

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



**DO POSITIVO AO NEGATIVO: UTILIZANDO FERRAMENTAS  
COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE  
(META)MATERIAIS REFRAATIVOS**

**Carina de Freitas Velloso Nozela**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação PROFIS-São Carlos no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora:

Profa. Dra. Ducinei Garcia

**São Carlos**

Agosto/2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar  
Processamento Técnico  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N961p Nozela, Carina de Freitas Velloso  
Do positivo ao negativo : utilizando ferramentas computacionais e experimentação para a simulação de (meta)materiais refrativos / Carina de Freitas Velloso Nozela. -- São Carlos : UFSCar, 2017.  
92 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.

1. Ensino de física. 2. Simulação. 3. Modelagem matemática. 4. Experimentação. 5. Refração. I. Título.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Carina de Freitas Velloso Nozela, realizada em 22/08/2016:

---

Profa. Dra. Ducinei Garcia  
UFSCar

---

Profa. Dra. Nilva Lúcia Lombardi Sales  
UFTM

---

Prof. Dr. Eriton Rodrigo Botero  
UFGD

Dedicatória:

Ao meu esposo Weverton, que além de me incentivar aos estudos, me apoiou e esteve ao meu lado em mais uma etapa de minha vida.

Aos meus pais, Fátima e Antônio, pelo amor, paciência, apoio, sempre me proporcionando uma estrutura sólida, que me fez alcançar meus objetivos e superar meus limites.

Às minhas irmãs Daniele e Juliana, pela união e amizade, estando ao meu lado sempre que preciso.

Ao meu afilhado Enzo, pela constante alegria que me proporciona mesmo nos momentos difíceis e pela paciência durante minhas ausências, necessárias para o término deste trabalho.

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha orientadora Professora Dra. Ducinei Garcia, pela liberdade, paciência e confiança ao me orientar, sempre me incentivando em todos os momentos. Um exemplo de profissional e mulher que levarei para toda a vida.

A todos os professores do Mestrado Profissional da UFSCar, pela valiosa contribuição a minha formação.

Aos meus colegas de Mestrado, Bruno, Fernando, João, Nivaldo, Renato, e Rodrigo, pelo companheirismo durante toda a nossa trajetória, e especialmente ao Herbert pela colaboração com este trabalho.

A escola COC da cidade de Araraquara/SP e ao colégio Objetivo da cidade de Guariba/SP pelo apoio e confiança em meu trabalho, em especial aos alunos que se dedicaram espontaneamente durante a aplicação das atividades desenvolvidas neste projeto.

Aos alunos, funcionários e colegas professores da escola Estadual Adolpho Thomas de Aquino da cidade de Motuca/SP, que me proporcionaram momentos de alegria e realização profissional.

À CAPES pelo apoio financeiro por meio da bolsa concedida.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta Dissertação.

*Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre.*  
(Tradução: *Na vida, nada a temer, tudo é compreender.*)

- Marie Curie

## **RESUMO**

### **DO POSITIVO AO NEGATIVO: UTILIZANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE (META)MATERIAIS REFRAATIVOS**

Carina de Freitas Velloso Nozela

Orientadora:

Profa. Dra. Ducinei Garcia

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação PROFIS-São Carlos no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de simulações de fenômenos físicos com modelagem matemática e experimentação. O tema escolhido foi óptica geométrica para, entre outras razões, tentar se reverter o pouco interesse dos alunos pelo assunto. Mais especificamente foram estudados conceitos relacionados à refração da luz, desde ideias iniciais até aplicações mais recentes relacionadas ao índice de refração negativo em metamateriais. Foi realizado um levantamento, tanto na literatura como entre os alunos, de concepções alternativas sobre óptica geométrica, como transmissão, reflexão e refração da luz. Com esse diagnóstico, analisou-se alguns softwares, plataformas e simuladores educacionais de uso livre (Simulações do PhET – Interactive Simulations, Easy Java Simulations, Geogebra, Algodoo, Modellus e suas versões e o Scraatch), a fim de encontrar qual deles teria o melhor desempenho inseridos nos objetivos do trabalho. Foi escolhido o software Modellus-X, por apresentar a possibilidade de construção de ferramentas com várias representações de uma mesma situação, explorando ou construindo, ao mesmo tempo, equações, tabelas, gráfico e animações, tanto para modelagens exploratórias como expressivas. Por fim, a partir do produto educacional apresentado neste trabalho, que representa um conjunto de simulações, experimentos e modelagem matemática, pretendeu-se estimular o aprendiz ao ensino de Física, e tentar lhe proporcionar uma melhoria no processo ensino/aprendizagem.

Palavras-chave: Ensino de Física, simulação, modelagem matemática, experimentação, refração, software Modellus-X.

São Carlos

Agosto/2016

# **ABSTRACT**

## **FROM POSITIVE TO THE NEGATIVE: USING COMPUTER TOOLS AND EXPERIMENