semana, recebemos as respostas do questionário e as imagens dos experimentos propostos por eles.

1. Responda as questões:

- a) Descreva resumidamente como Descartes, Huygens e Newton explicam a reflexão da luz.
- b) Lendo as três descrições sobre a reflexão da luz, qual delas parece mais coerente? Explique.
- c) Pesquise e construa um periscópio. Agora utilize seus conhecimentos acerca da reflexão da luz para explicar o funcionamento desse instrumento. Faça uso de esquemas e textos.

Essa aula acabou sendo mais rápida que as demais, então utilizamos seus minutos finais para resolver os principais exercícios dos módulos 4, 5, 6, 7 e 8 do caderno dos alunos.

4.2.3. Aplicação do terceiro módulo – Refração da luz

Começamos a aula com a problematização inicial. Primeiro fizemos um simples experimento de demonstração, um bastão que, imerso na glicerina, parece ser invisível. Depois disso, fizemos algumas indagações aos alunos acerca da refração da luz. Perguntamos:

A luz ao bater numa superfície é capaz de atravessá-la?

A velocidade de propagação da luz é a mesma qualquer que seja o meio em que se propaga?

A luz sofre algum desvio ao mudar seu meio de propagação?

Por que não podemos enxergar o bastão de vidro quando ele fica imerso na glicerina?

Depois de ouvir as mais variadas respostas, separamos os alunos em grupos de quatro pessoas e distribuimos os kits (figura 4.4) para cada um dos grupos. Os kits experimentais, em suma, foram praticamente os mesmos utilizados nos módulos anteriores, com alguns materiais no lugar de outros. Com os instrumentos em mãos, como antes, deixamos os alunos a vontade por um tempo. Posteriormente, comentamos que um pouco de tinta guache branca, diluída na água, facilitaria a visão dos raios de luz, e então, pedimos que averiguassem se a luz sofria ou não algum desvio quando entrava na água. Logo na sequência, distribuimos uma folha de sulfite em branco para cada grupo e pedimos que comentassem se a luz sofria algum desvio, e se, nesse desvio, o ângulo de refração era maior ou menor que o de incidência. Ao final recolhemos a atividade. Essa primeira etapa da aplicação foi concluída em uma aula de 50 minutos.



Figura 4.4: Kit experimental utilizado no terceiro módulo.

Os alunos não tiveram dificuldade em constatar que a luz sofria desvio, a maior dificuldade que eles encontraram foi perceber se o ângulo estava maior ou menor, pois estavam tentando analisar sem referência. Depois deles muito quebrarem a cabeça, demos a dica de fixar uma reta vertical no ponto de incidência da luz. A partir daí não tiveram problemas em perceber que o feixe luminoso se aproximava da reta normal.

Na aula seguinte, o segundo momento pedagógico, iniciamos retomando os questionamentos realizados na aula anterior. Reforçando que na refração a velocidade da luz muda, obrigatoriamente. A partir daí, discutimos o motivo pelo qual o bastão de vidro ficou invisível dentro da glicerina, acrescentando que o desvio dos raios de luz, além do ângulo de incidência, depende da velocidade de propagação da luz no meio. Aproveitamos esse momento para estender a discussão e falar sobre a posição aparente de imagens no dióptro plano, para isso utilizamos um experimento demonstrativo bem simples, colocamos uma moeda no fundo de um copo. Em seguida fizemos, na lousa, os desenhos que representam as trajetórias dos raios de luz.

A seguir, convidamos os alunos a ver como outras pessoas já pensaram sobre a refração. Assim, distribuímos aos alunos os três textos que estão contidos no apêndice F do produto, os trechos das fontes primárias de Descartes, Huygens e Newton. A partir daí disponibilizamos alguns minutos para que lessem e discutissem o conteúdo da leitura entre eles, cerca de 30 minutos. Em seguida, guiamos uma

discussão acerca do modelo que esses filósofos naturais utilizaram para explicar a refração da luz através da leitura contextualizada. Dessa forma ajudamos os alunos a compreender melhor os textos. Assim como nos módulos anteriores, utilizamos os *slides* que estão na parte 4 do apêndice A. Um guia detalhado de como o professor pode fazer a leitura contextualizada para esse módulo, encontra-se no apêndice G do minicurso. A aplicação dessa etapa foi feita em uma aula dupla de 50 minutos.

Com isso, encerramos as atividades do dia. Nesse terceiro módulo a participação dos alunos também foi modesta. A melhor colocação que tivemos, muito boa, diga-se de passagem, foi a do mesmo aluno que perguntou se a força reflexiva era magnética no módulo anterior. Nesse módulo, ele perguntou se a única coisa que diferenciava a reflexão da refração no modelo de Newton era o fato de a força ser repulsiva ou atrativa.

Na aula seguinte, demos início ao terceiro momento, a aplicação do conhecimento. Como de praxe, iniciamos a aula com a discussão acerca da construção do conhecimento científico, reforçando a importância histórica que todos os modelos vistos por nós tiveram para a Ciência. Independente da complexidade ou simplicidade dos modelos estudados, todos foram capazes de explicar a lei da refração.

Na sequência, disponibilizamos a atividade final para concretizar a aplicação do conhecimento. A atividade proposta foi o questionário mostrado na sequência. Como no módulo anterior, o questionário foi disponibilizado para os alunos via *Google Forms*. Dessa forma, ficou combinado que eles executariam essa última atividade em casa. Ao longo da semana, recebemos as respostas do questionário e as imagens dos experimentos propostos por eles.

1. Responda as questões:

- a) Descreva resumidamente como Descartes, Huygens e Newton explicam a refração da luz.
- b) Lendo as três descrições sobre a refração da luz, qual delas parece mais coerente? Explique.

- c) Uma das formas de escrever a lei da refração, hoje chamada de Snell-Descartes, está mostrada a seguir:

$$\frac{\text{sen}\theta_{\text{incidência}}}{\text{sen}\theta_{\text{refração}}} = \frac{V_{\text{meio 1}}}{V_{\text{meio 2}}}$$

Pesquise, construa um experimento e calcule a velocidade de propagação da luz na água. Se necessário, utilize: $v_{\text{ar}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Assim como nos módulos anteriores, essa aula acabou sendo mais rápida que as demais, então utilizamos seus minutos finais para resolver os principais exercícios dos módulos 13, 14, e 15 do caderno dos alunos.

4.2.4. Aplicação do quarto módulo – Natureza da Ciência

A última aula do curso foi dedicada à discussão sobre Natureza da Ciência. Ao longo dos três primeiros módulos, comentamos sobre a importância dos diferentes modelos e teorias para a construção do conhecimento científico. Mostramos que os modelos explicativos dos três filósofos naturais a respeito dos fenômenos estudados tiveram grande importância nesse processo. Mesmo com concepções, considerações e ideias completamente diferentes, eles foram capazes de explicar aquilo a que se propuseram. A partir daí, ressaltamos que não existe um modelo certo ou errado, existem apenas modelos diferentes.

Nessa aula, em especial, tecemos a discussão da construção do conhecimento científico em cima de dois aspectos consensuais da NdC. Para isso, primeiro pedimos que os alunos formassem um círculo. Posteriormente, iniciamos o debate, baseado em alguns aspectos consensuais, perguntando aos alunos se eles achavam que a Ciência vivia uma constante transformação.

Muito tímidos, no início, foram apenas acenando positivamente com a cabeça dizendo que sim, que ela vivia uma constante transformação. Não considerando essa manifestação suficiente, resolvemos apontar alguns alunos e perguntar por que eles tinham essa ideia. A partir daí, ouvimos alguns comentários interessantes e fizemos uma boa discussão em cima deles.

Um aluno, por exemplo, afirmou que a Ciência vive uma constante evolução. Perguntamos o que ele queria dizer com evolução, então ele respondeu dizendo que as teorias se tornavam melhores com o passar do tempo. Afirmamos que o modelo mais usual da luz para a maioria dos fenômenos, hoje, é ondulatório, e perguntamos qual modelo dos que estudamos se aproximava mais de um modelo ondulatório. Sem pestanejar, o aluno respondeu que era o de Huygens. Aí questionamos o porquê de o modelo aceito na época ter sido o de Newton, que não tinha nada de ondulatório. A partir daí, emendamos que a Ciência não tem uma linearidade, ela não necessariamente precisa convergir e ela não evolui, ela apenas muda. Depois dissemos que a ideia de evolução do aluno poderia ser melhor aplicada no contexto da tecnologia.

Depois de discutir um pouco sobre as transformações da Ciência, resolvemos lançar uma nova pergunta: existe ou será capaz de existir algum modelo científico que seja a prova de falhas? Dessa vez, os alunos acenaram a cabeça negativamente. Mas, novamente, sem se pronunciar. Então tivemos que escolher alguns alunos para perguntar por que não.

Um aluno, por exemplo, disse que não, e, justamente por isso existe a necessidade de as teorias sofrerem mudanças ao longo do tempo. Como exemplo, citou a teoria da abiogênese, que acreditava que a vida surgia repentinamente nas coisas, e explicou como ela foi refutada. Então, descreveu o experimento feito na época que ajudou a rejeitar essa teoria, o experimento consistia em colocar um pedaço de carne em um vidro coberto e outro aberto, para comparação, e esperar alguns dias. Ao final da experiência, perceberam que as larvas apareceram somente no vidro aberto. Segundo o aluno, esse resultado encontrou uma falha no modelo. Achamos a resposta dele bem interessante, pois ele foi capaz de extrapolar a barreira da Física, enxergando exemplos em outras áreas do conhecimento.

Elogiamos o comparativo do aluno, e posteriormente, reforçamos com um exemplo relacionado à Física. Então, chamamos a atenção dos alunos e questionamos: “Vamos pensar em outro exemplo, vocês viram que todos os modelos que estudamos para a lei da refração eram funcionais, certo?”

“Newton e Descartes chegaram a um mesmo resultado para a razão da lei dos senos, certo? A funcionalidade desse resultado era incontestável, no entanto, na época em que eles chegaram a esse resultado, não havia uma forma precisa para se

medir a velocidade da luz. Então, sem ter conhecimento do valor dessa velocidade, construíram seus modelos levando em consideração que a velocidade da luz era maior nos meios mais densos. A partir dali os modelos de refração foram utilizados normalmente e condiziam com os resultados experimentais. Somente depois de 1850, com os trabalhos experimentais de Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) que se conseguiu perceber que a velocidade da luz era menor nos meios menos densos. Isso nos mostra que o modelo deles era passível de falhas, nenhum modelo é a prova de falhas, mesmo que funcione.”

Quando pensamos em discutir a NdC, não pensamos em discutir se um modelo está certo ou errado, se ele é bom ou ruim. Discutimos a importância que cada um deles teve na construção do conhecimento científico. A História nos mostra que às vezes algum modelo ou alguma teoria se sobrepuseram em relação ao outro. É natural que isso ocorra, e a razão para que isso aconteça pode estar relacionada a vários fatores.

Com isso, encerramos a aula e finalizamos o nosso minicurso. Esperamos que, depois dessas discussões, os alunos sejam capazes de ter um olhar mais crítico para a Ciência, e que entendam que a Ciência não é construída de forma linear, não necessita ser convergente e também não é a prova de falhas. Entender esses aspectos, significa entender melhor a Natureza da Ciência.

CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolvimento dessa proposta, discutimos a implementação de métodos alternativos que pudessem tornar um curso de óptica geométrica mais interessante para o aluno, menos carregado de formalismo geométrico, símbolos e equações. Para tal, utilizamos a História da Ciência e a experimentação como bases para tornar o aluno sujeito de sua aprendizagem e fomentar uma discussão sobre a Natureza da Ciência.

A História da Ciência não deve ser utilizada apenas como curiosidade ou como “boxes” em livros com mensagens do tipo “você sabia?”. A sua utilização pode ir muito além, em nosso caso, com a Leitura Contextualizada, serviu de alicerce para discussões acerca da construção do conhecimento científico. Entender um pouco da vida dos cientistas, como eles pensavam, que a Ciência é construída por humanos e

que não é a prova de falhas, faz com que os estudantes desenvolvam um pensamento mais crítico e entendam melhor a Natureza da Ciência.

Além disso, utilizamos a experimentação investigativa com o intuito de delegar ao aluno um papel ativo em sua própria aprendizagem. Esse método favorece uma relação dialógica entre professor e aluno e estimula os estudantes a utilizarem seus conhecimentos prévios para resolver o problema proposto, sedimentando as bases para uma nova percepção sobre o assunto. Esse processo faz com que o aluno se torne sujeito de sua aprendizagem e também o ajuda a desenvolver um olhar mais criterioso para as coisas ao seu redor.

Portanto, é de extrema importância que utilizemos a História da Ciência junto com a experimentação investigativa para atingir resultados melhores no processo de aprendizagem. Pois utilizando-as em conjunto, é possível instigar nos estudantes uma aprendizagem problematizadora e crítica, através de uma relação dialógica entre professor e aluno, e atribuir um peso maior ao papel do aluno nesse processo, muitas vezes pouco eficiente. Com isso, conseguimos resolver dois problemas de uma só vez, tornamos o ensino da óptica geométrica mais atraente aos olhos desses estudantes e, ao mesmo tempo, conseguimos estimular neles um pensamento mais crítico, além de uma melhor percepção acerca da Natureza da Ciência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, K. B. et al. Os Três Momentos Pedagógicos como metodologia para o ensino de Óptica no Ensino Médio: o que é necessário para enxergarmos? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 461-482, ago. 2015.

ALCANTARA, M. C. & BRAGA, M. Elementos histórico-culturais para o ensino dos instrumentos ópticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n.1, p. 109-130, abr. 2017.

AZEVEDO, M. C. P. S. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, A. M. P. (Org.). **Ensino de Ciências**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. p.19-33.

BARROS, M. A. & CARVALHO, A. M. P. A História da Ciência iluminando o ensino de visão. **Revista Ciência & Educação**, p. 83-94, 1998.

BASTOS, F. História da Ciência e pesquisa em ensino de ciências: breves considerações. In: NARDI, R. (Org.). **Questões atuais no ensino de ciências**. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2009, p. 49–58.

BOSS, S. L. B.; CALUZI, J. J.; ASSIS, A. K. T.; SOUZA FILHO, M. P. A utilização de traduções de fontes primárias na formação inicial de professores: breves considerações sobre dificuldades de leitura e entendimento. In: GATTI, S. R. T. & NARDI, R. (Orgs.). **A História e a Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências – A pesquisa e suas contribuições para a prática pedagógica em sala de aula**. São Paulo: Escrituras, 2016. p. 171-197.

BRASIL. **Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: ensino médio**. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC; SEMTEC, 2002.

CARVALHO, A. M. P.; VANNUCCHI, A. I.; BARROS, M. A.; GONÇALVES, M. E. R.; REY, R. C. **Ciências no Ensino Fundamental: o conhecimento físico**. São Paulo: Scipione, 1998.

CIBRÃO, P. V. C. **Experimentação investigativa em ensino de física para o ensino médio**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2015.

CRUZ, R. N. História e Historiografia da Ciência: considerações para pesquisa histórica em análise do comportamento. *Revista Brasileira de Terapia Comportamental e Cognitiva*, v. 8, n.2, p. 161-178, 2006.

DARRIGOL, O. **A history of optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century**. Oxford: Oxford University Press, 2012. 327p.

DARROZ, L. M.; ROSA, C. W.; GHIGGI, C. M. Método tradicional x aprendizagem significativa: investigação na ação dos professores de física. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 5, n. 1, p. 70-85, 2015.

DELIZOICOV, D. **Concepção problematizadora do ensino de ciências na educação formal**: relato e análise de uma prática educacional na Guiné Bissau. 1982. 227 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

_____. Problemas e problematizações. In: PIETROCOLA, M. (Org.). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. cap. 6, p. 125-150.

DELIZOICOV, D; ANGOTTI, J, A; Pernambuco; M, M. **Ensino de Ciências: Fundamentos e Métodos**; colaboração Antônio Fernando Gouvêa da Silva. – 4. ed.— São Paulo: Cortez, 2011- (Coleção Docência em Formação/ coordenação: Antônio Joaquim Severino, Selma Garrido Pimenta). p. 173-298.

DESCARTES, R. **O mundo ou tratado da luz; O homem**. Tradução de César Augusto Battisti (O mundo ou tratado da luz) e de Marisa Carneiro de Oliveira Franco Donatelli (O homem). Campinas: Editora Unicamp, 2009.

_____. **A dióptrica**. Discursos i, ii, iii, iv e viii, tradução de José Portugal Ramos, **Scientiæ studia**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 451-486, 2010.

_____. **O mundo ou tratado da luz**. Tradução de Érico Andrade. São Paulo: Editora Hedra, 2011.

FRANCISCO JUNIOR, Wilmo Ernesto. Uma abordagem problematizadora para o ensino de interações intermoleculares e conceitos afins. **Revista Química Nova na Escola**, nº 29, agosto, 2008.

FREIRE, P. Pedagogia do Oprimido. **Paz e Terra**, p. 57-76, São Paulo, 1996.

GIL-PÉREZ, D. Contribución de la Historia y de la Filosofía de las Ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 11, n. 2, p. 197-212, 1993.

GIL-PERÉZ, D.; MONTORO, I.F.; ALÍS, J.C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, pp. 125-153, 2001.

GUEDES, Suzana de Souza. **Experimentação no ensino de ciências: atividades problematizadas e interações dialógicas**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

HERNANDES, C. L. et al. Uma atividade experimental investigativa de roteiro aberto partindo de situações do cotidiano. **Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**, VIII encontro, 2002.

HUYGENS, C. **Tratado sobre a luz**. Tradução de Roberto de Andrade Martins. **Caderno de História e Filosofia da Ciência**, suplemento 4, p. 3-99, 1986.

KRAPAS, S.; QUEIROZ, G. R. P. C.; UZÊDA, D. O Tratado sobre a luz de Huygens: comentários. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 123-151, abr. 2011.

LEDERMAN, N.G. Student's and teacher's conceptions of the nature of science: a review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 4, pp. 331-359, 1992.

_____. Nature of Science: Past, present, and future. In: ABELL, S.; LEDERMAN, N.G. **Handbook of research in Science Education**. New York: Routledge, 2007.

MARTINS, R. A. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C.C. (Org.) **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006, p. xvii-xxx.

MARTINS, R.A. & SILVA, C.C. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4202-1 – 4202-32, 2015.

MARTINS, L.A-C.P. **Filosofia e História da Ciência no cone Sul: seleção dos trabalhos do 5º Encontro**. Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul, 2008.

_____. **Science Teaching – The Role of History and Philosophy of Science**. New York: Routhledge, 1994.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

McCOMAS, W.F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M.P. The Nature of Science in Science Education: An Introduction. **Science & Education**, v. 7, n. 6, pp. 511-532, 1998.

MELO, A. C. S. **“Transposição Didática do Modelo de Huygens: uma proposta para a física escolar”**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2010.

MONTEIRO, M. M. **Inércia e Natureza da Ciência no Ensino de Física: uma sequência didática centrada no desenvolvimento histórico do conceito de inércia**. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2014.

MOURA, B. A. **A aceitação da óptica newtoniana no século XVIII: subsídios para discutir a Natureza da Ciência no ensino**. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

_____. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p. 32-46, 2014.

_____. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 7, n. 1, p. 111-141, abr. 2016.

MOURA, B.A.; SILVA, C.C. Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? **Latin American Journal of Physics Education**, v. 2, n. 3, pp. 218-227, 2008.

_____. A teoria dos estados da luz: considerações sobre alguns papéis das hipóteses na óptica newtoniana. In: MARTINS, R.A.; SILVA, C.C.; FERREIRA, J.M.H.;

MUENCHEN, C. **Configurações curriculares mediante o enfoque CTS: desafios a serem enfrentados na EJA**. Dissertação de mestrado. Santa Maria: CE/UFSC, 2006.

MUENCHEN, C.; DELIZOICOV, D. Os três momentos pedagógicos e o contexto de produção do livro “Física”. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 20, n. 3, p. 617-638, 2014.

NEWTON, I. **Óptica**. Tradução: André K. T. Assis. São Paulo: Edusp, 1996. 296p.

_____. A Hipótese da Luz. In: COHEN, I. B. & WESTFALL, R. S. (eds.) **Newton: textos, antecedentes, comentários**. Rio de Janeiro: EdUERJ - Contraponto, 2002.

OBJETIVO. **Ciências da Natureza e suas Tecnologias**. Física, c.1, p. 97-208, 2018.

PEDUZZI, L. Q. Q. Sobre a resolução de problemas no ensino da física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.14, n.3, p. 229-253, 1997.

_____. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, M. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. cap. 7, p. 151-170.

_____. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, M. (Org.). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. cap. 7, p. 151-170.

PINTO, J. A. F.; SILVA, A. P. B.; FERREIRA, É. J. B. Laboratório desafiador e história da ciência: um relato de experiência com o experimento de Oersted. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, p. 176-196, abr. 2017.

PUMFREY, S. History of science in the National Science Curriculum: a critical review of resources and their aims. **British Journal for the History of Science**, v. 24, n. 1, p. 61-78, 1991.

RAMOS, J. P. S. Demonstração do movimento da luz no ensaio de óptica de Descartes. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 421-50, 2010.

ROSA, C. T. W. **A metacognição e as atividades experimentais no ensino de Física**. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.

ROSA, C.W. & ROSA, A. B. O ensino de ciências (Física) no Brasil: da história às novas orientações educacionais. **Revista Iberoamericana de Educación**, n. 58/2, p.1-22, 2012.

SABRA, A. I. **Theories of light from Descartes to Newton**. London: Cambridge University Press, 363p., 1981.

SHAPIRO, A. E. Kinematic optics: a study of the wave theory of light in the setenteenth century. **Archives for the History of Exact Sciences**, v. 11, p. 134-266, 1973.

_____. Huygens' 'Traite de la Lumiere' and Newton's 'Opticks': pursuing and eschewing hypothesis. **Notes and Records of the Royal Society of London**, v. 43, n. 2, p. 223-247, 1989.

_____. Newton's optics and atomism. In: COHEN, I. B.; SMITH, G. E. (Ed.). **The Cambridge Companion to Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, chap. 7, p. 227-255.

SILVA, B. V. C. **Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática**. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2010.

SILVA, G. R. História da Ciência e experimentação: perspectivas de uma abordagem para os anos iniciais do Ensino Fundamental. **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 121-132, 2013.

SOUZA, I. L. N & BORGES, F. S. A experimentação investigativa no ensino de química: Reflexões de práticas experimentais a partir do PIBID. **XI Congresso Nacional de Educação EDUCERE**, Paraná, 2013.

VANNUCCHI, A. I. **História e Filosofia da Ciência: da teoria para a sala de aula**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências – modalidade Física) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

VICENTE, I. A. Prática investigativa de ensino de física utilizando o experimento looping como recurso didático. **Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE**, v.1, cadernos PDE, Paraná, 2014.

PRODUTO EDUCACIONAL

Minicurso

Uma abordagem histórica da óptica geométrica: discutindo propagação, reflexão e refração da luz por meio de fontes primárias da História da Ciência

Daniel Ortega da Cruz

Sumário

1. Introdução.....	1
2. As fontes primárias de Descartes, Huygens e Newton.....	2
2.1. Descartes.....	2
2.2. Huygens.....	4
2.3. Newton	5
2.4. A leitura contextualizada (LC).....	6
3. Os três momentos pedagógicos.....	8
4. Experimentação Investigativa	9
5. Natureza da Ciência (NdC).....	10
6. O minicurso	11
6.1. Módulo 1 – A propagação retilínea da luz.....	12
6.1.1. 1º Momento (<i>problematização inicial</i>):.....	13
4.2.2. 2º Momento (<i>organização do conhecimento</i>):.....	14
4.2.3. 3º Momento (<i>aplicação do conhecimento</i>):	16
4.3. Módulo 2 – A reflexão da luz.....	17
4.3.1. 1º Momento (<i>problematização inicial</i>):.....	18
4.3.2. 2º Momento (<i>organização do conhecimento</i>):.....	19
4.3.3. 3º Momento (<i>aplicação do conhecimento</i>):	21
4.4. Módulo 3 – A refração da luz	22
4.4.1. 1º Momento (<i>problematização inicial</i>):.....	23

4.4.2. 2º Momento (organização do conhecimento):	24
4.4.3. 3º Momento (aplicação do conhecimento):	26
4.5. Módulo 4 – Discussão sobre NdC	27
5. Referências Bibliográficas	29
6. APÊNDICES	32
APÊNDICE A – Apresentação em slides	32
APÊNDICE B – Fontes primárias do Módulo 1	43
APÊNDICE C – Leitura contextualizada do Módulo 1 (Guia do professor)	45
APÊNDICE D – Fontes primárias do Módulo 2	50
APÊNDICE E – Leitura contextualizada do Módulo 2 (Guia do professor)	55
APÊNDICE F – Fontes primárias do Módulo 3	66
APÊNDICE G – Leitura contextualizada do Módulo 3 (Guia do professor)	71
7. ANEXOS	81
ANEXO A – Câmera “Pinhole”	82

1. Introdução

Este trabalho é o produto uma pesquisa que está inserida no programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), o qual visa a melhoria da qualificação profissional dos professores de Física de Ensino Médio, tanto no desempenho em sala de aula quanto na elaboração de técnicas e produtos para aprendizagem em Física. Temos como motivação principal ensinar a Física de maneira problematizadora, por meio do uso da História da Ciência (HC) e da experimentação. Nosso objetivo é oferecer ao professor subsídios para discutir historicamente três conceitos da óptica – propagação, reflexão e refração da luz – proporcionando uma compreensão mais abrangente deles, além de oferecer momentos para a promoção de uma postura mais crítica em relação à construção do conhecimento científico.

Tal motivação vem da percepção das grandes dificuldades que os alunos de Ensino Médio apresentam no entendimento de conceitos básicos da Ciência. Nota-se que os livros didáticos, assim como grande parte dos professores em sala de aula, não discutem como se dá a construção do conhecimento científico, e quando o fazem, em sua maioria, acabam por conduzir essa discussão de maneira distorcida, repleta de erros historiográficos.

Esse minicurso foi construído sobre quatro fundamentos centrais. O primeiro deles envolve as fontes primárias da HC. As fontes primárias compreendem, entre outras coisas, os textos originais produzidos pelos cientistas. Em nosso minicurso, utilizamos fontes primárias de três cientistas¹¹ do século XVII que estudaram a luz: René Descartes (1596-1650), Christiaan Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727). Todos os materiais utilizados já foram previamente traduzidos para o português por outros autores. Nossa intenção é aproximar essas fontes do cotidiano da sala de aula, visto que enxergamos nelas um grande potencial para ensinar conceitos básicos de propagação, reflexão e refração da luz, além de servirem como caminho para discutir a construção do conhecimento científico, ponto que discutiremos adiante. O estudo das fontes é feito pelo método de Leitura Contextualizada (LC), que propõe a divisão da fonte em trechos, com explicações sobre o conteúdo de cada um deles.

¹¹ Entendemos que o termo “cientista” não existia no século XVII, sendo mais comum “filósofo natural”. Entretanto, para facilitar, manteremos a palavra utilizada atualmente.

O segundo fundamento se refere aos “três momentos pedagógicos”, conforme proposto por Delizoicov (1982) e otimizado posteriormente. Trata-se de uma dinâmica didático-pedagógica, baseada em um processo dialógico entre professor e aluno, que permite, ao final do processo, que ambos adquiram uma melhor compreensão a respeito do tema estudado. O terceiro fundamento é a experimentação investigativa. Esse fundamento tem como intuito fazer o aluno pensar, debater e formular hipóteses, adquirindo, dessa forma, um pensamento crítico e reflexivo e o tornando sujeito de sua própria aprendizagem.

Por fim, o quarto e último fundamento é a Natureza da Ciência (NdC). A NdC diz respeito a questões inerentes à construção do conhecimento científico, tais como a não existência de um método científico universal, a relação de questões sociais e culturais no desenvolvimento das ideias científicas, o papel da imaginação dos cientistas, entre outras. Nosso minicurso propõe trabalhar com essas questões, promovendo uma visão mais ampla, adequada e crítica sobre a Ciência e o fazer científico.

Nas seções abaixo, discutimos mais detalhadamente cada um desses fundamentos. Uma descrição mais completa pode ser conferida na dissertação ligada a esse material.

2. As fontes primárias de Descartes, Huygens e Newton

2.1. Descartes

Descartes, um dos principais filósofos do Século XVII, dedicou muito de seu trabalho à óptica. René Descartes, aos 22 anos, faz sua primeira viagem para a Holanda, instalando-se em Breda, onde conheceu Isaac Beeckman (1588-1637). Depois de passar um período na Alemanha e, posteriormente, em Paris, ele retornou à República Holandesa em 1628 (VAN BUNGE, 2001). O filósofo viveu em diversas cidades desse país até 1649, muitas vezes, na companhia de Henricus Reneri (1593-1639), com quem trabalhou com lentes para câmera escura e na construção de telescópios.

Em 1637, fez a sua primeira publicação, o famoso *Discurso do método*, seguido de três tratados científicos: *A Dióptrica*, *Os Meteoros* e *A Geometria*, todos publicados conjuntamente. Neste trabalho, utilizaremos trechos da *Dióptrica*, pois é o livro que

possui os fenômenos da propagação, reflexão e refração da luz. Em 1664, sua obra *O mundo ou tratado da luz*, produzida entre os anos de 1629 e 1633, foi publicada postumamente.

Para compreender um pouco melhor a obra de Descartes faz-se necessário entender sua concepção de matéria. Embora Descartes rejeitasse o atomismo, não acreditando na existência dos átomos e nem dos espaços vazios, sua Física guardava algumas semelhanças com a proposta atomista. Ele tentou explicar todos os fenômenos observáveis por meio dos movimentos invisíveis das partículas que constituem a matéria (MARTINS; SILVA, 2015).

Em *O mundo ou tratado da luz*, ele apresentou uma discussão sobre a concepção da matéria e a divide em três elementos. O primeiro elemento, que constitui os corpos luminosos, é o mais sutil e mais penetrante de todos, suas partes são as mais diminutas e movem-se mais rápido que as dos outros corpos, de modo que nada seja capaz de pará-las. Descartes imagina que suas partículas não possuem nenhuma grossura e que ele pode ser dividido e moldado de qualquer forma, de modo que não haja lugar que esse primeiro elemento não possa penetrar e preencher completamente. O segundo elemento, que existe nos corpos transparentes e preenche todo espaço celeste, é constituído de partículas redondas e de tamanho médio. Já o terceiro elemento, que forma os corpos macroscópicos opacos, é formado de partículas maiores, irregulares e com mobilidade reduzida.

Até o período em que as obras de Descartes foram publicadas não existia qualquer estimativa precisa da velocidade da luz, de forma que a maioria dos filósofos naturais acreditavam que ela se propagava de forma instantânea, incluindo ele próprio. Para ele, não existia objeto que pudesse se movimentar com velocidade infinita, pois dessa forma o objeto seria onipresente, ou seja, estaria em vários lugares ao mesmo tempo. No entanto, do ponto de vista de Descartes, a luz não é um objeto que se movimenta, ela é uma tendência ao movimento, o que não a impede de se mover instantaneamente. Esse era um dos argumentos que ele utilizava para defender a velocidade infinita da luz.

Descartes faz uso de várias analogias para explicar os fenômenos luminosos. Para explicar a propagação da luz, por exemplo, ele a compara a uma espécie de pressão que é transmitida ao longo da matéria, uma tendência ao movimento, assim como as vibrações são transmitidas através da bengala de um cego. Posteriormente,

para justificar as leis da reflexão e refração ele compara o movimento da luz ao movimento de uma bola de tênis disparada por uma raquete, pois para ele a tendência ao movimento segue as mesmas leis que o próprio movimento dos corpos.

2.2. Huygens

Huygens começou a trabalhar com óptica logo no início de sua carreira, no ano de 1653. Em seus estudos iniciais, a natureza da luz não era o tema principal, se preocupando mais com a óptica geométrica e estudando o funcionamento de alguns instrumentos ópticos, como telescópios e microscópios. O resultado desses estudos foi agrupado em uma obra chamada de *Dioptrica*, composta por vários escritos redigidos entre 1653 e 1692. Boa parte desse material foi publicado após sua morte, em 1703, e a totalidade desses escritos foi organizada e publicada entre os séculos XIX e XX pela *Dutch Society of Sciences*.

Huygens começou a se preocupar com a natureza da luz por volta de 1676, quando percebeu que para explicar fenômenos como a reflexão e refração, precisaria pensar na concepção da luz como pulsos propagados pelo éter (BOS, 2007, p. 1220). O desfecho dessas ideias veio com a conclusão de sua principal obra *O Tratado sobre a Luz*, que ficou pronto em 1678, mas veio a ser publicado somente em 1690.

A confecção do *Tratado sobre a Luz* teve significativa influência das ideias de Descartes. A obra é dividida em seis capítulos e cada um explica um fenômeno: a propagação retilínea, a reflexão, a refração, a refração no ar, a dupla refração e a forma dos corpos para produzir a reflexão e refração. No *Tratado*, Huygens vale-se da natureza vibracional da luz para explicar esses fenômenos, em que a luz seria formada por pulsos não periódicos que se propagam no éter. Esta será a obra de Huygens que utilizaremos em nosso trabalho, em especial os capítulos I, II e III, pois estes se enquadram perfeitamente com o nosso propósito, estudar a propagação, reflexão e refração da luz.

Ao longo do *Tratado sobre a Luz*, é notável sua capacidade inventiva e habilidade ao lidar com a geometria para justificar seu modelo vibracional. Com uma analogia à propagação do som no ar e ao auxílio da geometria, Huygens desenvolveu

o que hoje chamamos de “Princípio de Huygens”¹², e dessa forma foi capaz de explicar a propagação retilínea, reflexão e refração da luz.

2.3. Newton

Newton iniciou seus estudos sobre a óptica no ano de 1664, quando ainda estudava na Universidade de Cambridge. Suas primeiras anotações foram feitas em um caderno que ele mesmo intitulou como *Quaestiones quaedam philosophicae* [Algumas questões filosóficas], e nesse caderno abordou vários tópicos, dentre eles: “Sobre as cores”, “Sobre a visão”, “Sobre a luz” etc. Nessa época, Newton estudou por conta própria vários autores, Walter Charleton (1619 – 1707), Robert Boyle (1627 – 1691), entre outros. Dessa forma, foi pela leitura de Charleton e Boyle que Newton foi levado a uma teoria corpuscular para a luz e uma teoria atômica para a matéria (MARTINS; SILVA, 2015).

Já no início de suas obras é possível perceber que Newton tende a negar a teoria vibracional e adotar uma teoria corpuscular para a natureza da luz. Em um dos tópicos de seu caderno de anotações, intitulado “Sobre a luz”, Newton registrou algumas críticas à teoria cartesiana para a propagação da luz. Como já mencionado, Descartes supunha que a luz era uma pressão ou tendência ao movimento. Newton argumentou que “a luz não pode ocorrer por pressão, pois, nesse caso, enxergaríamos tão bem ou melhor à noite do que de dia” (NEWTON, 2002, p. 28). É importante ressaltar que apesar de termos o conhecimento de que Newton se apoiava em uma teoria corpuscular para a luz, ele sempre foi cauteloso e nunca a defendeu abertamente.

Em 1672, Newton publicou o artigo que tornou seus estudos sobre a luz conhecidos, a “Nova teoria sobre luz e cores”. Seu artigo tratava da refrangibilidade e da composição da luz branca. Em seus famosos experimentos com prismas, Newton defendeu a ideia de que a luz branca era uma mistura heterogênea de raios e que o prisma apenas a separava. Na época, esse artigo provocou muitas críticas e comentários de filósofos naturais importantes, tais como Robert Hooke (1635-1703) e Huygens, pois sua proposta contrapunha o que era aceito na época sobre a luz branca

¹² Mais detalhes podem ser encontrados na dissertação vinculada a esse trabalho.

do Sol, de que ela era uma substância simples e homogênea e que as cores eram qualidades adquiridas.

Em 1704, Newton publicou sua obra final sobre a luz e as cores, a *Óptica*. A obra foi dividida em três livros que também estão divididos em partes. Esta será a obra de Newton que utilizaremos nesse trabalho, em especial os livros I e II, que abordam os fenômenos da propagação, reflexão e refração da luz. O Livro I fala sobre a natureza heterogênea dos raios de luz e das cores dos objetos, e têm caráter bastante experimental, pois é nele que Newton inclui seus experimentos com prismas e a descrição de seu telescópio refletor. É nesse livro também que Newton discute a propagação retilínea da luz, sem muita especulação, pois para ele isso já era um fato conhecido desde a Grécia Antiga, então ele apenas utiliza isso como uma definição.

O Livro II é mais conhecido por conter estudos sobre os “anéis de Newton”, fenômeno que hoje conhecemos como interferência, mas também inclui outras discussões. Esse livro é dividido em partes, nas quais Newton faz observações, descrições dos experimentos e proposições. A parte que mais interessa para nosso trabalho encontra-se nas proposições de 8 a 10, onde Newton discute a reflexão e refração da luz supondo a existência de uma força ou poder que age à distância entre luz e matéria.

Por fim, no Livro III, Newton fala sobre a “inflexão” da luz, fenômeno que hoje conhecemos como difração, e além disso, a terceira parte contém uma série de questões em que Newton discute a natureza da luz e outros temas.

2.4. A leitura contextualizada (LC)

A História da Ciência (HC) pode ser utilizada como um excelente recurso pedagógico para ensinar qualquer disciplina com cunho científico, pois com ela é possível tornar as aulas mais desafiadoras e reflexivas, ao passo que ela permite que o aluno compreenda melhor o significado dos conceitos trabalhados em sala de aula, compreendendo melhor sua essência. A História da Ciência pode tornar a Ciência mais humana, pois nela estão inseridos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade, não estando isenta como é entendido no senso comum (MATTHEWS, 1995).

É neste âmbito que surge a ideia da leitura contextualizada (LC), pois trata-se de um recurso utilizado para facilitar o contato do aluno com a HC, mais precisamente com as fontes primárias. Essas fontes primárias, muitas vezes, têm uma leitura mais difícil que os materiais convencionais, seja pelo uso de termos que não estão presentes no vocabulário dos alunos, seja pela complexidade do raciocínio do autor. É dessa forma que a nossa LC tem como objetivo esmiuçar e explicar o conteúdo da fonte primária, direcionando os alunos às discussões acerca do tema abordado.

A LC tem uma estrutura básica e simples. A contextualização envolve relacionar, descrever e explicar o tema, a linguagem e a estrutura das fontes, ou seja, estudá-las de acordo com o contexto em que foram inseridas, de maneira que os leitores tenham subsídios conceituais para compreendê-las. Fontes cujo tema, linguagem e estrutura são mais próximos dos escritos atuais demandam menos contextualização, enquanto aquelas mais distantes exigem um esclarecimento mais profundo. Por exemplo, ao estudarmos uma fonte medieval sobre o movimento, é preciso esclarecer, o que era entendido por movimento na época, quais termos eram utilizados e quais seus significados naquele momento – *impetus*, por exemplo, não era o mesmo que *inércia*, no sentido atual do termo –, quais as motivações e expectativas de seus autores, as relações entre o conhecimento sobre o mundo natural e a filosofia, dentre outros pontos. Dessa forma, a leitura da fonte torna-se mais produtiva e os assuntos nela trabalhados mais fáceis de serem compreendidos por um público não especializado em materiais do tipo ou não familiarizados com a História e a Filosofia das Ciências.

No caso das LCs apresentadas neste minicurso, suas elaborações requereram um estudo detalhado das obras dos cientistas escolhidos – Descartes, Huygens e Newton –, bem como do contexto em que foram produzidas. Assim, foram estudados aspectos da história da óptica até o século XVII, as influências de outros pensadores sobre as ideias dos três cientistas, a relação entre eles, a aceitação e rejeição de suas teorias, dentre outros pontos. Não se pretendeu, claramente, realizar um estudo historiográfico novo, mas obter daqueles já existentes as informações necessárias para que fosse possível compreender os assuntos, termos, ideias e experimentos trabalhados por Descartes, Huygens e Newton em suas respectivas obras. Nesse sentido, há diversas obras sobre a óptica nesse período, disponíveis majoritariamente

em língua inglesa Darrigol (2012), Sabra (1981), Shapiro (1973; 1989), Moura (2008), Martins & Silva (2015), para citar algumas.

O trabalho do pesquisador com a LC de fontes primárias possui quatro momentos distintos. O primeiro momento envolve a escolha da fonte a ser trabalhada e os recortes a serem feitos. A complexidade dos temas tratados na fonte está diretamente relacionada com o nível de contextualização. O segundo momento envolve o estudo de fontes secundárias ligadas aos assuntos e autores das fontes primárias, ou seja, a leitura e análise de estudos historiográficos. O terceiro momento abrange a leitura do texto integral e sua divisão em partes, cada uma sendo contextualizada. O quarto momento implica a organização geral da leitura e a redação de uma proposta de LC com a fonte primária. No caso deste minicurso, esse trabalho já foi realizado pelo autor.

O trabalho do professor com a LC de fontes primárias possui, também, quatro momentos. No primeiro deles, o professor distribui o trecho integral da fonte primária escolhida aos alunos e fornece um tempo para leitura. No segundo momento, o professor solicita aos alunos comentários sobre os assuntos tratados no texto, buscando fazer conexões entre as diferentes impressões. No terceiro momento, o professor realiza a leitura contextualizada passo a passo do texto, explicando termos, ideias e argumentos, à luz da época. No quarto e último momento, o professor faz a síntese dos assuntos discutidos na fonte, podendo abordar questões relacionadas, tais como as de Natureza da Ciência.

3. Os três momentos pedagógicos

Utilizaremos nessa proposta um instrumento pedagógico que permita ensinar ciência de uma maneira mais problematizadora e crítica, os três momentos pedagógicos (Delizoicov, 1982). Trata-se de uma dinâmica didático-pedagógica, construída em um viés freireano de educação, baseada em um processo dialógico entre professor e aluno, que permite, ao final do processo, que ambos adquiram uma melhor compreensão a respeito do tema estudado.

Os três momentos pedagógicos são caracterizados por:

1º Momento (Problematização Inicial) – são apresentadas situações reais ou questões que fazem parte do cotidiano do aluno. Nesse momento os alunos são

estimulados a expor o que pensam a respeito das situações abordadas e o professor toma nota de seus conhecimentos prévios. A finalidade desse momento é fazer com que o aluno se defronte com suas interpretações e tente explicá-las com base nos conhecimentos que possui, ou que perceba que para compreender alguns fenômenos, muitas vezes, precisará atingir um determinado conhecimento que ele ainda não detém.

2º Momento (Organização do Conhecimento) – momento onde o professor auxilia os alunos com os conhecimentos necessários para a compreensão do fenômeno abordado na situação inicial. É o momento onde se desenvolve definições, conceitos e relações.

3º Momento (Aplicação do Conhecimento) – momento em que o professor aborda sistematicamente o conhecimento adquirido pelo aluno para analisar e interpretar tanto as situações iniciais quanto outras relacionadas com o mesmo conhecimento, que possam ser analisadas e explicadas da mesma forma.

Vale salientar que a problematização inicial representa a parte mais importante dos três momentos pedagógicos, pois se não for realizada de forma eficiente, os demais momentos e a aplicação como um todo ficarão comprometidos. Por isso, deve-se ter um cuidado especial com o primeiro momento, buscando sempre uma problematização enriquecedora e dialógica, pois ela é considerada o cerne da proposta.

Nessa proposta, em cada momento trabalhamos os seguintes elementos: Experimentação Investigativa, Leitura Contextualizada e Natureza da Ciência. Utilizaremos a Experimentação Investigativa como problematização inicial, fazendo com que o aluno utilize seus conhecimentos prévios para dar sequência ao experimento. Posteriormente, utilizaremos a Leitura Contextualizada de fontes primárias, trabalhando a História da Ciência, como organização do conhecimento para auxiliar os alunos no desenvolvimento conceitual. Por fim, na aplicação do conhecimento, faremos uso da Natureza da Ciência para que os alunos compreendam melhor como se dá a construção do conhecimento científico.

4. Experimentação Investigativa

Com o intuito de proporcionar aos alunos um maior senso crítico e torná-los sujeitos ativos de sua aprendizagem faremos uso, nesse trabalho, da Experimentação Investigativa (EI). Em uma perspectiva freireana de educação, na EI o professor é tido como uma figura mediadora do conhecimento e não apenas transmissora.

Segundo Guedes (2010), a EI tem como objetivo orientar os estudantes a pensar, debater, justificar ideias e também saber aplicar o conhecimento adquirido em diversas situações. Partindo desses pressupostos, para a experimentação ser considerada investigativa, ela deve induzir ao aluno habilidades como: curiosidade, iniciativa, criticidade, poder argumentativo, etc. Dessa forma, através dessa abordagem investigativa o aluno torna-se protagonista em seu processo de aprendizagem, desgarrando-se do papel de simples observador (GUEDES, 2010).

De acordo com Francisco Jr. (2008), a EI deve se contrapor à educação “bancária” de Paulo Freire, na qual o conhecimento é transferido de forma acrítica e apolítica, como uma doação daquele que sabe mais para aquele que sabe menos. É nesse viés que a EI deve propor uma busca incessante pelo conhecimento, despertando nos alunos um espírito crítico e reflexivo, tornando-os sujeitos de sua aprendizagem, à medida que são capazes de formular hipóteses e discutir sobre o tema (FRANCISCO JR, 2008).

Tentando ir contra o que se chama de “educação bancária”, nesse material recorreremos ao uso da EI, consoante com todos os autores citados, com o intuito de despertar nos estudantes um pensamento reflexivo e crítico, fazendo com que eles sejam sujeitos ativos de sua própria aprendizagem. Nosso intuito com o processo da experimentação é fazer com que o aluno seja capaz de utilizar seus conhecimentos prévios para formular hipóteses e criar discussões, construindo novas concepções acerca do tema abordado.

5. Natureza da Ciência (NdC)

A vontade de fazer com que alunos e professores aprendam sobre a Ciência, e não tão somente a Ciência propriamente dita, fazendo com que estes tenham uma aprendizagem acerca da natureza dos conhecimentos científicos adquiridos e de sua importância histórica, tem se mostrado presente nas últimas décadas. Pois esse tema vem fazendo parte de inúmeras pesquisas, nacionais e internacionais, de

historiadores, filósofos e educadores. Essa preocupação com o entendimento sobre a natureza dos conhecimentos científicos faz parte da complexa definição de “Natureza da Ciência”.

A Natureza da Ciência em uma visão geral, segundo Lederman (2007), é entendida como um conjunto de saberes sobre as bases epistemológicas envolvidas na construção, estabelecimento e organização do conhecimento científico, podendo abranger desde questões sobre a existência de um método científico até questões como a influência de elementos sociais, culturais, religiosos, políticos e etc. No entanto, uma explicação geral acerca da Natureza da Ciência não traz características mais detalhadas que estão por trás desse conceito.

Moura (2014) discute duas visões distintas sobre a Natureza da Ciência que vêm sendo debatidas entre os pesquisadores da área. Uma delas é o que chamamos de “aspectos consensuais” que representa uma lista de princípios claros e objetivos que estão envolvidos na construção do conhecimento científico. A outra perspectiva, fomentada pelos estudiosos que criticam a ideia dos “aspectos consensuais”, é chamada de semelhança familiar.

O entendimento acerca da NdC pode ser levado como condição indispensável para a formação de seres humanos mais críticos, por esse motivo discussões sobre a sua implementação no ensino têm sido frequentes em diversas esferas da educação. Nesse meio, a História da Ciência surge como um excelente caminho para a inserção da Natureza da Ciência no ensino, e é dessa forma que a NdC, através de seus “aspectos consensuais” será discutida neste trabalho.

Neste trabalho daremos ênfase em discutir dois aspectos da NdC, construídos a partir das discussões de vários trabalhos da literatura especializada (McCOMAS, 1998; PUMFREY, 1991 e GIL-PÉREZ, 2001): o conhecimento científico está em contínua transformação e nenhum modelo científico está à prova de falhas.

6. O minicurso

Este minicurso será dividido em quatro módulos: propagação retilínea da luz, reflexão da luz, refração da luz e NdC. Os três primeiros módulos serão trabalhados nos três momentos pedagógicos de acordo com (DELIZOICOV, 1982) e o último módulo apresenta uma discussão final acerca da NdC. O curso terá como base o material disponível nos apêndices, incluindo as leituras contextualizadas das fontes primárias. Recomenda-se para a aplicação do curso um período de 16 aulas, sendo cinco para cada fenômeno e uma para a discussão final acerca da NdC. A estrutura sugerida para os três primeiros módulos do curso é a seguinte: cada fenômeno (cinco aulas) deverá ser dividido em três fases, conforme o quadro 1 abaixo. Já o último módulo fica livre de estruturas.

Quadro 1: Estrutura para cada atividade.

Momento Pedagógico	Desenvolvimento
Problematização inicial (Aulas 1 e 2)	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento acerca do fenômeno a ser abordado. • Indagações aos alunos. • Execução do experimento (EI). • Conclusão do primeiro momento.
Organização do conhecimento (Aulas 3 e 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Esclarecimentos sobre a aula anterior. • Abordagem histórica - contato com fontes primárias (LC). • Explicação dos modelos propostos no viés dos filósofos naturais.
Aplicação do conhecimento (Aula 5)	<ul style="list-style-type: none"> • Debate acerca da construção do conhecimento científico. • Atividade final.

6.1. Módulo 1 – A propagação retilínea da luz

6.1.1. 1º Momento (problematização inicial):

Sugere-se que o professor inicie a aula fazendo um levantamento acerca da propagação da luz, fazendo algumas indagações aos alunos. Com isso espera-se que os alunos sintam-se mais familiarizados aos conceitos que serão trabalhados. Seguem algumas perguntas que o professor pode fazer:

A luz se propaga em linha reta. Essa afirmação é verdadeira ou falsa?

É possível perceber que a luz se propaga em linha reta?

É possível explicar porque a luz se propaga em linha reta?

Após ouvir as respostas dos alunos a respeito desses questionamentos, o professor deve dividi-los em pequenos grupos (sugestão: de dois a quatro alunos por grupo), apresentar uma caixa contendo alguns materiais como: lanterna, ponteira laser, espelhos planos, transferidores, régua, pequenos obstáculos, lápis, papel, anteparos (feitos de papelão) e fita adesiva; e deixar que explorem os materiais.

Figura 1: Arranjo experimental do 1º módulo.



Em seguida, o professor deve pedir que os alunos elaborem um experimento, utilizando os materiais presentes na caixa, que comprove se a luz se propaga em linha reta ou não. O professor deve, também, distribuir uma folha em branco aos grupos,

pedindo que expliquem como ocorre a propagação da luz nos experimentos feitos, por meio de esquemas e textos. Ao final desse processo o professor deve recolher a atividade.

4.2.2. 2º Momento (organização do conhecimento):

Após breve análise das anotações dos alunos, o professor deve notar se os alunos foram capazes de perceber a propagação retilínea da luz e elaborar um experimento que demonstrasse isso. Então, deve dar início à aula retomando os questionamentos realizados na aula anterior e fazendo os comentários necessários para sanar as dúvidas por parte dos alunos quanto à retilinearidade da propagação da luz. Caso algum aluno não tenha compreendido esse fenômeno, o professor deve conversar com o aluno em particular para entender sua dificuldade.

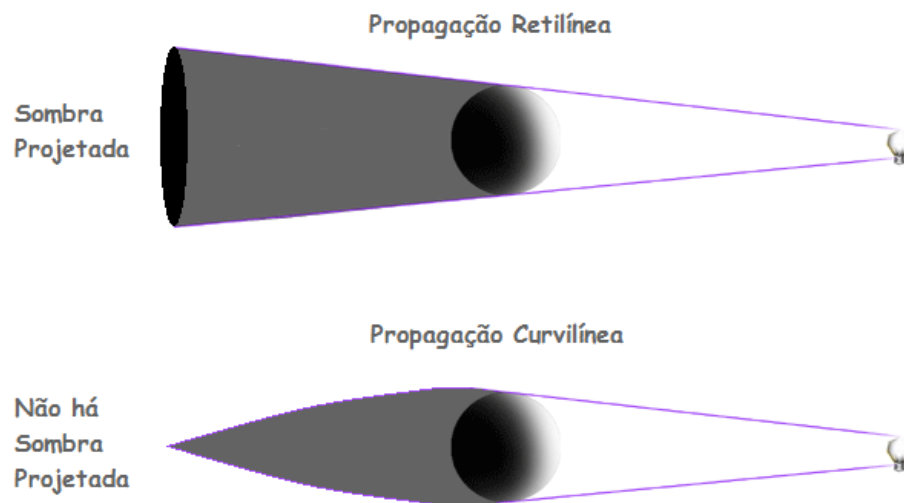
Neste ponto é interessante uma discussão sobre algumas implicações da propagação retilínea da luz. O professor pode discutir a formação de sombra e penumbra fazendo um experimento de demonstração bem simples. Com o uso de uma lanterna e da própria mão, ele pode projetar sombras e penumbras na parede, além de poder recorrer à lousa para fazer desenhos que indiquem a propagação retilínea da luz, argumentando que se a trajetória da luz fosse curvilínea não seria obrigatória a formação da sombra e da penumbra.

Figura 2: Projeção de uma sombra na parede. O formato do desenho da sombra, mantido igual ao do obstáculo serve de indício para a propagação retilínea.



Fonte: Disponível em: <<http://www.educacaodofuturo.org/rabiscos/imagens/sombras/burro.gif>>. Acesso em: 18 set. 2018.

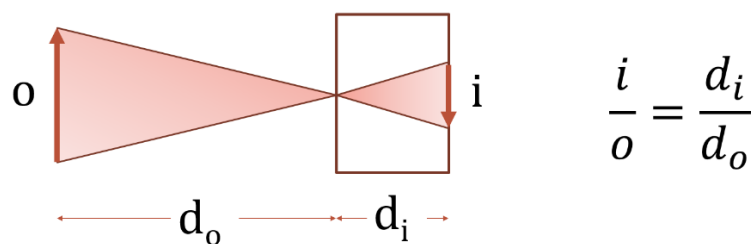
Figura 3: Propagação retilínea x propagação curvilínea (Foram feitas pequenas modificações na figura original).



Fonte: Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/optica/basico/geometrica/exemplos/>>. ADAPTADO.
Acesso em: 18 set. 2018.

Além disso, é interessante, também, que o professor faça uma discussão acerca da câmara escura, precursora da câmera fotográfica, e que demonstre no quadro a seguinte relação. Pois esse experimento é um indício da propagação retilínea da luz e além do mais a proporção entre os tamanhos da imagem e objeto é um ótimo exercício geométrico.

Figura 4: Esquema e relação de uma câmara escura.



No fim deste trabalho, no ANEXO A, há uma proposta bem interessante, a “câmara *pinhole*”, que além de demonstrar a propagação retilínea da luz, pode proporcionar bons momentos de diversão. Após essa fase, o professor deve questionar: como outras pessoas já mostraram que a luz se propaga em linha reta? A partir disso, ele deve mencionar que discutirá as ideias de três famosos cientistas do século XVII: Descartes, Huygens e Newton. Em seguida, ele deve introduzir

brevemente alguns aspectos biográficos da vida dos três, de modo a contextualizar os alunos sobre o momento em que propuseram seus trabalhos, e debater sobre suas concepções a respeito dos fenômenos luminosos que eles tinham. Sugerimos que o professor utilize o APÊNDICE A deste material, para expor essas biografias e explicar os modelos propostos. Em seguida, deve distribuir aos alunos os textos contidos no APÊNDICE B, fornecendo alguns minutos para uma leitura inicial. Logo depois, deve guiar a leitura contextualizada das fontes, de acordo com a segmentação proposta no APÊNDICE C.

Tendo sido concluída esta etapa, almeja-se que os alunos tenham “organizado” seu conhecimento, que após a explicação da situação problema e da aquisição de novos conceitos, e novas possibilidades, que eles tenham alinhado suas ideias com o que viram de novo, e espera-se que sejam capazes de aplicar esse conhecimento na próxima etapa desse módulo.

4.2.3. 3º Momento (aplicação do conhecimento):

No início dessa aula, o professor deve criar e mediar um debate em sala de aula para discutir os modelos explicativos dos três filósofos naturais a respeito da propagação retilínea da luz, levando em consideração a importância que cada um deles teve no processo de construção do conhecimento científico. O intuito é fortalecer que todos os modelos tiveram grande importância histórica para o desenvolvimento da Ciência.

A ideia é mostrar que tanto os raios de luz de Newton, quanto a analogia da bengala de Descartes, assim como o princípio de Huygens davam conta de explicar a propagação retilínea da luz, e foram peças importantes na construção do conhecimento científico. Se, em algum momento, um desses modelos prevaleceu, isso pode estar relacionado a vários motivos, tais como questões sociais, culturais e políticas ou mesmo os métodos adotados por cada um.

Após o debate, o professor deve propor uma atividade final, que deverá ser feita em casa e trazida na próxima aula, para concretizar a aplicação do conhecimento. Essa atividade consiste em um pequeno questionário e um experimento.

Atividade final

1. Responda as questões:

- a) Descreva resumidamente como Descartes, Huygens e Newton explicam a propagação retilínea da luz.
- b) Lendo as três descrições sobre a propagação retilínea da luz, qual delas parece mais coerente? Explique.
- c) Pesquise e realize um experimento de câmara escura, e utilize seus conhecimentos acerca da propagação retilínea da luz para calcular o diâmetro aproximado do Sol.

4.3.1. 1º Momento (problematização inicial):

Sugere-se que o professor inicie a aula fazendo um levantamento sobre o que os alunos sabem sobre reflexão da luz, fazendo algumas indagações. Com isso, espera-se que os alunos se sintam mais familiarizados aos conceitos que serão trabalhados. Seguem algumas perguntas.

Na reflexão a luz bate e volta? Isso sempre acontece?

E se a luz atravessasse o objeto, seria reflexão?

Se a luz incidir com uma inclinação bem rente à superfície, ela poderia sair na vertical, após a reflexão?

Existe alguma relação entre o ângulo de incidência e o de reflexão?

É possível medir esses ângulos?

Após ouvir as respostas dos alunos a respeito desses questionamentos, o professor deve dividi-los em pequenos grupos (sugestão: de dois a quatro alunos por grupo), apresentar uma caixa contendo alguns materiais como: lanterna, ponteira laser, espelhos planos, transferidores, régua, lápis, papel e fita adesiva; e deixar que explorem os materiais.

Figura 5: Arranjo experimental do 2º módulo.



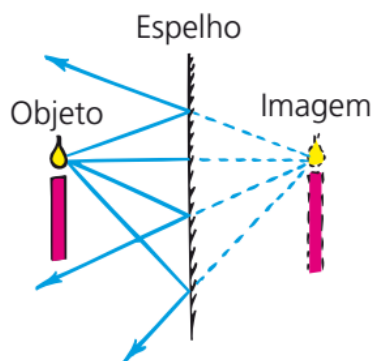
Em seguida, o professor deve pedir que os alunos elaborem um experimento, utilizando os materiais presentes na caixa, que comprove se existe alguma relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão. O professor deve, também, distribuir uma folha em branco aos grupos, pedindo que expliquem como ocorre essa relação entre os ângulos nos experimentos feitos, por meio de esquemas e textos. Ao final desse processo o professor deve recolher a atividade.

4.3.2. 2º Momento (organização do conhecimento):

Após breve análise das anotações dos alunos, o professor deve notar se os alunos foram capazes de perceber a relação entre os ângulos de incidência e reflexão, e elaborar um experimento que demonstre isso. Então, deve dar início à aula, retomando os questionamentos realizados na aula anterior e fazendo os comentários necessários para sanar as dúvidas por parte dos alunos quanto à igualdade entre esses ângulos.

Neste ponto, é interessante aproveitar que os alunos estão com fácil acesso aos espelhos planos e utilizar isso como um gancho para mostrar como se dá a construção de imagens em espelhos planos e as suas características, discutindo a natureza, orientação, tamanho e posicionamento das imagens conjugadas e o campo visual do espelho. Fazendo o uso de exemplos práticos e construções geométricas no quadro. Outra possibilidade, caso a sala de aula tenha recursos digitais, é utilizar o software GeoGebra¹³, para mostrar a simetria na reflexão através do plano cartesiano.

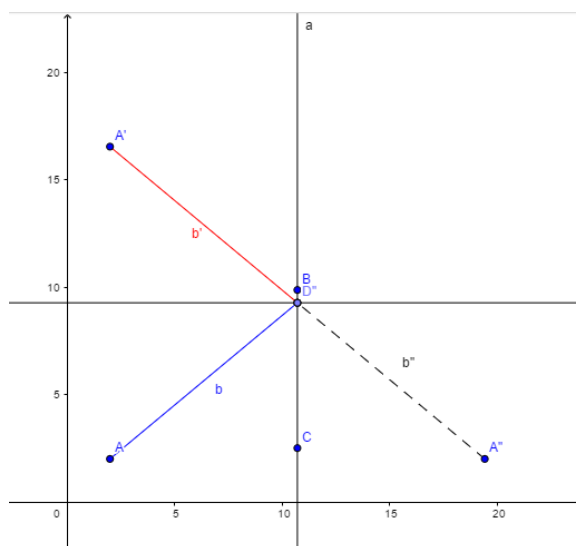
Figura 6: Imagem de um espelho plano.



Fonte: HEWITT (2015, p. 522)

¹³ GeoGebra é um aplicativo de matemática que combina conceitos de geometria e álgebra. Sua distribuição é livre, nos termos da GNU General Public License, está disponível em várias plataformas e pode ser encontrado para download no domínio: <https://www.geogebra.org/>.

Figura 7: Comportamento de um raio de luz ao incidir num espelho plano, a partir do software Geogebra.



Após essa fase, o professor deve convidar o aluno a se questionar: como outras pessoas já explicaram esse fenômeno? Neste ponto, o professor deve mostrar aos alunos como os três filósofos naturais explicavam a reflexão da luz, e de novo, para isso sugere-se utilizar o Apêndice A. Em seguida, deve distribuir aos alunos os textos contidos no APÊNDICE D, fornecendo alguns minutos para uma leitura inicial. Feito isso, deve trabalhar a leitura contextualizada das fontes, conforme descrito no APÊNDICE E.

A seguir, como já foi comentado anteriormente, o professor deve enfatizar aos alunos que o processo de construção do conhecimento científico depende de uma série de fatores, como método científico, relação entre experimento e teoria, elementos sociais, culturais, religiosos e políticos. Os alunos precisam saber que o estudo dessas questões é algo bastante complexo e que existe um campo de pesquisa que se dedica especificamente ao estudo da construção do conhecimento científico, a Natureza da Ciência, que será discutida com a devida atenção no módulo final.

Tendo sido concluída esta etapa, almeja-se que os alunos tenham “organizado” seu conhecimento, que após a explicação da situação problema e da aquisição de novos conceitos, e novas possibilidades, que eles tenham alinhado suas ideias com o que viram de novo, e espera-se que sejam capazes de aplicar esse conhecimento na próxima etapa desse módulo.

4.3.3. 3º Momento (aplicação do conhecimento):

Após discutir a reflexão da luz segundo os modelos de Descartes, Huygens e Newton. O professor deve criar e mediar um debate em sala de aula, para discutir os modelos explicativos dos três filósofos naturais a respeito da reflexão da luz, levando em consideração a importância que cada um deles teve no processo de construção do conhecimento científico.

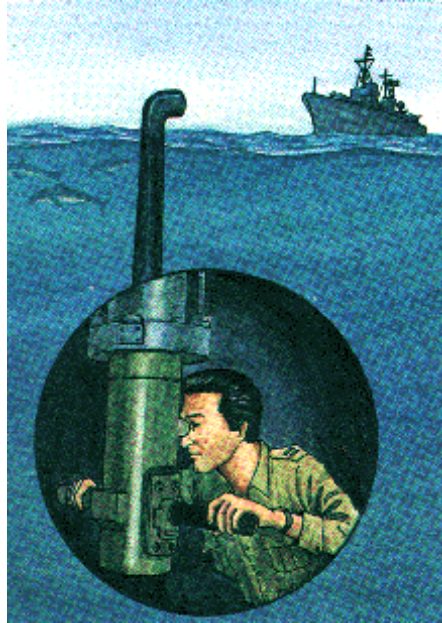
A ideia é mostrar que qualquer um dos três modelos apresentados dá conta de explicar de forma satisfatória a reflexão da luz e que, apesar de cada qual possuir suas peculiaridades, vantagens ou desvantagens, como por exemplo a geometria mais elaborada do modelo de Huygens, todos foram igualmente importantes para o desenvolvimento da Ciência.

Após o debate o professor deve propor uma atividade final, que deverá ser feita em casa e trazida na próxima aula, para concretizar a aplicação do conhecimento. Essa atividade consiste em um pequeno questionário e um experimento.

Atividade final

1. Responda as questões:
 - a) Descreva resumidamente como Descartes, Huygens e Newton explicam a reflexão da luz. Dê bastante ênfase à geometria utilizada por cada um deles.
 - b) Olhando para os três modelos, é possível perceber que o conhecimento científico não é estático e nem convergente? Explique.
 - c) Pesquise e construa um periscópio. Agora utilize seus conhecimentos acerca da reflexão da luz para explicar o funcionamento desse instrumento. Faça uso de esquemas e textos.

Figura 7: Representação de um periscópio.



Fonte: Disponível em: <<http://maspa.se/SPANSKA/ITbasica/Morfologia/figuras/Periscopio.gif>>. Acesso em: 18 set. 2018.

Figura 8: Visão de um periscópio.



Fonte: Disponível em: <https://static.gamespot.com/uploads/screen_kubrick/1534/15343359/2436932-7473726589-Steel.jpg>. Acesso em: 18 set. 2018.

4.4. Módulo 3 – A refração da luz

4.4.1. 1º Momento (problematização inicial):

Sugere-se que o professor inicie a aula fazendo um experimento simples: imergir um bastão de vidro em um recipiente transparente com glicerina. Caso o professor não disponha do material, é possível mostrar um vídeo do experimento¹⁴. E então faça um levantamento acerca do que os alunos conhecem sobre a refração da luz, fazendo algumas indagações. Com isso espera-se que os alunos se sintam mais familiarizados aos conceitos que serão trabalhados. Seguem algumas perguntas.

A luz ao bater numa superfície é capaz de atravessá-la?

A velocidade de propagação da luz é a mesma qualquer que seja o meio em que se propaga?

A luz sofre algum desvio ao mudar seu meio de propagação?

Por que não podemos enxergar o bastão de vidro quando ele fica imerso na glicerina?

Após ouvir as respostas dos alunos a respeito desses questionamentos o professor deve dividi-los em pequenos grupos (sugestão: de dois a quatro alunos por grupo), apresentar uma caixa contendo alguns materiais como: ponteira laser, transferidores, réguas, lápis, papel, fita adesiva, recipiente transparente, garrafa com água e tinta guache branca; e deixar que explorem os materiais. Ao entregar esses materiais, cabe ao professor dar a dica de que o guache branco é necessário para deixar a água turva e facilitar a visão dos raios de luz que se propagam na água.

Figura 9: Arranjo experimental do 3º módulo.

¹⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=nMkOhiDPM8o>. Acesso em XXXX



Decorrido um breve intervalo de tempo, o professor deve pedir que os alunos elaborem um experimento, utilizando os materiais presentes na caixa, que comprove se o raio de luz desvia ou não desvia na refração, e quais as condições para que isso ocorra. O professor deve, também, distribuir uma folha em branco aos grupos, pedindo que expliquem a que conclusão chegaram, e como chegaram, através de esquemas e textos. Ao final desse processo o professor deve recolher a atividade.

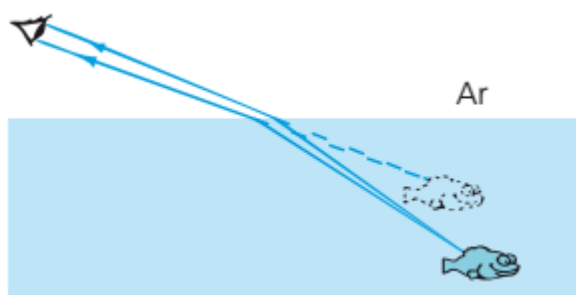
4.4.2. 2º Momento (organização do conhecimento):

Após breve análise das anotações dos alunos, o professor deve notar se os alunos foram capazes de perceber que existe uma relação entre a inclinação e o desvio na refração, e elaborar um experimento que demonstre isso. Então, deve dar início a aula retomando os questionamentos realizados na aula anterior e fazendo os comentários necessários para sanar as dúvidas por parte dos alunos quanto à importância do ângulo de incidência na refração. Partindo disso, deve discutir o motivo pelo qual o bastão de vidro ficou invisível dentro da glicerina, acrescentando que o desvio dos raios de luz, além do ângulo de incidência, depende da velocidade de propagação da luz no meio.

Neste momento, o professor deve aproveitar o gancho para comentar a respeito da posição aparente das imagens num dióptro plano, de modo qualitativo, ou seja,

sem adentrar ainda na lei dos senos. Uma opção é fazer em sala o experimento do copo com água e uma moeda no fundo¹⁵, acompanhado de um desenho representativo no quadro, para mostrar como se comportam os raios de luz na refração. Outra opção é recorrer ao exemplo do peixe, e desenhá-lo no quadro. O professor deve, também, pedir para o aluno pensar na situação inversa, no que aconteceria se o observador estivesse dentro d'água e o objeto fora dela, e, posteriormente, fazer um desenho representativo para explicar a situação.

Figura 10: Imagem aparente de um peixe após a refração.



Fonte: (HEWITT, 2015, p.528).

Após essa fase, o professor deve convidar o aluno a se questionar: como outras pessoas já explicaram esse fenômeno? Neste ponto, o professor deve mostrar aos alunos como os três filósofos naturais explicavam a refração da luz, e de novo, para isso sugere-se recorrer à apresentação em slides que se encontra no APÊNDICE A deste material. Em seguida, deve distribuir aos alunos os textos contidos no APÊNDICE F, fornecendo alguns minutos, para que façam uma leitura inicial. Feito isso, deve trabalhar a leitura contextualizada das fontes, conforme descrito no APÊNDICE G.

Pretendemos, com isso, discutir os princípios básicos das ideias dos três filósofos naturais, e também suas concepções sobre a luz, construindo a partir delas uma linha de raciocínio que nos permita entender a lei dos senos da refração. A ideia principal aqui é comparar os três modelos de refração e chegar nos mesmos resultados para a lei dos senos que cada um deles obteve. É interessante que o professor comente o que cada um deles pensava a respeito da velocidade de

¹⁵ Um exemplo desse experimento pode ser visto em: <https://www.youtube.com/watch?v=zWFrY8BpKLE>.

propagação da luz nos diferentes meios como o ar, a água, o vidro, etc., e explique como eles justificavam a diferença, se é por conta da densidade, da dureza do meio, etc. Em seguida, como de praxe, o professor deve retomar toda aquela discussão que já foi feita anteriormente acerca do processo de construção do conhecimento científico.

Tendo sido concluída esta etapa, almeja-se que os alunos tenham “organizado” seu conhecimento, que após a explicação da situação problema e da aquisição de novos conceitos, e novas possibilidades, que eles tenham alinhado suas ideias com o que viram de novo, e espera-se que sejam capazes de aplicar esse conhecimento na próxima etapa desse módulo.

4.4.3. 3º Momento (aplicação do conhecimento):

Após discutir a refração da luz segundo os modelos de Descartes, Huygens e Newton, propõe-se, no início dessa aula, criar um debate a respeito dos modelos explicativos dos três cientistas. O intuito é fortalecer a ideia de que no desenvolvimento da ciência não existe um modelo universal, e buscar fornecer aos estudantes uma visão mais crítica e adequada de como a Ciência é construída.

Deve ficar claro para o aluno que qualquer um dos três modelos apresentados dá conta de explicar de forma satisfatória a refração da luz, apesar de cada qual possuir suas peculiaridades, vantagens ou desvantagens, todos foram igualmente importantes para o desenvolvimento da Ciência.

Após o debate o professor deve propor uma atividade final, que deverá ser feita em casa e trazida na próxima aula, para concretizar a aplicação do conhecimento. Essa atividade consiste em um pequeno questionário e um experimento.

Atividade final

1. Responda as questões:

- a) Descreva resumidamente como Descartes, Huygens e Newton explicam a refração da luz. Dê bastante ênfase à geometria utilizada por cada um deles.
- b) Olhando para os três modelos, é possível perceber que o conhecimento científico não é estático e nem convergente? Explique.
- c) Uma das formas de escrever a lei da refração, hoje chamada de Snell-Descartes, está mostrada a seguir:

$$\frac{\text{sen}\theta_{\text{incidência}}}{\text{sen}\theta_{\text{refração}}} = \frac{V_{\text{meio 1}}}{V_{\text{meio 2}}}$$

Pesquise, construa um experimento e calcule a velocidade de propagação da luz na água. Se necessário, utilize: $v_{\text{ar}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

4.5. Módulo 4 – Discussão sobre NdC

Propõe-se neste trabalho, após todas as atividades, uma discussão acerca de dois aspectos consensuais da NdC, construídos a partir das discussões de vários trabalhos da literatura especializada (McCOMAS, 1998; PUMFREY, 1991 e GIL-PÉREZ, 2001): o conhecimento científico está em contínua transformação e nenhum modelo científico está à prova de falhas.

Ao longo do curso mostramos que os modelos explicativos dos três filósofos naturais a respeito dos fenômenos estudados tiveram grande importância no processo de construção do conhecimento científico. Mesmo com concepções, considerações e ideias completamente diferentes, eles deram conta de explicar aquilo a que se propuseram. Que eles deram conta do recado, nós percebemos. Agora a questão é: em algum momento eles convergiram?

Se pegarmos como exemplo a propagação da luz. Descartes entendia-a como uma espécie de pressão que era transmitida em linha reta que obedecia às leis do movimento. Newton tinha a ideia dos raios de luz como a menor parte que compõe a luz, e para ele a retilinearidade era óbvia, fato conhecido desde a Grécia Antiga. Já Huygens entendia a luz como uma vibração que se estendia ao longo de um meio, e elaborou o “princípio de Huygens” para explicá-la. Notamos que não há nada de convergente nessas ideias, e mesmo assim elas foram capazes de explicar a propagação da luz. Isso vai de total acordo com o que diz Pumfrey, o conhecimento científico não é convergente, ele é ilimitado. Existem várias possibilidades de se explicar um mesmo fenômeno.

Outro bom exemplo, Newton tenta explicar a reflexão e refração de várias formas. No início de seu trabalho ele deduz a razão entre os senos sem se preocupar muito com a natureza do fenômeno, trabalha com a obviedade retirada da observação. Posteriormente, muda um pouco a postura e tenta explicar os fenômenos lançando a ideia de uma força entre a luz e a matéria que age a longa distância. Mais adiante tenta explicar os mesmos fenômenos por meio do conceito de estados. Então, vejam como isso também vai de acordo com Pumfrey. Podemos perceber que o conhecimento científico não é estático, ele não fica sempre na mesma, ele é mutável. Um modelo ou teoria que utilizamos hoje, mesmo funcional, pode sofrer modificações ao longo do tempo.

Mesmo funcional, seria um modelo científico a prova de falhas? Newton e Descartes chegaram no mesmo resultado para a razão da lei dos senos. A

funcionalidade desse resultado era incontestável, poderia inclusive ser demonstrada experimentalmente. No entanto, na época deles, não havia como se medir a velocidade da luz, e na construção de seus modelos levaram em consideração que a velocidade da luz era maior nos meios mais densos. Somente depois de 1850, com os trabalhos experimentais de Foucault (1819-1868) que se conseguiu perceber que a velocidade da luz era menor nos meios menos densos. O que mostra que nem todo modelo científico é a prova de falhas, mesmo que funcione.

Quando pensamos em discutir a NdC, não pensamos em discutir se um modelo está certo ou errado, se ele é bom ou ruim. Discutimos a importância que cada um deles teve na construção do conhecimento científico. A História nos mostra que às vezes algum modelo ou alguma teoria se sobrepõe em relação à outra. É natural que isso ocorra, e a razão para que isso aconteça pode estar relacionada a vários fatores, como por exemplo, influências políticas, religiosas, ou de repente com a linha de raciocínio que o cientista utilizou.

5. Referências Bibliográficas

DARRIGOL, O. **A history of optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century**. Oxford: Oxford University Press, 2012. 327p.

DELIZOICOV, D. **Concepção problematizadora do ensino de ciências na educação formal**: relato e análise de uma prática educacional na Guiné Bissau. 1982. 227 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

_____. Problemas e problematizações. In: PIETROCOLA, M. (Org.). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. cap. 6, p. 125-150.

DELIZOICOV, D; ANGOTTI, J, A; Pernambuco; M, M. **Ensino de Ciências: Fundamentos e Métodos**; colaboração Antônio Fernando Gouvêa da Silva. – 4. ed.— São Paulo: Cortez, 2011- (Coleção Docência em Formação/ coordenação: Antônio Joaquim Severino, Selma Garrido Pimenta). p. 173-298.

DESCARTES, R. **O mundo ou tratado da luz; O homem**. Tradução de César Augusto Battisti (O mundo ou tratado da luz) e de Marisa Carneiro de Oliveira Franco Donatelli (O homem). Campinas: Editora Unicamp, 2009.

_____. **A dióptrica**. Discursos i, ii, iii, iv e viii, tradução de José Portugal Ramos, **Scientiæ studia**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 451-486, 2010.

_____. **O mundo ou tratado da luz**. Tradução de Érico Andrade. São Paulo: Editora Hedra, 2011.

FREIRE, P. Pedagogia do Oprimido. **Paz e Terra**, p. 57-76, São Paulo, 1996.

FRANCISCO JUNIOR, Wilmo Ernesto. Uma abordagem problematizadora para o ensino de interações intermoleculares e conceitos afins. **Revista Química Nova na Escola**, nº 29, agosto, 2008.

GIL-PERÉZ, D.; MONTORO, I.F.; ALÍS, J.C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, pp. 125-153, 2001.

GUEDES, Suzana de Souza. **Experimentação no ensino de ciências: atividades problematizadas e interações dialógicas**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

HUYGENS, C. **Tratado sobre a luz**. Tradução de Roberto de Andrade Martins. **Caderno de História e Filosofia da Ciência**, suplemento 4, p. 3-99, 1986.

LEDERMAN, N.G. Student's and teacher's conceptions of the nature of science: a review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 4, pp. 331-359, 1992.

_____. Nature of Science: Past, present, and future. In: ABELL, S.; LEDERMAN, N.G. **Handbook of research in Science Education**. New York: Routledge, 2007.

MARTINS, R.A. & SILVA, C.C. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4202-1 – 4202-32, 2015.

MATTHEWS, M. R. **Science Teaching – The Role of History and Philosophy of Science**. New York: Routledge, 1994.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

McCOMAS, W.F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M.P. The Nature of Science in Science Education: An Introduction. **Science & Education**, v. 7, n. 6, pp. 511-532, 1998.

MOURA, B. A. **A aceitação da óptica newtoniana no século XVIII: subsídios para discutir a Natureza da Ciência no ensino**. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

_____. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p. 32-46, 2014.

NEWTON, I. **Óptica**. Tradução: André K. T. Assis. São Paulo: Edusp, 1996. 296p.

_____. A Hipótese da Luz. In: COHEN, I. B. & WESTFALL, R. S. (eds.) **Newton: textos, antecedentes, comentários**. Rio de Janeiro: EdUERJ - Contraponto, 2002.

PEDUZZI, L. O. Q. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, M. (Org.). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. p. 151-170.

PUMFREY, S. History of science in the National Science Curriculum: a critical review of resources and their aims. **British Journal for the History of Science**, v. 24, n. 1, p. 61-78, 1991.

ROSA, C. T. W. **A metacognição e as atividades experimentais no ensino de Física**. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica), Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SABRA, A. I. **Theories of light from Descartes to Newton**. London: Cambridge University Press, 1981. 363p.

SHAPIRO, A. E. Kinematic optics: a study of the wave theory of light in the setenteenth century. **Archives for the History of Exact Sciences**, v. 11, p. 134-266, 1973.

_____. Huygens' 'Traite de la Lumiere' and Newton's 'Opticks': pursuing and eschewing hypothesis. **Notes and Records of the Royal Society of London**, v. 43, n. 2, p. 223-247, 1989.

_____. Newton's optics and atomism. In: COHEN, I. B.; SMITH, G. E. (Ed.). **The Cambridge Companion to Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, chap. 7, p. 227-255.

6. APÊNDICES

APÊNDICE A – Apresentação em slides

Minicurso de Óptica Geométrica

Daniel Ortega da Cruz

Sumário

1. Biografias
2. Propagação retilínea da luz
3. Reflexão da luz
4. Refração da luz

Biografia – René Descartes (1596 – 1650)



Disponível em: http://4.bp.blogspot.com/-wuaTr1qaGek/UJ-4z5zv5kI/AAAAAAAAAEgo/pHds1WHQEHl/w1200-h630-p-k-no-nu/Ren%C3%A9_Descartes.jpg

Biografia – René Descartes (1596 – 1650)

- Em 1620 começou seus estudos sobre a luz;
- Em 1637 veio a sua primeira publicação, o famoso Discurso do método, que veio seguido de três tratados científicos: A Dióptrica, Os Meteoros e A Geometria, todos publicados conjuntamente;
- Na sua concepção, a matéria é dividida em três elementos;
 - 1º elemento: é o que constitui os corpos luminosos, é o mais penetrante de todos, e suas partes são muito pequenas e movem-se muito rápido, de modo que nada seja capaz de pará-las. Além disso Descartes imagina que suas partículas não possuem nenhuma grossura e forma definida, de modo que não haja lugar que esse primeiro elemento não possa penetrar e preencher completamente.

Biografia – René Descartes (1596 – 1650)

- 2º elemento: é o que existe nos corpos transparentes e preenche todo espaço celeste. Descartes imagina essas partículas de forma redonda e de tamanho médio.
- 3º elemento: é o que forma os corpos macroscópicos opacos. Descartes imagina partículas maiores, irregulares e com mobilidade reduzida.
- Faz uso de analogias para explicar os fenômenos luminosos;
 - Explica a propagação da luz comparando-a com uma espécie de pressão que é transmitida ao longo da matéria, uma tendência ao movimento, assim como as vibrações são transmitidas através da bengala de um cego que tateia o chão.
 - Explica a reflexão e a refração da luz comparando o movimento da luz ao movimento de uma bola de tênis disparada por uma raquete, pois para ele a tendência ao movimento segue as mesmas leis que o próprio movimento dos corpos.

Biografia – Christiaan Huygens (1629 – 1695)



Disponível em: <https://www.thefamouspeople.com/profiles/images/christiaan-huygens-1.jpg>

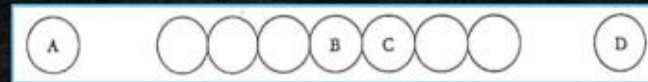
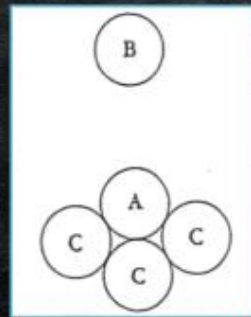
Biografia – Christiaan Huygens (1629 – 1695)

- Começou a trabalhar com óptica logo no início de sua carreira, no ano de 1653;
- Seu foco inicial não era a natureza da luz, ele se preocupava mais com a óptica geométrica e o funcionamento de alguns instrumentos ópticos;
- Começou a se preocupar com a natureza da luz por volta de 1676, quando precisou explicar a reflexão e a refração;
- O Tratado sobre a Luz, uma de suas principais obras, ficou pronto em 1678;
- Sua obra foi fortemente influenciada pelas ideias cartesianas;

Biografia – Christiaan Huygens (1629 – 1695)

- Sua obra é dividida em seis capítulos e cada um explica um fenômeno tais quais:
 - propagação retilínea;
 - reflexão, a refração;
 - refração no ar;
 - dupla refração;
 - forma dos corpos para produzir a reflexão e refração.;
- Em sua obra, Huygens, apoia-se numa teoria vibracional para a luz.

Biografia - Christiaan Huygens (1629 - 1695)



Biografia - Isaac Newton (1643 - 1727)



Disponível em: http://4.bp.blogspot.com/-wuaTrsgaGek/UJ-4z5zv5kI/AAAAAAAAAEgo/pHd11WHOEHI/w3200-h630-p-k-no-nu/Ren%C3%A7a_Descartes.jpg

Biografia – Isaac Newton (1643 – 1727)

- Iniciou seus estudos sobre a óptica no ano de 1664;
- Suas primeiras anotações foram feitas em um caderno que ele mesmo intitulou como *Quaestiones quaedam philosophicae*;
- Nesse caderno ele abordou vários tópicos, dentre eles: “Sobre as cores”, “Sobre a visão”, “Sobre a luz”, etc... ;
- Já no início de suas obras é possível perceber que Newton tende a negar a teoria vibracional e adotar uma teoria corpuscular para a natureza da luz;
- Newton faz algumas críticas à teoria cartesiana para a propagação da luz;

Propagação retilínea da luz (Descartes)

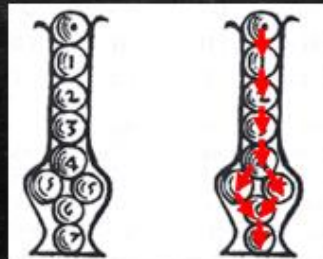


Figura 01: Modelo representativo da propagação da luz (do lado esquerdo o desenho original) (DESCARTES, 2009, p. 100).

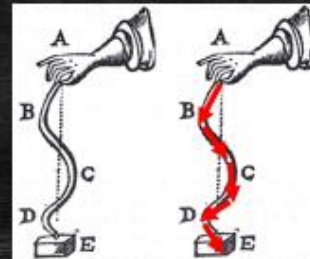


Figura 02: Modelo representativo da propagação da luz (do lado esquerdo o desenho original) (DESCARTES, 2009, p. 100).

Propagação retilínea da luz (Huygens)



Figura 03: Ondas geradas pela chama de uma vela.

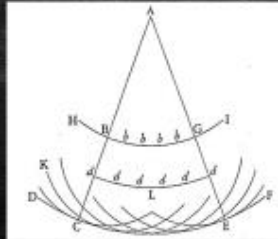


Figura 04: Modelo representativo da propagação da luz para Huygens (HUYGENS, 1986, p. 23).

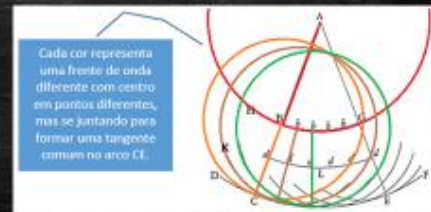


Figura 05: Representação dos pontos que o arco BG perturba criando novas frentes de onda, com centro neles, compondo uma nova frente de onda com uma tangente em comum, o arco CE.

Reflexão (Descartes)

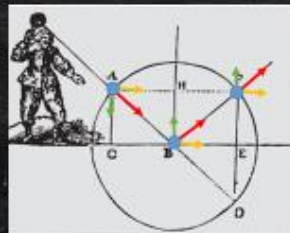


Figura 06: As setas inseridas na figura indicam as componentes do movimento.

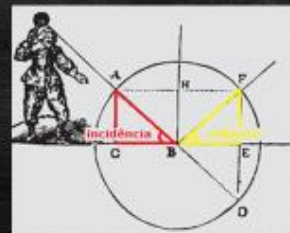


Figura 07: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão.

Reflexão (Huygens)

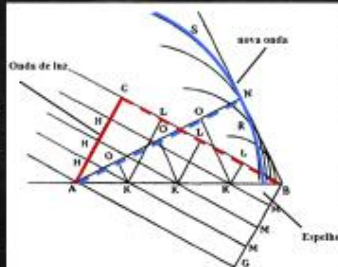


Figura 08: Representação da onda refletida.

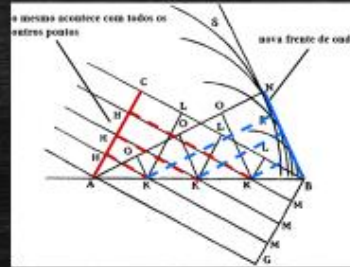


Figura 09: Representação da nova frente de onda com a tangente comum.

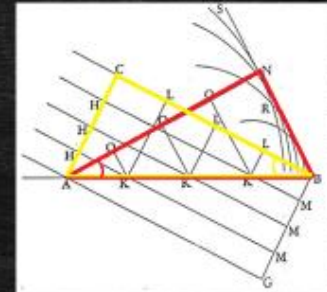


Figura 10: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão.

Reflexão (Newton)



Figura 11: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão.



Figura 12: Trajetória da reflexão de um corpo sólido comparada à trajetória dos raios de luz.

Refração (Descartes)

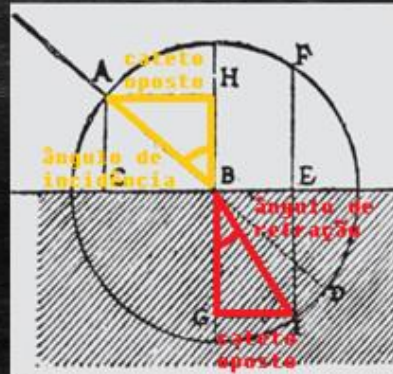


Figura 13: Estão representados os triângulos utilizados.

Refração (Huygens)

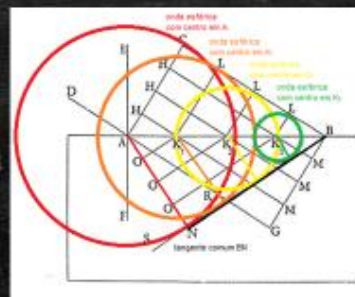


Figura 14: Representação das ondas circulares e da tangente comum do modelo de Huygens.

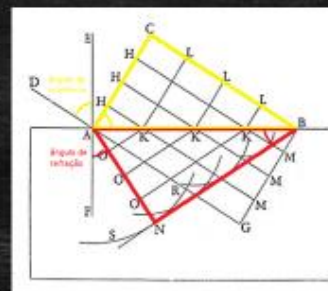


Figura 15: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração.

Refração (Newton)

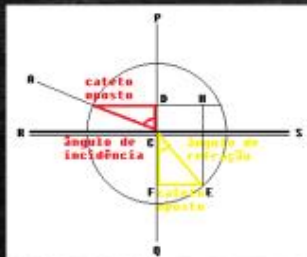


Figura 16: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração

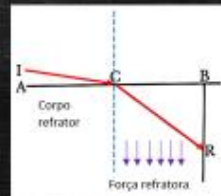


Figura 17: Raio de luz sofrendo refração e a representação da força refratora.

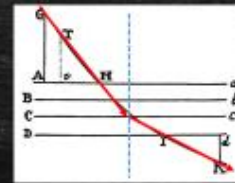


Figura 18: Trajetória da refração de um corpo sólido comparada à refração da luz.

APÊNDICE B – Fontes primárias do Módulo 1

Texto 1 (Descartes)

O trecho e as figuras que seguem foram retiradas do livro *O mundo ou tratado da luz* de Descartes, e tratam da propagação retilínea da luz. Neste excerto, Descartes vale-se de algumas analogias para explicar o fenômeno.

“No que diz respeito às linhas ao longo das quais é comunicada essa ação (propagação da luz) – e que são propriamente os raios da luz –, é preciso observar que elas diferem das partes do segundo elemento por intermédio das quais essa mesma ação se comunica e que não são nada de material no meio por onde passam, mas designam apenas em que sentido e segundo qual determinação o corpo luminoso age contra aqueles que ilumina; e, assim, não se deve deixar de concebê-las como perfeitamente retas, embora as partes do segundo elemento, que servem para transmitir essa ação, ou seja, a luz, não possam estar quase nunca tão exatamente colocadas uma sobre a outra de modo a comporem linhas totalmente retas. É desse modo que podeis facilmente conceber que a mão A empurra o corpo E segundo a linha reta AE, ainda que ela o empurre somente por meio do bastão BCD, que é torto. E é desse modo também que a bola marcada com 1 impele a que está marcada com 7 por intermédio das duas marcadas com 5 e 5, tão diretamente quanto por intermédio das outras: 2, 3, 4 e 6.” (DESCARTES, 2009, p.99-100)

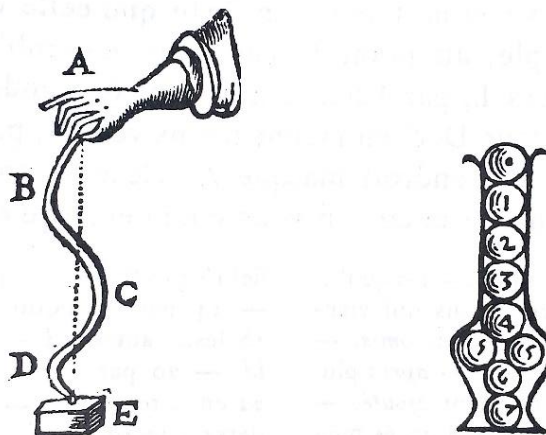


Figura 01: Modelo representativo da propagação da luz (DESCARTES, 2009, p. 100).

Texto 2 (Huygens)

Os trechos e as figuras que seguem foram retirados do livro *Tratado sobre a luz*, de Huygens, mais especificamente do capítulo I, e abordam um pouco a natureza ondulatória, de sua concepção, e a propagação retilínea da luz. Neste excerto, Huygens vale-se de algumas analogias e cria uma teoria, que hoje conhecemos como princípio de Huygens, para explicar o fenômeno.

“[...] se pode conceber que a luz se propague progressivamente por ondas esféricas, e como é possível que essa propagação se faça com uma velocidade tão grande quanto a que as experiências e observações celestes exigem. [...] Mas deve-se considerar ainda mais particularmente a origem dessas ondas e a maneira como elas se propagam. Primeiramente, segue-se daquilo que foi dito sobre a produção da luz, que cada pequeno lugar de um corpo luminoso, como o Sol, uma vela ou um carvão ardente, gera ondas cujo centro é esse lugar. Assim, na chama de uma vela, sendo distinguidos os pontos A, B e C, os círculos concêntricos descritos em torno de cada um desses pontos representam as ondas que deles provêm. E deve-se conceber o mesmo em torno de cada ponto da superfície e de uma parte interna dessa chama.” (HUYGENS, 1986, p. 20-21)

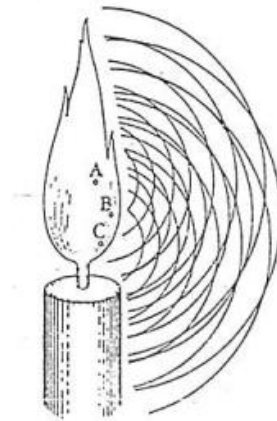


Figura 02: Representação das ondas esféricas geradas pela chama de uma vela (HUYGENS, 1986, p. 20).

“[...] cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem o ponto luminoso A por centro, propagar-se-á no arco CE, terminado pelas retas ABC, AGE. Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas pelo espaço CAE se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor, juntas, uma onda que limite o movimento na circunferência CE, que é sua tangente comum [...] as partes das ondas particulares que se propagam fora do espaço ACE são fracas demais para produzir luz”. (HUYGENS, 1986, p. 23-24)

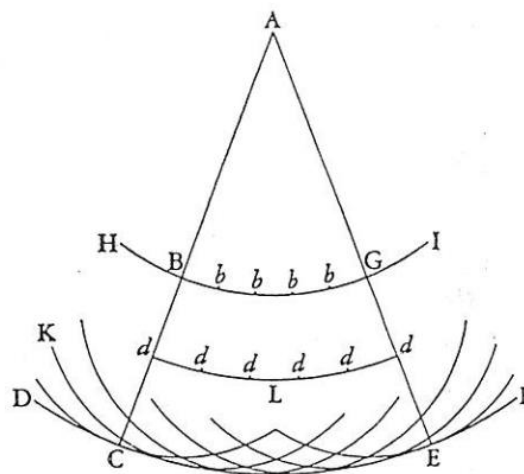


Figura 03: Modelo representativo da propagação da luz (HUYGENS, 1986, p. 23).

Texto 3 (Newton)

Os trechos abaixo foram retirados do Livro I do *Óptica* de Newton e falam sobre a propagação retilínea da luz. Nesta parte de seu trabalho, Newton faz uso de definições, e comenta a retilinearidade de forma bem concisa e direta.

Definição I

“Por raios de luz entendo as partes mínimas da luz e as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas.” (NEWTON, 1996, p. 39)

“Normalmente os matemáticos consideram os raios de luz como linhas que se estendem do corpo luminoso para o corpo iluminado, e a refração desses raios como a curvatura ou a interrupção dessas linhas quando passam de um meio para outro.” (NEWTON, 1996, p. 39)

APÊNDICE C – Leitura contextualizada do Módulo 1 (Guia do professor)

Texto 1 (Descartes)

1º trecho

No que diz respeito às linhas ao longo das quais é comunicada essa ação [propagação da luz] – e que são propriamente os raios da luz. (DESCARTES, 2009, p.207)

Neste trecho Descartes deixa claro que entende que os raios de luz são linhas pelas quais é comunicada uma ação, no caso a propagação da luz.

2º trecho

[...] é preciso observar que elas diferem das partes do segundo elemento por intermédio das quais essa mesma ação se comunica e que não são nada de material no meio por onde passam, mas designam apenas em que sentido e segundo qual determinação o corpo luminoso age contra aqueles que ilumina; (DESCARTES, 2009, p.207)

O que Descartes quer deixar claro neste trecho é que a propagação da luz não é algo material, é apenas uma ação que se propaga pelo meio por onde passa.

3º trecho

[...] as partes do segundo elemento, que servem para transmitir essa ação, ou seja, a luz, não possam estar quase nunca tão exatamente colocadas uma sobre a outra de modo a comporem linhas totalmente retas. (DESCARTES, 2009, p.207)

Neste trecho Descartes reafirma que a propagação da luz é uma ação transmitida através de um meio material, composto por partículas que não estão necessariamente todas alinhadas, mas isso não impede que a luz se propague em linha reta.

4º trecho

[...] a mão A empurra o corpo E segundo a linha reta AE, ainda que ela o empurre somente por meio do bastão BCD, que é torto. E é desse modo também que a bola marcada com 1 impele a que está marcada com 7 por intermédio das duas marcadas com 5 e 5, tão diretamente quanto por intermédio das outras: 2, 3, 4 e 6. (DESCARTES, 2009, p.207-209)

É aqui, por fim, que Descartes faz analogias, utilizando exemplos práticos, para demonstrar sua ideia. Primeiro, ele pede para que o leitor imagine um galho torto, com partículas menores em sua composição, não necessariamente alinhadas, com o qual é possível transmitir uma ação, como um empurrão por exemplo. É possível utilizar esse galho para empurrar outros objetos. Assim, Descartes imagina o empurrão como uma ação sendo transmitida através dessas partículas menores, e mesmo sendo torto, o galho consegue transmitir o empurrão em linha reta. É assim que Descartes imagina a propagação da luz através das partículas do segundo elemento, que mesmo não estando sempre perfeitamente alinhadas, são capazes de transmitir a luz em linha reta. Além do exemplo do galho, ele também faz analogia com uma urna cheia de bolinhas. Essas duas analogias são ilustradas a seguir.

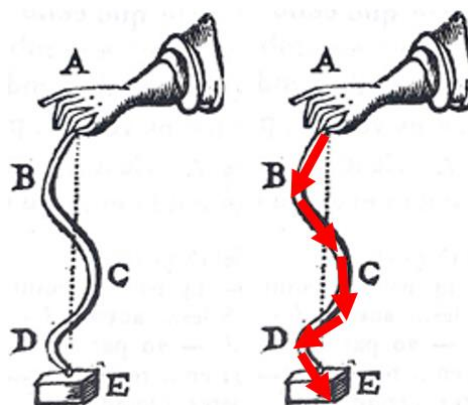


Figura 01: Modelo representativo da propagação da luz (do lado esquerdo o desenho original) (DESCARTES, 2009, p. 100, ADAPTADO).

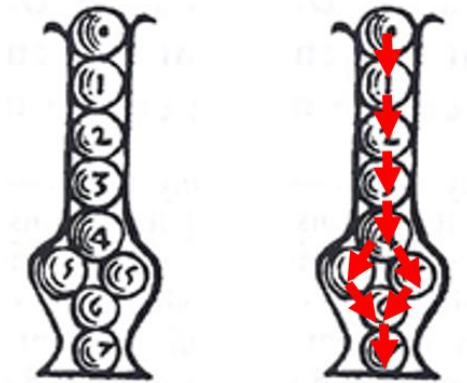


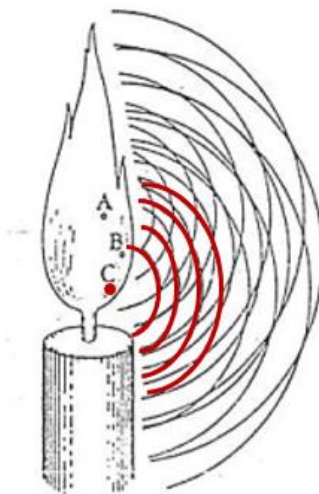
Figura 02: Modelo representativo da propagação da luz (do lado esquerdo o desenho original) (DESCARTES, 2009, p. 100, ADAPTADO).

Texto 2 (Huygens)

1º trecho

“[...] se pode conceber que a luz se propague progressivamente por ondas esféricas, e como é possível que essa propagação se faça com uma velocidade tão grande quanto a que as experiências e observações celestes exigem. [...] Mas deve-se considerar ainda mais particularmente a origem dessas ondas e a maneira como elas se propagam. Primeiramente, segue-se daquilo que foi dito sobre a produção da luz, que cada pequeno lugar de um corpo luminoso, como o Sol, uma vela ou um carvão ardente, gera ondas cujo centro é esse lugar. Assim, na chama de uma vela, sendo distinguidos os pontos A, B e C, os círculos concêntricos descritos em torno de cada um desses pontos representam as ondas que deles provêm. E deve-se conceber o mesmo em torno de cada ponto da superfície e de uma parte interna dessa chama.” (HUYGENS, 1986, p. 20-21)

Neste trecho Huygens deixa claro a ideia de que para ele, a luz a luz tem um comportamento ondulatório¹⁶, e que essas ondas são geradas a partir de diversos pontos centrais que compõem o corpo luminoso, sendo cada ponto a origem de um conjunto de ondas. A figura abaixo destaca um desses centros, no caso o ponto C, criando ondas esféricas.



¹⁶ As ondas citadas por Huygens são diferentes das ondas que conhecemos hoje, pois elas não têm frequência, comprimento de onda, entre outros elementos que caracterizam uma onda. Então, um termo mais correto seria “vibracional”, no entanto, utilizaremos “ondulatório” respeitando a tradução da obra.

Figura 03: Ondas geradas pela chama de uma vela (HUYGENS, 1986, p. 20, ADAPTADO).

2º trecho

[...] cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem o ponto luminoso A por centro, propagar-se-á no arco CE, terminado pelas retas ABC, AGE. (HUYGENS, 1986, p. 23-24)

O ponto principal para compreender a ideia de Huygens é que à medida que a luz se propaga a partir de um ponto, no caso do exemplo dele ilustrado na figura, o ponto A, ela cria uma frente de onda que vai criando novos pontos de emissão ao longo de sua propagação e esses novos pontos vão criando novas frentes de onda.

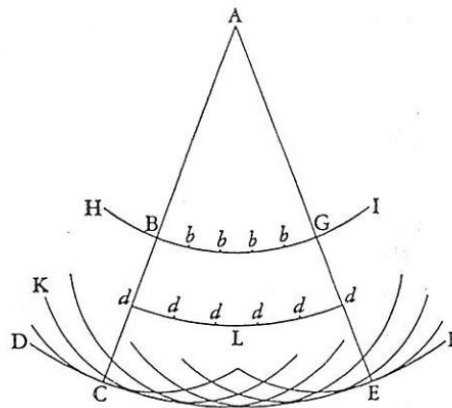


Figura 04: Modelo representativo da propagação da luz para Huygens (HUYGENS, 1986, p. 23).

No desenho apresentado por Huygens, o ponto luminoso A emite uma frente de onda, e essa frente de onda de arco de circunferência BG com centro em A se propaga perturbando novos pontos, como os pontos B e G, por exemplo. E ao serem perturbados, esses novos pontos emitirão novas frentes de onda com novos arcos de circunferência, agora com os centros em B e G, por exemplo. Os pontos representados por b no desenho também criarão novas frentes de onda, e assim por diante.

3º trecho

Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas pelo espaço CAE se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor, juntas, uma onda que limite o movimento na circunferência CE, que é sua tangente comum [...] as partes das ondas particulares que se propagam fora do espaço ACE são fracas demais para produzir luz. (HUYGENS, 1986, p. 23-24)

Neste ponto Huygens quer dizer que todas essas frentes de onda se juntam para formar uma de onda maior e mais intensa, unidas por uma tangente comum. Ainda afirma que de todas

essas ondas que se propagam pelo espaço, as que estão fora do arco CE não podem ser vistas, pois não possuem intensidade suficiente.

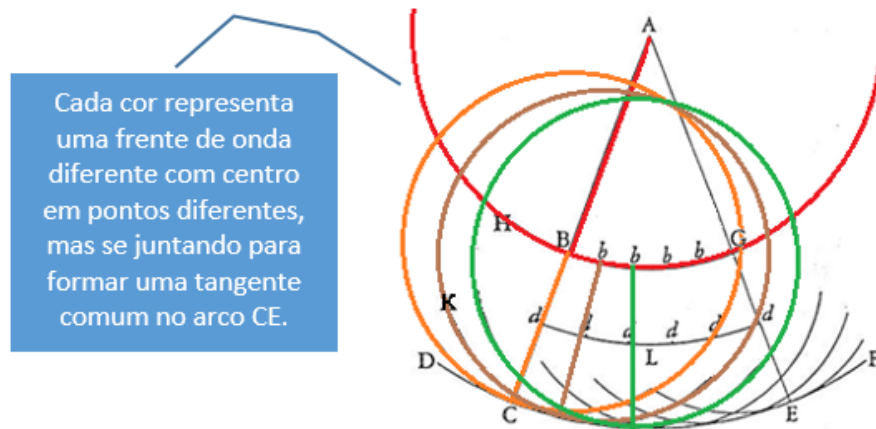


Figura 05: Representação dos pontos que o arco BG perturba criando novas frentes de onda, com centro neles, compondo uma nova frente de onda com uma tangente em comum, o arco CE (HUYGENS, 1986, p. 23, ADAPTADO).

Texto 3 (Newton)

1º trecho

Definição I

Por raios de luz entendo as partes mínimas da luz e as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas. (NEWTON, 1996, p. 39)

Nesta definição Newton diz que entende por raio de luz as partes mínimas da luz que são sucessivas nas mesmas linhas, ou em várias linhas. Quando coloca os raios contidos em linhas, ele está querendo dizer que são linhas retas, e que a luz se propaga em linha reta.

2º trecho

Normalmente os matemáticos consideram os raios de luz como linhas que se estendem do corpo luminoso para o corpo iluminado e a refração desses raios como a curvatura ou a interrupção dessas linhas quando passam de um meio para outro. (NEWTON, 1996, p. 39-40)

Neste ponto, quando Newton diz que os matemáticos consideram os raios como linhas, fica subentendido que são linhas retas, admitindo, dessa forma, como verdadeira a propagação retilínea da luz.

Ele não se atém muito a discutir a causa desse fenômeno porque isso era algo já evidenciado desde muito tempo, sendo o registro mais antigo publicado por Euclides (aproximadamente a 300 a.C.).

APÊNDICE D – Fontes primárias do Módulo 2

Texto 1 (Descartes)

O trecho e as figuras que seguem foram retirados do livro *Dióptrica* de Descartes e tratam sobre a reflexão da luz. Neste excerto, Descartes vale-se de algumas analogias interessantes para explicar o fenômeno, como a de um tenista com uma raquete.

“Pensemos, então, que uma bola, sendo impulsionada de A para B, encontra, no ponto B, a superfície do chão CBE, que, ao impedi-la de passar mais adiante, é a causa de seu desvio, e veremos para qual lado [...]”

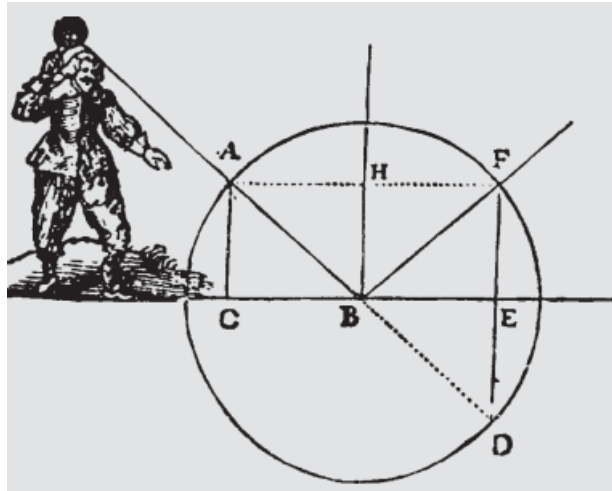


Figura 01: Representação da reflexão para Descartes (DESCARTES, 2010, p. 458).

“[...] Além do mais, deve-se notar que a determinação de mover-se para qualquer lado pode, assim como o movimento e geralmente como qualquer outro tipo de quantidade, ser dividida entre todas as partes das quais podemos imaginar que ela seja composta; e pode-se facilmente imaginar que aquela da bola que se move de A para B seja composta por duas outras, das quais uma a faz descer da linha AF para a linha CE e a outra a faz ir, ao mesmo tempo, da esquerda AC para a direita FE, de tal modo que essas duas juntas a conduzem até B, segundo a linha reta AB. Em seguida, é fácil de compreender que o encontro com o solo pode impedir apenas uma dessas duas determinações e de modo algum a outra. Pois ela deve impedir aquela que fazia a bola descer de AF para CE, por causa de ela ocupar todo o espaço que está abaixo de CE; mas por que ela impediria a outra que a faria avançar para a mão direita, visto que ela não lhe é de modo algum oposta nesse sentido? Para descobrir, então, para qual lado exatamente essa bola deve retornar, descrevemos um círculo de centro B, que passa pelo ponto A, e dizemos que no mesmo tempo que ela tiver empregado para mover-se desde A até B, ela deve infalivelmente empregar para retornar de B até qualquer ponto da circunferência desse círculo, na medida em que todos os pontos que estão à mesma distância deste B quanto de A encontram-se nessa circunferência, e supomos ser o movimento dessa bola sempre igualmente rápido. Depois, a fim de saber precisamente a qual de todos os pontos dessa circunferência ela deve retornar, traçamos três linhas retas AC, HB e FE perpendiculares a CE, de tal modo que não haja nem mais nem menos distância entre AC e HB do que entre HB e FE; dizemos que no mesmo tempo que a bola empregou para avançar em direção ao lado direito, a partir de A, um dos pontos da linha AC, até B, um daqueles da linha HB, ela deve também avançar da linha HB até algum ponto da linha FE; pois todos os pontos dessa linha FE estão igualmente distantes de HB nesse sentido, tanto um como o outro, e igualmente distantes daqueles da linha AC, e ela está também igualmente determinada a deslocar-se para esse lado quanto ela estava antes. Ora, ocorre que ela não pode chegar, ao mesmo tempo, em qualquer ponto da linha FE, e conjuntamente a qualquer ponto da circunferência do círculo AFD, a não ser ao ponto D, ou ao ponto F, tanto mais que só há esses dois, onde elas se interceptam; ainda que o solo a impeça de passar para D, deve-se concluir que ela deve ir infalivelmente para F. Vedes, assim, facilmente como se faz a reflexão, a saber, segundo um ângulo sempre igual àquele que denominamos ângulo de incidência. Como um raio, vindo do ponto A, incide

“Porém todas essas circunferências possuem por tangente comum a linha reta BN, ou seja, a mesma que se traçou de B tangente ao primeiro desses círculos, cujo centro era A e cujo semidiâmetro NA é igual a BC, como é fácil ver.”

“Ora, daqui surge que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Pois sendo os triângulos ACB e BNA retângulos, e tendo o lado AB comum e o lado CB igual a NA, segue-se que os ângulos opostos a esses lados serão iguais, e portanto também os ângulos CBA e NAB. Mas como CB, perpendicular a CA, indica a direção do raio incidente, também NA, perpendicular à onda BN, marca a direção do raio refletido; portanto esses raios estão igualmente inclinados em relação ao plano AB.” (HUYGENS, 1986, p. 25 - 26).

Texto 3 (Newton)

É conveniente ressaltar que Newton, ao longo de sua obra, *Óptica*, fez uso de mais de uma teoria para explicar os fenômenos da reflexão e refração, no entanto, nos valeremos apenas de duas delas aqui nesse trabalho. A primeira que foi retirada do Livro I do *Óptica*, trata a reflexão da luz como o choque entre os raios de luz e a matéria. Nessa fase de sua obra, Newton não se preocupa muito em demonstrar “verdades” que já eram de conhecimento geral e que eram passíveis de serem observadas experimentalmente, então ele apenas utiliza-as como definições e axiomas para a fundamentação de sua teoria. Já na segunda parte, que foi retirada do Livro II, também do *Óptica*, Newton pensa na reflexão como uma força que age a longa distância entre a luz e a matéria. Como complemento, retiramos também um trecho do Livro I do *Principia*¹⁷.

Primeira parte

Definição III

“A reflexibilidade dos raios é sua tendência a ser refletidos ou a voltar para o mesmo meio, vindas de qualquer outro meio sobre cuja superfície incidem. E os raios que voltam com maior ou menor facilidade são os raios mais ou menos reflexíveis.” (NEWTON, 1996, p. 40)

Definição IV

“Ângulo de incidência é o ângulo em que a reta descrita pelo raio incidente forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência.” (NEWTON, 1996, p. 40)

Definição V

“Ângulo de reflexão ou refração é o ângulo em que a reta descrita pelo raio refletido ou refratado forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência.” (NEWTON, 1996, p. 41)

Definição VI

¹⁷ Indicaremos ao lado quando o trecho for retirado do *Principia*.

“Os senos de incidência, reflexão e refração são os senos dos ângulos de incidência, reflexão e refração.” (NEWTON, 1996, p. 41)

Axioma II

“O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.” (NEWTON, 1996, p. 42)

“Suponhamos então que RS representa a superfície de água estagnada e que C é o ponto de incidência, no qual qualquer raio vindo no ar através do ponto A, da reta AC, é refletido ou refratado, e sei para onde esse raio irá depois de refletido ou refratado; do ponto de incidência situado na superfície da água levanto a perpendicular CP e prolongo-a para baixo até Q;” (NEWTON, 1996, p. 42)

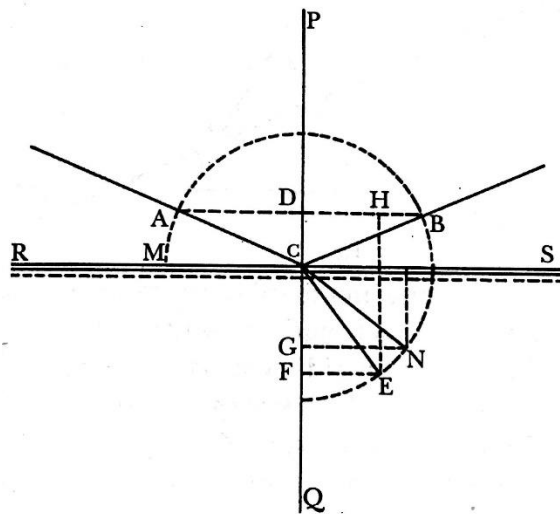


Figura 03: Representação da reflexão para Newton (NEWTON, 1996, p. 42).

Segunda parte

Proposição 8

“A causa da reflexão não é o choque da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos, como geralmente se acredita.” (NEWTON, 1996, p. 199)

“Isto se evidenciará pelas considerações seguintes. Primeiro, porque na passagem da luz do vidro para o ar há uma reflexão tão forte quanto na sua passagem do ar para o vidro, ou até um pouco mais forte, e muito mais do que na sua passagem do vidro para a água. [...] Finalmente, se os raios de luz refletidos se chocassem com as partes sólidas dos corpos suas reflexões nos corpos polidos não poderiam ser tão regulares como são. Pois polindo-se vidro com areia, potéia ou trípole não é imaginável que essas substâncias possam, ao raspar e friccionar o vidro, efetuar em todas as suas partículas menores um polimento acurado, de modo que todas as suas superfícies sejam verdadeiramente planas ou verdadeiramente esféricas e pareçam todas da mesma forma, de maneira a comporem, juntas, uma substância uniforme. Quanto menores forem as partículas dessa substância, menores serão as ranhuras pelas quais elas desgastam e riscam o vidro continuamente até ele ficar polido; porém, como elas nunca são tão pequenas, não podem desgastar o vidro de outra forma senão raspando-o, riscando-o e quebrando as protuberâncias; portanto não o podem polir de outra forma senão trazendo a sua aspereza a um grau muito pequeno, de forma que as ranhuras e desgastes da superfície se tornem muito pequenos para serem visíveis. Assim, se a luz fosse refletida ao chocar-se com as partes sólidas do vidro, ela seria tão espalhada pelo vidro mais polido quanto pelo mais

áspero. Resta pois o problema de saber como o vidro polido por substâncias abrasivas pode refletir a luz tão regularmente quanto o faz. E esse problema dificilmente será resolvido de outra forma que não dizendo-se que a reflexão de um raio é efetuada, não por um ponto único do corpo refletor, mas por algum poder do corpo que está espalhado uniformemente por toda sua superfície e pela qual ele age sobre o raio sem contato imediato.” (NEWTON, 1996, p. 199 - 201)

Proposição XCVI. Teorema L (*Principia*)

“[...] sendo mais rápido o movimento antes da incidência do que após, afirmo que, se a linha de incidência for inclinada continuamente, o corpo finalmente será refletido, e o ângulo de reflexão será igual ao ângulo de incidência.” (NEWTON, 2016, p. 292)

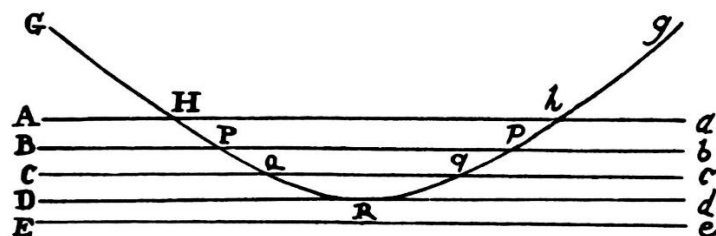


Figura 04: Trajetória da reflexão de um corpo sólido (NEWTON, 2016, p. 292).

Escólio (*Principia*)

“Essas atrações guardam grande semelhança com as reflexões e refrações da luz realizadas em uma dada razão das secantes, como foi descoberto por Snell; e, conseqüentemente, em uma dada razão dos senos, como foi mostrado por Descartes.” (NEWTON, 2016, p. 293)

APÊNDICE E – Leitura contextualizada do Módulo 2 (Guia do professor)

Texto 1 (Descartes)

1º trecho

Pensemos, então, que uma bola, sendo impulsionada de A para B, encontra, no ponto B, a superfície do chão CBE, que, ao impedi-la de passar mais adiante, é a causa de seu desvio, e veremos para qual lado [...] (DESCARTES, 2010, p. 458)

Aqui Descartes faz uma analogia da reflexão da luz com uma bola de tênis batendo contra o chão e subindo novamente.

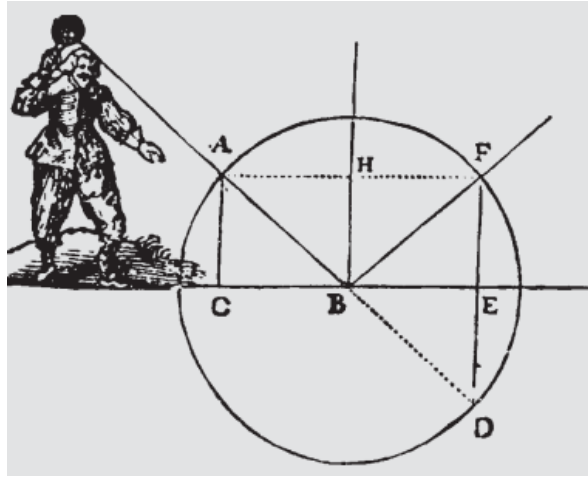


Figura 01: Representação da reflexão para Descartes (DESCARTES, 2010, p. 458).

2º trecho

[...] Além do mais, deve-se notar que a determinação de mover-se para qualquer lado pode, assim como o movimento e geralmente como qualquer outro tipo de quantidade, ser dividida entre todas as partes das quais podemos imaginar que ela seja composta; e pode-se facilmente imaginar que aquela da bola que se move de A para B seja composta por duas outras, das quais uma a faz descer da linha AF para a linha CE e a outra a faz ir, ao mesmo tempo, da esquerda AC para a direita FE, de tal modo que essas duas juntas a conduzem até B, segundo a linha reta AB. (DESCARTES, 2010, p. 458).

Neste trecho podemos entender que Descartes pensa no movimento da bola de tênis dividido em duas partes, no movimento vertical, que faz a bola descer da linha AF para a linha CE e no movimento horizontal, que faz se mover da linha AC para a linha FE, e esses dois movimentos ocorrem num mesmo intervalo de tempo.

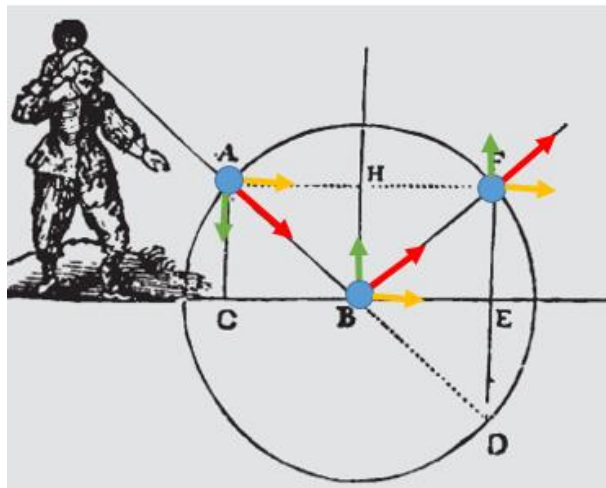


Figura 02: As setas inseridas na figura indicam as componentes do movimento (DESCARTES, 2010, p. 458, ADAPTADO).

Podemos interpretar da seguinte forma, na figura, as setas representam apenas o sentido do movimento, reparem que a seta laranja que representa o movimento horizontal permanece sempre apontando no mesmo sentido, enquanto que a seta verde, que representa o movimento vertical, teve uma inversão no sentido devido à resistência que o solo impôs ao seu movimento.

3º trecho

Em seguida, é fácil de compreender que o encontro com o solo pode impedir apenas uma dessas duas determinações e de modo algum a outra. Pois ela deve impedir aquela que fazia a bola descer de AF para CE, por causa de ela ocupar todo o espaço que está abaixo de CE; mas por que ela impediria a outra que a faria avançar para a mão direita, visto que ela não lhe é de modo algum oposta nesse sentido? (DESCARTES, 2010, p. 458).

Aqui, Descartes argumenta que o solo é capaz de inverter o sentido do movimento vertical da bola por conta do solo que está abaixo da superfície, o que não ocorre no movimento horizontal porque não há nada que possa oferecer essa resistência.

4º trecho

Para descobrir, então, para qual lado exatamente essa bola deve retornar, descrevemos um círculo de centro B, que passa pelo ponto A, e dizemos que no mesmo tempo que ela tiver empregado para mover-se desde A até B, ela deve infalivelmente empregar para retornar de B até qualquer ponto da circunferência desse círculo, na medida em que todos os pontos que estão à mesma distância deste B quanto de A encontram-se nessa circunferência, e supomos ser o movimento dessa bola sempre igualmente rápido. Depois, a fim de saber precisamente a qual de todos os pontos dessa circunferência ela deve retornar, traçamos três linhas retas AC, HB e FE perpendiculares a CE, de tal modo que não haja nem mais nem menos distância entre AC e HB do que entre HB e FE; dizemos que no mesmo tempo que a bola empregou para avançar em direção ao lado direito, a partir de A, um dos pontos da linha AC, até B, um daqueles da linha HB, ela deve também avançar da linha HB até algum ponto da linha FE; pois todos os pontos dessa linha FE estão igualmente distantes de HB nesse sentido, tanto um como o outro, e igualmente distantes daqueles da linha AC, e ela está também igualmente determinada a deslocar-se para esse lado quanto ela estava antes. Ora, ocorre que ela não pode chegar, ao mesmo tempo, em qualquer ponto da linha FE, e conjuntamente a qualquer ponto da circunferência do círculo AFD, a não ser ao ponto D, ou ao ponto F, tanto mais que só há esses dois, onde elas se interceptam; ainda que o solo a impeça de passar para D, deve-se concluir que ela deve ir infalivelmente para F. (DESCARTES, 2010, p. 458).

Aqui, a fim de analisar melhor o movimento da bolinha na reflexão, Descartes faz um círculo com centro em B (ponto onde a bola toca a superfície) e argumenta que no mesmo tempo que ela levar pra ir de A até B, ela deve ser capaz de ir de B até qualquer outro ponto da circunferência (a distância é a mesma, trata-se do raio). E aí ele traça três retas verticais, AC, HB e FE, diz que estão igualmente espaçadas e argumenta que o tempo que um ponto que sai da reta AC leva para chegar a HB deve ser o mesmo para ir de HB até FE. E assim conclui que a bolinha poderia ocupar o ponto F ou o ponto D, mas como D está abaixo do solo, a bola só pode estar em F.

5º trecho

Vedes, assim, facilmente como se faz a reflexão, a saber, segundo um ângulo sempre igual àquele que denominamos ângulo de incidência. Como um raio, vindo do ponto A, incide no ponto B sobre a superfície do espelho plano CBE, e reflete-se para F, de tal modo que o ângulo de reflexão FBE não é nem maior nem menor que o ângulo de incidência ABC. (DESCARTES, 2010, p. 458).

Por fim, Descartes conclui que os triângulos ABC e FBE são iguais, o que quer dizer que os ângulos de incidência e reflexão também são. Vale ressaltar que Descartes chamava de ângulo de incidência o ângulo formado com a horizontal, e hoje chamamos de incidência o ângulo formado com a vertical.

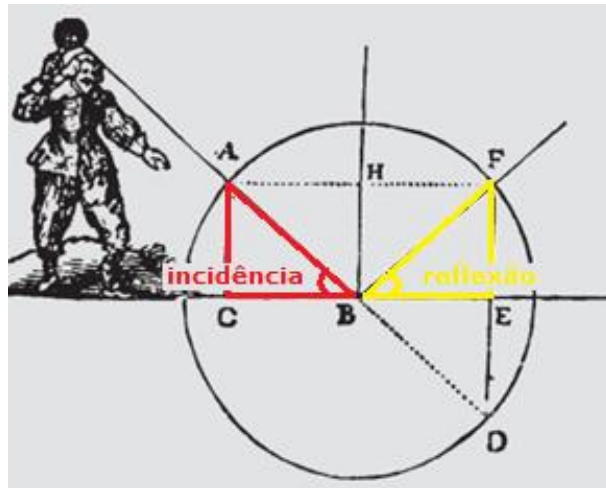


Figura 03: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão (DESCARTES, 2010, p. 458, ADAPTADO).

Texto 2 (Huygens)

1º trecho

Seja uma superfície plana e polida, de algum metal, vidro ou outro corpo, AB, que inicialmente considerarei como perfeitamente unida... Uma linha AC, inclinada em relação a AB; representa uma parte de uma onda de luz, cujo centro esteja tão longe que essa parte AC possa ser considerada como uma linha reta... (HUYGENS, 1986, p. 25 - 26).

Nesta parte Huygens pede para que o leitor imagine uma superfície plana na qual irá acontecer a reflexão e uma onda AC, inclinada, com centro localizado tão longe, de forma que AC possa ser considerada uma reta.

Pensando do mesmo jeito, assim como A, ao tocar a superfície cria uma onda esférica particular, os pontos representados por H, ao tocar a superfície gerarão ondas esféricas particulares com centro em K, e todas essas ondas no mesmo intervalo de tempo, irão se encontrar formando uma tangente comum com a onda SNR, que é a reta BN.

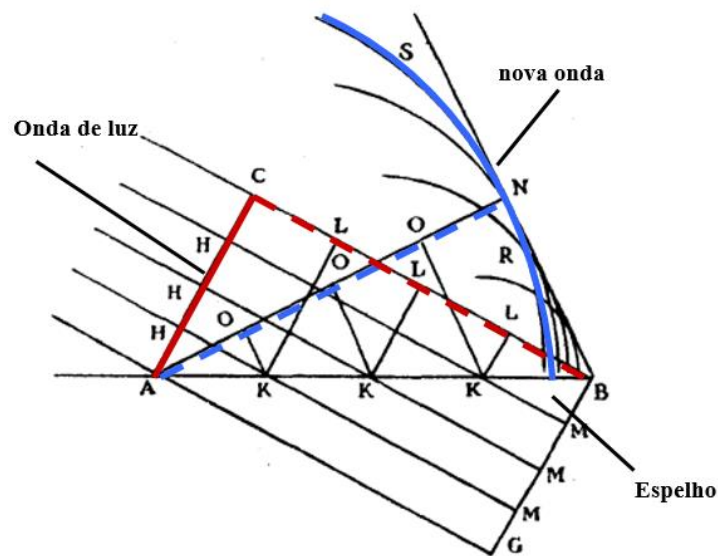


Figura 05: Representação da onda refletida (HUYGENS, 1986, p. 25, ADAPTADO).

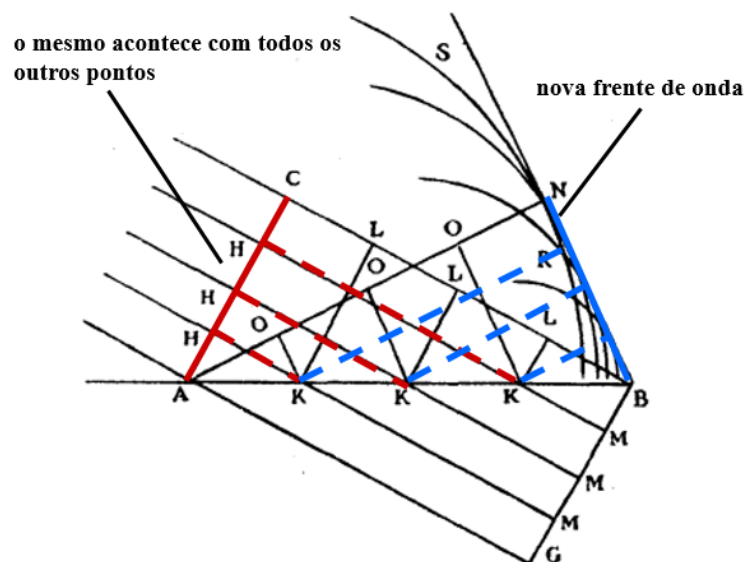


Figura 06: Representação da nova frente de onda com a tangente comum (HUYGENS, 1986, p. 25, ADAPTADO).

4º trecho

Ora, daqui surge que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Pois sendo os triângulos ACB e BNA retângulos, e tendo o lado AB comum e o lado CB igual a NA, segue-se que os ângulos

opostos a esses lados serão iguais, e portanto também os ângulos CBA e NAB. Mas como CB, perpendicular a CA, indica a direção do raio incidente, também NA, perpendicular à onda BN, marca a direção do raio refletido; portanto esses raios estão igualmente inclinados em relação ao plano AB. (HUYGENS, 1986, p. 25 - 26).

Por fim, aqui Huygens determina a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão, mostrando que como os triângulos ACB e BNA são retângulos, têm o lado AB em comum e CB é igual a NA, os ângulos NAB e CBA são iguais.

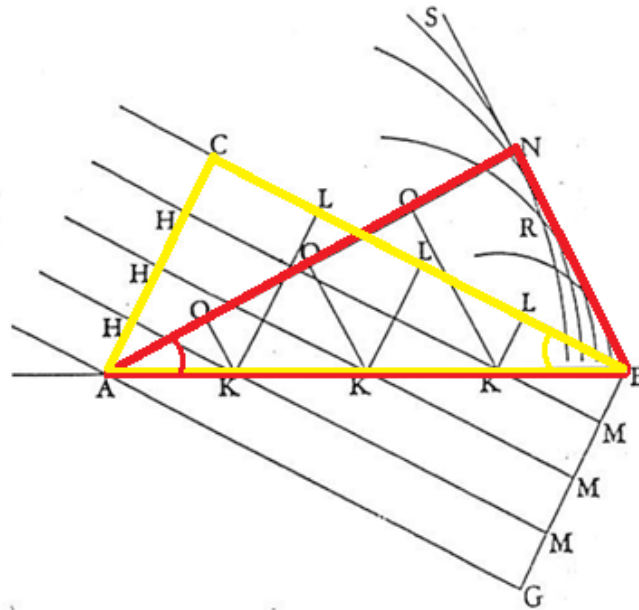


Figura 07: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão (HUYGENS, 1986, p. 25, ADAPTADO).

Texto 3 (Newton)

Primeira parte

1º trecho

Definição III

A reflexibilidade dos raios é sua tendência a ser refletidos ou a voltar para o mesmo meio, vindas de qualquer outro meio sobre cuja superfície incidem. E os raios que voltam com maior ou menor facilidade são os raios mais ou menos reflexíveis. (NEWTON, 1996, p. 40)

Aqui, Newton define a reflexão como um fenômeno onde os raios incidem em um determinado meio e retornam ao meio de origem.

2º trecho

Definição IV

Ângulo de incidência é o ângulo em que a reta descrita pelo raio incidente forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência. (NEWTON, 1996, p. 40)

Definição V

Ângulo de reflexão ou refração é o ângulo em que a reta descrita pelo raio refletido ou refratado forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência. (NEWTON, 1996, p. 41)

Aqui Newton define de maneira clara e objetiva que o ângulo que o raio incidente forma com a perpendicular é chamado de ângulo de incidência, e o que o de reflexão forma com a perpendicular é chamado de ângulo de reflexão.

3º trecho

Definição VI

Os senos de incidência, reflexão e refração são os senos dos ângulos de incidência, reflexão e refração. (NEWTON, 1996, p. 41)

Essa definição ele utiliza para explicar as nomenclaturas que surgem em seu texto.

4º trecho

Axioma II

O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. (NEWTON, 1996, p. 42)

De novo, isso já era fato conhecido dos gregos, então Newton, de forma objetiva, coloca-o como um axioma.

5º trecho

Suponhamos então que RS representa a superfície de água estagnada e que C é o ponto de incidência, no qual qualquer raio vindo no ar através do ponto A, da reta AC, é refletido ou refratado, e sei para onde esse raio irá depois de refletido ou refratado; do ponto de incidência situado na superfície da água levanto a perpendicular CP e prolongo-a para baixo até Q; (NEWTON, 1996, p. 42)

Neste trecho Newton apenas explica como constrói a figura representada a seguir, trata-se de uma superfície plana onde ele faz incidir um raio, o qual chama de AC, e no ponto de incidência traça uma reta perpendicular, a qual chama de CP.

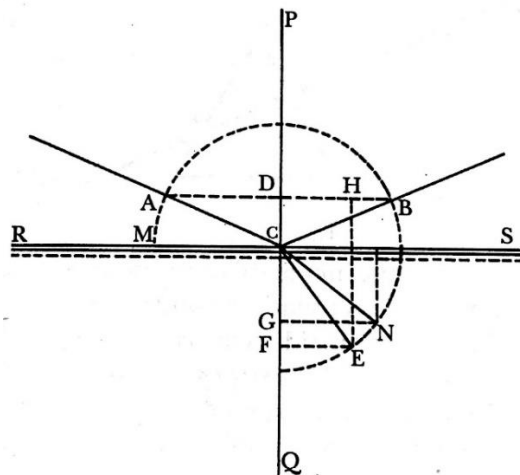


Figura 08: Representação da reflexão para Newton (NEWTON, 1996, p. 42).

6º trecho

Faço incidir sobre a perpendicular CP o seno de incidência AD; e se eu quiser o raio refletido, prolongo AD até B de forma de que DB seja igual a AD e obtenho CB. Então essa linha CB é o raio refletido; o ângulo de reflexão BCP e seu seno BD são iguais ao ângulo e ao seno de incidência como têm de ser pelo axioma II. (NEWTON, 1996, p. 42)

Aqui, através da geometria, Newton prova a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão. A partir do raio incidente que ele chama de AC, ele traça a reta AD, cateto oposto ao ângulo ACP (ângulo de incidência), e então traça DB, formando a reta CB que representa o raio refletido. Como DB é o cateto oposto ao ângulo BCP (ângulo de reflexão), e AD e DB são iguais, os senos dos ângulos ACP e BCP são iguais, e, portanto, os ângulos ACP e BCP são iguais.

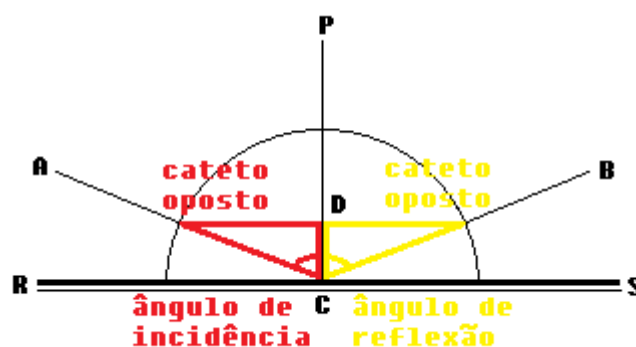


Figura 09: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os ângulos de incidência e reflexão.

Segunda parte

1º trecho

Proposição 8

“A causa da reflexão não é o choque da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos, como geralmente se acredita.” (NEWTON, 1996, p. 199)

Nesta proposição Newton complementa sua explicação feita na primeira parte atribuindo uma origem para o fenômeno. Esse é o ponto de partida para a sua nova ideia, a reflexão por meio de uma força à distância.

2º trecho

“Isto se evidenciará pelas considerações seguintes. Primeiro, porque na passagem da luz do vidro para o ar há uma reflexão tão forte quanto na sua passagem do ar para o vidro, ou até um pouco mais forte, e muito mais do que na sua passagem do vidro para a água. [...]” (NEWTON, 1996, p. 199)

Neste pequeno excerto, Newton argumenta que se a reflexão ocorresse por meio do choque entre a luz e a matéria, ela deveria ser mais forte quando ocorresse do ar para o vidro do que do vidro para o ar. O que o leva a pensar dessa forma é a rigidez dos dois materiais, pensando na mecânica, quanto mais rígido um corpo, melhor a restituição durante a colisão, e portanto, melhor a reflexão. Fazendo um paralelo, podemos pensar numa bolinha de borracha sendo atirada contra um piso duro e depois contra um tapete, em qual dessas situações o resultado da reflexão seria melhor?

Então, pensando dessa forma, na passagem do raio de luz do ar para o vidro, por ser mais duro, o vidro deveria oferecer uma reflexão mais forte. Mas como o próprio Newton relata, isso não ocorre, a reflexão ocorre igual ou mais fraca.

3º trecho

“Finalmente, se os raios de luz refletidos se chocassem com as partes sólidas dos corpos suas reflexões nos corpos polidos não poderiam ser tão regulares como são. Pois polindo-se vidro com areia, poderia ou tripole não é imaginável que essas substâncias possam, ao raspar e friccionar o vidro, efetuar em todas as suas partículas menores um polimento acurado, de modo que todas as suas superfícies sejam verdadeiramente planas ou verdadeiramente esféricas e pareçam todas da mesma forma, de maneira a comporem, juntas, uma substância uniforme. Quanto menores forem as partículas dessa substância, menores serão as ranhuras pelas quais elas desgastam e riscam o vidro continuamente até ele ficar polido; porém, como elas nunca são tão pequenas, não podem desgastar o vidro de outra forma senão raspando-o, riscando-o e quebrando as protuberâncias; portanto não o podem polir de outra forma senão trazendo a sua aspereza a um grau muito pequeno, de forma que as ranhuras e desgastes da superfície se tornem muito pequenos para serem visíveis. Assim, se a luz fosse refletida ao chocar-se com as partes sólidas do vidro, ela seria tão espalhada pelo vidro mais polido quanto pelo mais áspero. Resta pois o problema de saber como o vidro polido por substâncias abrasivas pode refletir a luz tão regularmente quanto o faz. E esse problema dificilmente será resolvido de outra forma que não dizendo-se que a reflexão de um raio é efetuada, não por um ponto único do corpo refletor, mas por algum poder do corpo que está espalhado uniformemente por toda sua superfície e pela qual ele age sobre o raio sem contato imediato.” (NEWTON, 1996, p. 200 - 201)

Neste argumento final, Newton diz que um corpo polido nada mais é do que um corpo com ranhuras imperceptíveis a olho nu, então mesmo polido, o corpo possui irregularidades, e

sendo assim, se a reflexão ocorresse devido a colisão entre luz e matéria, esses raios de luz deveriam ser tão espalhados no vidro mais polido quanto no menos polido. É aí que Newton atribui a causa da reflexão a uma força, presente no corpo, que age a distância. E que age de maneira uniforme pelo corpo inteiro, não apenas em um único ponto.

4º trecho

Proposição XCVI. Teorema L (*Principia*)

[...] sendo mais rápido o movimento antes da incidência do que após, afirmo que, se a linha de incidência for inclinada continuamente, o corpo finalmente será refletido, e o ângulo de reflexão será igual ao ângulo de incidência. (NEWTON, 2016, p. 292)

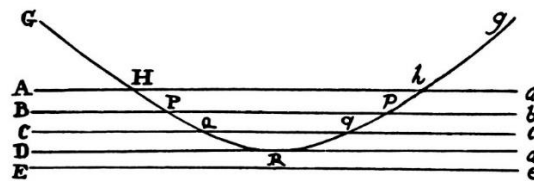


Figura 10: Trajetória da reflexão de um corpo sólido (NEWTON, 2016, p. 292).

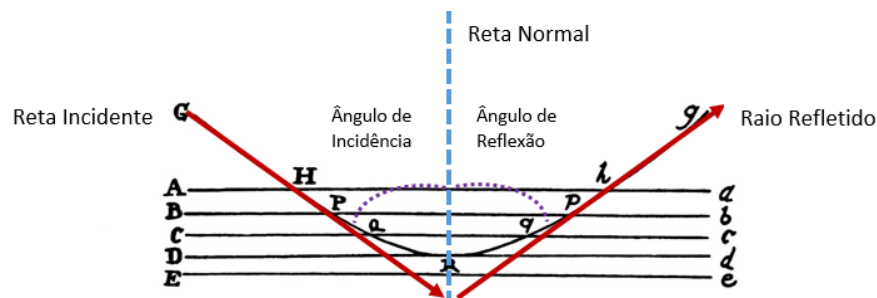


Figura 11: Trajetória da reflexão de um corpo sólido comparada à trajetória dos raios de luz (NEWTON, 2016, p. 292, ADAPTADO).

Escólio (*Principia*)

Essas atrações guardam grande semelhança com as reflexões e refrações da luz realizadas em uma dada razão das secantes, como foi descoberto por Snell; e, conseqüentemente, em uma dada razão dos senos, como foi mostrado por Descartes. (NEWTON, 2016, p. 293)

Vale salientar que essa nova teoria a respeito da interação da luz com a matéria por meio de uma força, em nada altera a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão que foi demonstrada na primeira parte, pois ela não é dependente da natureza da luz. Newton chegou a trabalhar melhor a reflexão por meio forças no Livro I de seu *Principia*, como mostram os excertos, pensando na reflexão de corpos sólidos. E no final indica em um escólio que a reflexão dos corpos sólidos guarda semelhanças com a reflexão da luz. Vale salientar que Newton apenas indica que existe uma **semelhança**, ele nunca estudou fenômenos ópticos em seu *Principia*.

APÊNDICE F – Fontes primárias do Módulo 3

Texto 1 (Descartes)

Os trechos e as figuras que seguem foram retirados do livro *Dióptrica* de Descartes e tratam sobre a refração da luz. Mais uma vez, pensando na bola impulsionada pela raquete.

“[...] pensemos que a bola, tendo sido primeiramente impulsionada de A para B, e ainda uma vez impulsionada, estando no ponto B, pela raquete CBE que aumenta a força de seu movimento, por exemplo, de um terço, de modo que ela possa percorrer depois o mesmo caminho em dois momentos, quando antes ela o fazia em três. Produzirá o mesmo efeito se ela encontrar no ponto B um corpo de natureza tal que ela passe, através de sua superfície CBE, um terço mais facilmente do que pelo ar.”

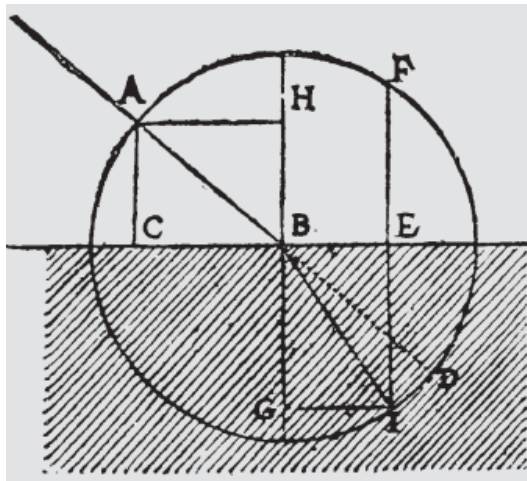


Figura 01: Representação da refração para Descartes (DESCARTES, 2010, p. 461).

“Do que já foi demonstrado segue-se evidentemente que, se descrevermos o círculo AD, como antes, e as linhas AC, HB, FE de tal modo que haja um terço a menos de distância entre FE e HB do que entre HB e AC, o ponto I, onde a linha reta FE e a circular AD se interceptam, designará o lugar para o qual essa bola, estando no ponto B, deve ser desviada. (DESCARTES, 2010, p.461)”

“Ora, pode-se também tomar o inverso desta conclusão e dizer que, já que a bola, que vem de A em linha reta até B, é desviada ao estar no ponto B e toma seu curso de B para I, isso significa que a força ou a facilidade com a qual ela entra no corpo CBEI está para aquela com a qual ela sai do corpo ACBE, assim como a distância existente entre AC e HB está para aquela existente entre HB e FI, isto é, como a linha CB está para a BE.” (DESCARTES, 2010, p.461)

pequenos arcos dessas circunferências, que limita o movimento que a onda AC comunicou ao corpo transparente, e é aí que esse movimento que se encontra em muito maior quantidade do que em qualquer outra parte [...]"

"Daí é fácil reconhecer essa propriedade principal das refrações, ou seja, que o seno do ângulo DAE possui sempre a mesma razão para o seno do ângulo NAF, qualquer que seja a inclinação do raio DA, e essa razão é a mesma que a da velocidade das ondas no [corpo] diáfano que está para AE, para sua velocidade no diáfano que está para AF. Considerando AB como raio de um círculo, o seno do ângulo BAC é BC, e o seno do ângulo ABN é NA. Mas o ângulo ABN é igual cada um deles, adicionado a CAE, forma um ângulo reto. E o ângulo ABN é igual a NAF, uma vez que cada um deles forma com BAN um ângulo reto. Portanto o seno do ângulo DAE está também para o seno de NAF como BC para NA. Mas a razão entre BC e NA era a mesma que a das velocidades da luz na matéria que está para AE e na que está para AF. Portanto o seno do ângulo DAE está também para o seno do ângulo NAF como as referidas velocidades da luz." (HUYGENS, 1986, p. 33 - 35).

Texto 3 (Newton)

Os trechos e as figuras que seguem foram retirados das obras *Óptica* e *Principia* de Newton, e discutem a refração da luz. Ao que se refere à primeira parte, retiramos do Livro I do *Óptica*. Ao que se refere à segunda parte, retiramos do Livro II do *Óptica* e do Livro I do *Principia*.

Primeira parte

Definição IV

"Ângulo de incidência é o ângulo em que a reta descrita pelo raio incidente forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência." (NEWTON, 1996, p. 40)

Definição V

"Ângulo de reflexão ou refração é o ângulo em que a reta descrita pelo raio refletido ou refratado forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência." (NEWTON, 1996, p. 41)

Definição VI

"Os senos de incidência, reflexão e refração são os senos dos ângulos de incidência, reflexão e refração." (NEWTON, 1996, p. 41)

Axioma IV

"A refração do meio mais rarefeito para o meio mais denso se dá em direção à perpendicular, isto é, de forma que o ângulo de refração seja menor do que o ângulo de incidência." (NEWTON, 1996, p. 42)

Axioma V

"O seno de incidência está para o seno de refração em uma certa razão precisa ou muito aproximada." (NEWTON, 1996, p. 42)

"Suponhamos então que RS representa a superfície de água estagnada e que C é o ponto de incidência, no qual qualquer raio vindo no ar através do ponto A, da reta AC, é refletido ou

refratado, e sei para onde esse raio irá depois de refletido ou refratado; do ponto de incidência situado na superfície da água levanto a perpendicular CP e prolongo-a para baixo até Q;“ (NEWTON, 1996, p. 43)

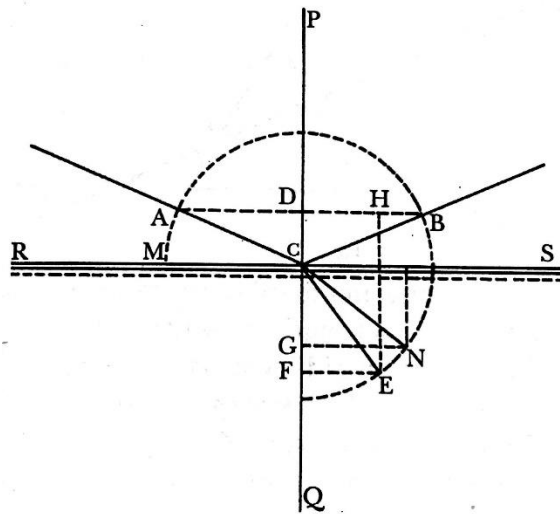


Figura 03: Representação da refração para Newton (NEWTON, 1996, p. 42).

“Mas se eu quiser o raio refratado, prolongo AD até H de forma que DH possa estar para AD assim como o seno da refração está para o seno de incidência, isto é (se a luz for vermelha), assim como 3 está para 4; e ao redor do centro C e no plano ACP, como o raio CA descrevendo um círculo ABE, obtenho uma paralela à perpendicular CPQ com a reta HE cortando a circunferência em E e ligo CE, esta linha CE é a reta do raio refratado. Prolongando EF perpendicularmente à reta PQ, essa linha EF é o seno de refração do raio CE, o ângulo de refração sendo ECQ, este seno EF é igual a DH, e consequentemente está para o seno de incidência AD assim como 3 está para 4.” (NEWTON, 1996, p. 44)

Segunda parte

Proposição 9

“Os corpos refletem e refratam a luz em virtude de uma mesma força, exercida variadamente em várias circunstâncias.” (NEWTON, 1996, p. 203)

“[...] a luz é alternadamente refletida e transmitida por lâminas finas de vidro através de muitas sucessões, à medida que a espessura da lâmina aumenta numa progressão aritmética. Pois aqui a espessura do vidro determina se a força pela qual o vidro atua sobre a luz fará com que ela seja refletida ou permitirá que seja transmitida.” (NEWTON, 1996, p. 203)

Proposição 10

“Se a luz for mais veloz nos corpos do que no vácuo, na proporção dos senos que medem a refração dos corpos, as forças dos corpos para refletir e refratar a luz serão muito aproximadamente proporcionais às densidades dos mesmos corpos, exceto que os corpos oleosos e sulfurosos refratam mais do que outros da mesma densidade.” (NEWTON, 1996, p. 44)

“Seja AB a superfície plana refratora de qualquer corpo e ic um raio que incide muito obliquamente sobre o corpo em C, de forma que o ângulo ACI possa ser infinitamente pequeno, e seja CR o raio refratado.” (NEWTON, 1996, p. 204)

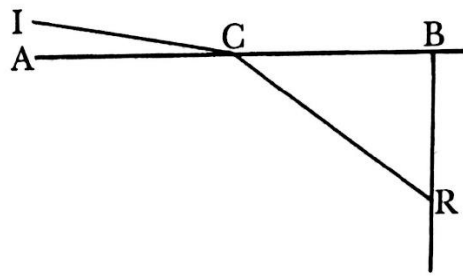


Figura 04: Raio de luz sofrendo refração (NEWTON, 1996, p. 204).

“[...] se CR representa o movimento do raio refratado, e esse movimento for dividido em dois movimentos CB e BR, dos quais CB é paralelo ao plano refrator e BR perpendicular a ele, CB representará o movimento do raio incidente e BR o movimento gerado pela refração, como os ópticos tem explicado ultimamente.” (NEWTON, 1996, p. 204)

“Ora, se qualquer corpo ou coisa, movendo-se através de um espaço qualquer de uma dada extensão e terminado em ambos os lados por dois planos paralelos, for estimulado para frente em todas as partes desse espaço por forças que tendam diretamente para frente em direção ao último plano e que, antes de sua incidência no primeiro plano, não tinha nenhum movimento em direção a ele, ou tinha apenas um movimento infinitamente pequeno; e se as forças existentes em todas as partes desse espaço entre os planos forem iguais umas às outras a distâncias iguais dos planos, mas a distâncias diversas forem maiores ou menores em qualquer proporção dada, o movimento gerado pelas forças na passagem completa do corpo ou coisa através do espaço estará numa proporção subduplicada das forças¹⁸, como os matemáticos entenderam facilmente.” (NEWTON, 1996, p. 204)

“Portanto, se no espaço de atividade da superfície refratora do corpo for considerado como tal espaço, o movimento do raio gerado pela força refratora do corpo durante sua passagem através desse espaço (isto é, o movimento BR) deve estar numa proporção subduplicada dessa força refratora. Digo, portanto, que o quadrado da linha BR, e por consequência a força refratora do corpo, é muito aproximadamente proporcional à densidade do mesmo corpo.” (NEWTON, 1996, p. 205)”

Proposição XCV. Teorema XLIX. (*Principia*)

“[...] afirmo que a velocidade do corpo antes de sua incidência está para a sua velocidade após a emergência como o seno de emergência para o seno de incidência.” (NEWTON, 2016, p. 291)”

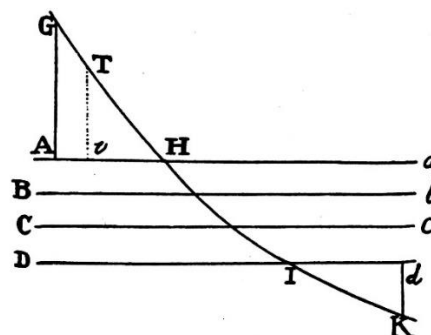


Figura 05: Trajetória da refração de um corpo sólido (NEWTON, 2016, p. 291).

¹⁸ Ele quer dizer que a velocidade perpendicular à superfície será proporcional à raiz quadrada da força.

APÊNDICE G – Leitura contextualizada do Módulo 3 (Guia do professor)

Texto 1 (Descartes)

1º trecho

[...] pensemos que a bola, tendo sido primeiramente impulsionada de A para B, e ainda uma vez impulsionada, estando no ponto B, pela raquete CBE que aumenta a força de seu movimento, por exemplo, de um terço, de modo que ela possa percorrer depois o mesmo caminho em dois momentos, quando antes ela o fazia em três. Produzirá o mesmo efeito se ela encontrar no ponto B um corpo de natureza tal que ela passe, através de sua superfície CBE, um terço mais facilmente do que pelo ar. (DESCARTES, 2010, p.461)

Neste trecho Descartes, ainda fazendo a analogia da bola, supõe que ao mudar o meio de propagação, a bola recebe um novo impulso que aumenta sua rapidez em $1/3$, fazendo com que ela seja capaz de percorrer a mesma distância que antes com tempo $1/3$ menor do que antes.

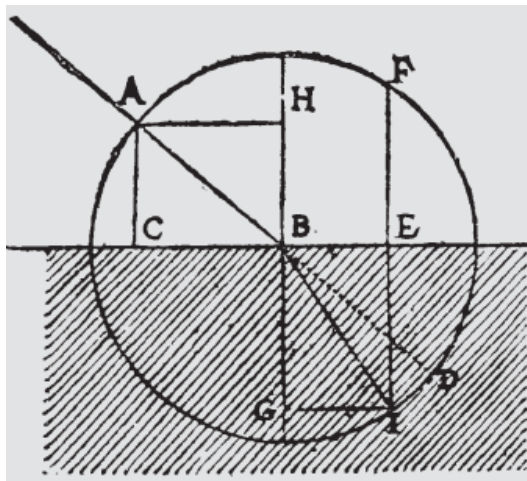


Figura 01: Representação da refração para Descartes (DESCARTES, 2010, p. 461).

2º trecho

Do que já foi demonstrado segue-se evidentemente que, se descrevermos o círculo AD, como antes, e as linhas AC, HB, FE de tal modo que haja um terço a menos de distância entre FE e HB do que entre HB e AC, o ponto I, onde a linha reta FE e a circular AD se interceptam, designará o lugar para o qual essa bola, estando no ponto B, deve ser desviada. (DESCARTES, 2010, p.461)

Aqui Descartes prevê para onde ocorrerá o desvio, argumentando que como a distância entre HB e FE é $1/3$ menor do que entre HB e AC, a intersecção entre a direção do movimento da bola e o círculo traçado ocorrerá em I.

3º trecho

Ora, pode-se também tomar o inverso desta conclusão e dizer que, já que a bola, que vem de A em linha reta até B, é desviada ao estar no ponto B e toma seu curso de B para I, isso significa que a força ou a facilidade com a qual ela entra no corpo CBEI está para aquela com a qual ela sai do corpo ACBE, assim como a distância existente entre AC e HB está para aquela existente entre HB e FI, isto é, como a linha CB está para a BE. (DESCARTES, 2010, p.461)

Aqui Descartes mostra a proporção entre as linhas, o que podemos transformar em uma relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração e as velocidades. Descartes diz que a facilidade de propagação no meio ACBE está para a facilidade de propagação no meio CBEI (razão entre as velocidades de propagação nos dois meios) assim como, a linha CB está para BE (razão entre os senos dos ângulos de incidência e refração, pois $CB = AH$ e $BE = GI$, que representam os catetos opostos).

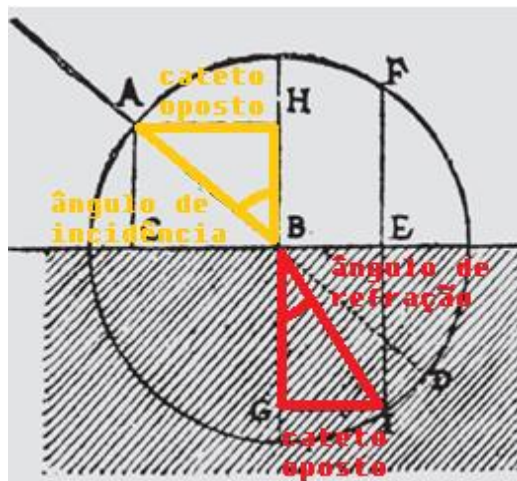


Figura 02: Estão representados os triângulos utilizados (DESCARTES, 2010, p. 461, ADAPTADO).

Texto e Figura 2 (Huygens)

1º trecho

[...] seja a reta AB, que representa uma superfície plana, que limita os corpos transparentes que se encontram para C e para N [...] que a linha AC represente uma parte da onda de luz, cujo centro seja suposto tão longe que essa parte possa ser considerada como uma linha reta. O ponto C da onda AC, em um certo espaço de tempo, terá avançado até o plano AB, seguindo a reta CB, que se deve imaginar proveniente do centro luminoso, e que conseqüentemente cortará AC em ângulos retos. Ora, ao mesmo tempo, o ponto A teria chegado a G pela reta AG, igual a paralela a CB, e toda a parte da onda AC estaria em GB, se a matéria do corpo transparente transmitisse o movimento da onda tão depressa quanto o éter.

Neste primeiro momento, Huygens pede que assim como na reflexão, o leitor pense em uma onda com centro tão distante que possa ser considerada uma linha reta AC, e então diz que AC chegaria em GB caso o meio transparente transmitisse o movimento da onda com a mesma rapidez que o ar.

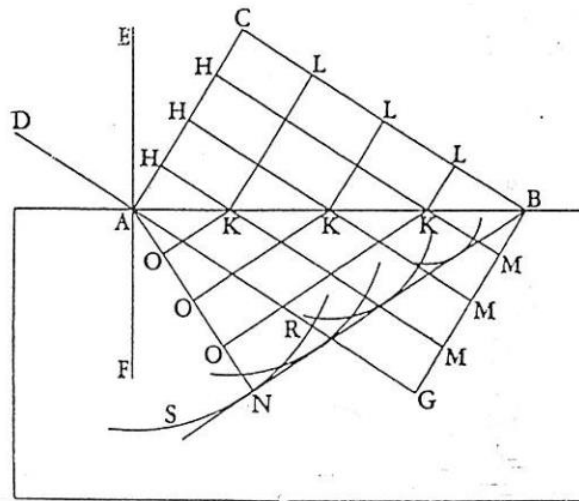


Figura 03: Representação da refração para Huygens (HUYGENS, 1986, p. 33).

2º trecho

Mas suponhamos que ele transmite esse movimento menos velozmente, por exemplo, de um terço. O movimento terá portanto se espalhado desde o ponto A, na matéria do corpo transparente, por uma distância igual a dois terços de CB, fazendo sua onda esférica particular, segundo o que foi dito antes. Essa onda é portanto representada pela circunferência SNR, cujo centro é A, e seu semidiâmetro é igual a $\frac{2}{3}$ de CB. Se considerarmos depois os outros pontos H da onda AC, aparecerá que ao mesmo tempo em que o ponto C chegou a B, eles não somente terão chegado à superfície AB, por retas HK paralelas a CB, mas além disso terão gerado, dos centros K, ondas particulares no [corpo] diáfano, representadas aqui por circunferências cujos semidiâmetros são iguais a $\frac{2}{3}$ das linhas KM, quer dizer, aos $\frac{2}{3}$ das continuações de HK até a reta BG; pois esses semidiâmetros teriam sido iguais aos KM inteiros, se os dois [corpos] diáfanos fossem da mesma penetrabilidade.

Aqui Huygens supõe que a onda AC irá perturbar o meio transparente no qual irá penetrar, gerando em cada ponto em que toca uma nova onda esférica particular, assim como foi visto na reflexão. No entanto, esse meio deve reduzir de $\frac{1}{3}$ a sua velocidade fazendo com que a distância AN (raio da circunferência SNR com centro no ponto A) seja igual a $\frac{2}{3}$ da reta CB, assim como todos os pontos K gerarão ondas esféricas particulares e seus raios equivalerão a $\frac{2}{3}$ das retas KM.

3º trecho

Ora, todas essas circunferências possuem comum a linha reta BN, que é a mesma que do ponto B tangencia a circunferência SNR, que consideramos primeiramente. É pois fácil ver que todas as outras circunferências vão tocar a mesma reta BN, desde B até o ponto de contato N, que é o mesmo onde cai AN perpendicular sobre BN. É portanto BN, que é como se fosse formada por pequenos arcos dessas circunferências, que limita o movimento que a onda AC comunicou ao corpo transparente, e é aí que esse movimento que se encontra em muito maior quantidade do que em qualquer outra parte [...]

Aqui Huygens diz que todas as ondas esféricas particulares formadas terão uma tangente comum que será a reta BN, e essa tangente representa a onda se propagando no corpo transparente.

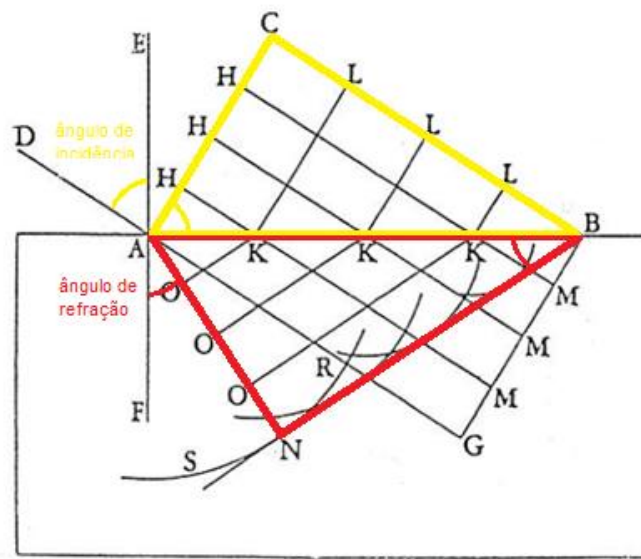


Figura 05: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração.

Texto e Figura 3 (Newton)

Primeira parte

1º trecho

Definição IV

Ângulo de incidência é o ângulo em que a reta descrita pelo raio incidente forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência. (NEWTON, 1996, p. 40)

Definição V

Ângulo de reflexão ou refração é o ângulo em que a reta descrita pelo raio refletido ou refratado forma com a perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência. (NEWTON, 1996, p. 41)

Aqui Newton define de maneira clara e objetiva que o ângulo que o raio incidente forma com a perpendicular é chamado de ângulo de incidência, e o que o de refração forma com a perpendicular é chamado de ângulo de refração.

2º trecho

Definição VI

Os senos de incidência, reflexão e refração são os senos dos ângulos de incidência, reflexão e refração. (NEWTON, 1996, p. 41)

Essa definição ele utiliza para explicar as nomenclaturas que surgem em seu texto.

3º trecho

Axioma IV (Óptica)

A refração do meio mais rarefeito para o meio mais denso se dá em direção à perpendicular, isto é, de forma que o ângulo de refração seja menor do que o ângulo de incidência. (NEWTON, 1996, p. 42)

O que Newton quer dizer aqui é que quando o raio de luz muda de um meio menos denso para um mais denso, esse raio tende a se aproximar da reta perpendicular.

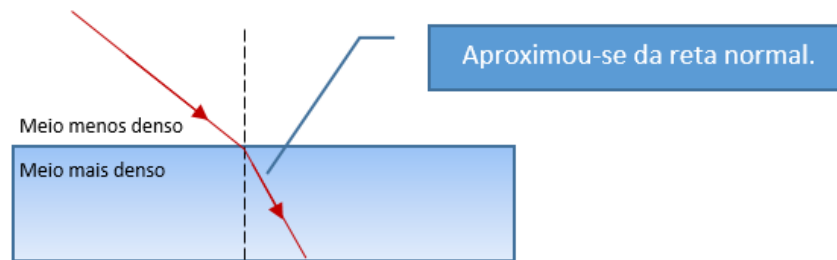


Figura 06: Representação do desvio do raio de luz.

4º trecho

Axioma V

O seno de incidência está para o seno de refração em uma certa razão precisa ou muito aproximada. (NEWTON, 1996, p. 42)

Neste ponto, Newton enuncia a lei dos senos que será discutida a seguir.

5º trecho

Suponhamos então que RS representa a superfície de água estagnada e que C é o ponto de incidência, no qual qualquer raio vindo no ar através do ponto A, da reta AC, é refletido ou refratado, e sei para onde esse raio irá depois de refletido ou refratado; do ponto de incidência situado na superfície da água levanto a perpendicular CP e prolongo-a para baixo até Q; (NEWTON, 1996, p. 43)

Neste trecho Newton apenas explica como constrói a figura representada a seguir, trata-se de uma superfície plana onde ele faz incidir um raio, o qual chama de AC, e no ponto de incidência traça uma reta perpendicular, a qual chama de CP.

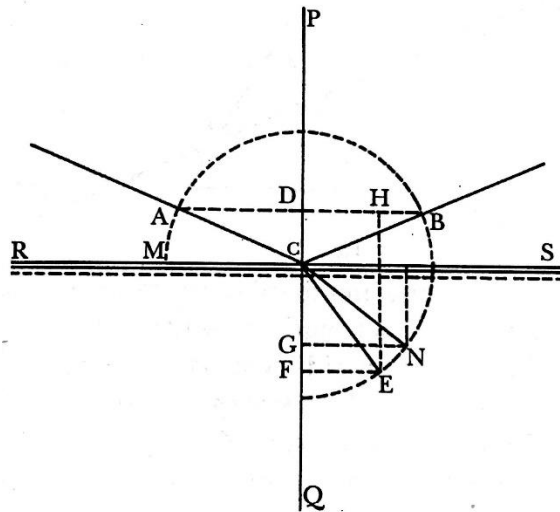


Figura 07: Representação da refração para Newton (NEWTON, 1996, p. 43).

6º trecho

Mas se eu quizer o raio refratado, prolongo AD até H de forma que DH possa estar para AD assim como o seno da refração está para o seno de incidência, isto é (se a luz for vermelha), assim como 3 está para 4; e ao redor do centro C e no plano ACP, como o raio CA descrevendo um círculo ABE, obtenho uma paralela à perpendicular CPQ com a reta HE cortando a circunferência em E e ligo CE, esta linha CE é a reta do raio refratado. Prolongando EF perpendicularmente à reta PQ, essa linha EF é o seno de refração do raio CE, o ângulo de refração sendo ECQ, este seno EF é igual a DH, e consequentemente está para o seno de incidência AD assim como 3 está para 4. (NEWTON, 1996, p. 44)

Aqui Newton indica como obtém a razão entre os senos de incidência e de refração. Ele prolonga a reta AD até H, de modo que DH corresponda a $\frac{3}{4}$ de AD, então desenha uma circunferência com centro em C e que passa pelo ponto A, e então traça uma reta perpendicular a partir do ponto H até encontrar a circunferência para formar o ponto E. A partir de E traça uma perpendicular à reta PQ e chama de EF, de modo que EF seja igual a DH. Como AD e EF representam os senos dos ângulos ACP (ângulo de incidência) e ECQ (ângulo de refração), respectivamente, e está na razão de $\frac{3}{4}$, pode-se dizer que a razão entre os senos de incidência e refração também está na razão de 3 para 4.

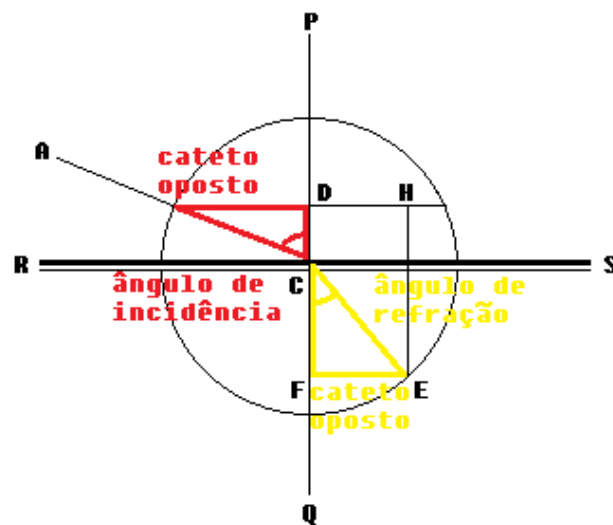


Figura 08: Estão representados os triângulos utilizados na relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração.

Segunda parte

1º trecho

Proposição 9

“Os corpos refletem e refratam a luz em virtude de uma mesma força, exercida variadamente em várias circunstâncias.” (NEWTON, 1996, p. 203)

Neste trecho Newton afirma a causa da reflexão e refração por meio de uma força que será exercida pelo material refletor/refrator.

2º trecho

“[...] a luz é alternadamente refletida e transmitida por lâminas finas de vidro através de muitas sucessões, à medida que a espessura da lâmina aumenta numa progressão aritmética. Pois aqui a espessura do vidro determina se a força pela qual o vidro atua sobre a luz fará com que ela seja refletida ou permitirá que seja transmitida.” (NEWTON, 1996, p. 203)

Para Newton a reflexão e a refração ocorrem por meio de uma mesma força, o que determina se essa força irá refratar ou refletir o raio de luz é o seu poder refrator, que nesse caso do exemplo está relacionado com a espessura do vidro.

3º trecho

Proposição 10

“Se a luz for mais veloz nos corpos do que no vácuo, na proporção dos senos que medem a refração dos corpos, as forças dos corpos para refletir e refratar a luz serão muito aproximadamente proporcionais às densidades dos mesmos corpos, exceto que os corpos oleosos e sulfurosos refratam mais do que outros da mesma densidade.” (NEWTON, 1996, p. 44)

Nesta proposição, Newton afirma que quando a luz se move mais rápido nos corpos do que no vácuo, a força que está relacionada com a refração é proporcional à densidade do corpo.

4º trecho

“Seja AB a superfície plana refratora de qualquer corpo e IC um raio que incide muito obliquamente sobre o corpo em C, de forma que o ângulo ACI possa ser infinitamente pequeno, e seja CR o raio refratado.” (NEWTON, 1996, p. 204)

“[...] se CR representa o movimento do raio refratado, e esse movimento for dividido em dois movimentos CB e BR, dos quais CB é paralelo ao plano refrator e BR perpendicular a ele, CB representará o movimento do raio incidente e BR o movimento gerado pela refração, como os ópticos tem explicado ultimamente. ” (NEWTON, 1996, p. 204)

Neste trecho, Newton explica a figura, na qual temos um raio que incide no ponto C e é refratado até o ponto R. Segundo a descrição, esse raio incidente forma um ângulo tão pequeno com a reta normal que é praticamente paralelo à linha AB.

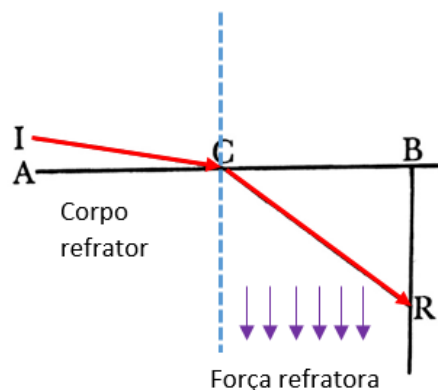


Figura 09: Raio de luz sofrendo refração e a representação da força refratora (NEWTON, 1996, p. 204, ADAPTADO).

5º trecho

“Ora, se qualquer corpo ou coisa, movendo-se através de um espaço qualquer de uma dada extensão e terminado em ambos os lados por dois planos paralelos, for estimulado para frente em todas as partes desse espaço por forças que tendam diretamente para frente em direção ao último plano e que, antes de sua incidência no primeiro plano, não tinha nenhum movimento em direção a ele, ou tinha apenas um movimento infinitamente pequeno; e se as forças existentes em todas as partes desse espaço entre os planos forem iguais umas às outras a distâncias iguais dos planos, mas a distâncias diversas forem maiores ou menores em qualquer proporção dada, o movimento gerado pelas forças na passagem completa do corpo ou coisa através do espaço estará numa proporção subduplicada das forças, como os matemáticos entenderam facilmente.” (NEWTON, 1996, p. 204)

Neste trecho, Newton diz que quando o raio incide quase que paralelamente à linha AB, praticamente todo o movimento perpendicular que esse raio adquire (direção de BR) vem da ação da força refratora, estimulando-o para frente, no sentido de B para R. E ele afirma que após a passagem completa do raio, sofrendo a ação dessa força que age em todas as partes do material, a velocidade adquirida na direção perpendicular será proporcional à raiz quadrada da força refratora.

“Portanto, se no espaço de atividade da superfície refratora do corpo for considerado como tal espaço, o movimento do raio gerado pela força refratora do corpo durante sua passagem através desse espaço (isto é, o movimento BR) deve estar numa proporção subduplicada dessa força refratora. Digo, portanto, que o quadrado da linha BR, e por consequência a força refratora do corpo, é muito aproximadamente proporcional à densidade do mesmo corpo.” (NEWTON, 1996, p. 205)

Neste trecho, Newton reafirma o que disse no trecho anterior, e diz que sendo assim, a força refratora do corpo é aproximadamente proporcional à densidade.

6º trecho

Proposição XCV. Teorema XLIX. (Principia)

“[...] afirmo que a velocidade do corpo antes de sua incidência está para a sua velocidade após a emergência como o seno de emergência para o seno de incidência.” (NEWTON, 2016, p. 291)”

Nesta proposição Newton descreve a lei dos senos da refração para um corpo sólido. E como já vimos anteriormente, no próprio livro, em um escólio ele diz que o mesmo vale para a luz.

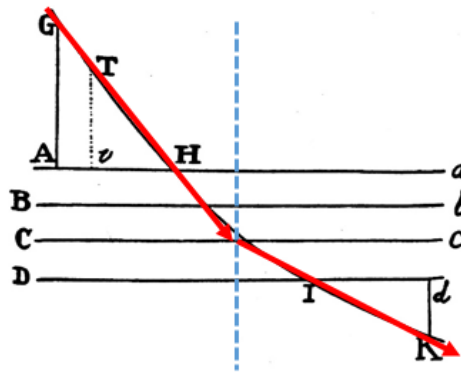


Figura 10: Trajetória da refração de um corpo sólido comparado à refração da luz (NEWTON, 2016, p. 291, ADAPTADO).

7. ANEXOS

ANEXO A – Câmera “Pinhole”

Como extensão dessa proposta sugere-se que o professor crie uma oficina de fotografia “*Pinhole*”⁴ com os alunos. A ideia é aproveitar o experimento para discutir a propagação retilínea da luz e formação de imagens e proporcionar bons momentos de diversão aguçando o espírito de fotógrafos profissionais que os alunos têm. Como sugestão, segue um roteiro do experimento.

“Câmera *Pinhole*”

- **Materiais**

- 1 lata de alumínio ou 1 caixa que não entre luz;
- 1 folha de papel fotográfico;
- 1 pedaço de papel cartão preto ou tinta preta;
- 1 prego e 1 martelo – para fazer um furo na lata;
- 1 lata de refrigerante vazia;
- 1 lixa;
- revelador fotográfico;
- interruptor fotográfico;
- fixador fotográfico;
- fita adesiva preta.

- **Como fazer a *pinhole*:**

- Cole o papel cartão dentro da lata para que não entre absolutamente luz nenhuma. Se estiver usando tinta, pinte todo seu interior. Não se esqueça de que a tampa também deve ficar preta!
- Faça um furo na parte lateral da lata usando o prego. Com a lixa, tire as rebarbas de alumínio que ficaram.
- Faça um pequeno quadrado com o alumínio da lata de refrigerante e cole do lado de fora da sua máquina fotográfica. Não se esqueça de fazer um furinho, bem pequenininho, no meio desse quadrado.

⁴ Este experimento foi retirado da página: <http://www.manualdomundo.com.br/2012/11/camera-fotografica-caseira-pinhole-de-lata/>. Maiores instruções poderão ser obtidas assistindo ao vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=Xt3Cdq0qOns>.

- Cole o quadrado de alumínio na lata. Não se esqueça de alinhar os furos! Em seguida, do lado de fora, tampe o furo com a fita adesiva.
- Coloque o papel fotográfico dentro da lata.

- **Dicas**

Sobre o papel fotográfico para a *pinhole*:

O papel fotográfico preto e branco, o que usamos para tirar fotos na *pinhole*, é encontrado em lojas especializadas. Normalmente, encontramos o papel nos tamanhos 9cm x 14cm ou 10cm x 15cm.

O papel deve ser manuseado em um quarto escuro, que não tenha nenhuma entrada de luz. Caso contrário, o papel estragará. Para iluminar o quarto, use apenas uma lâmpada vermelha de 15W, já que a luz vermelha não estraga esse tipo de papel.

No quarto escuro, prenda o papel fotográfico na região interna da lata oposta ao furo. Tampe muito bem a lata.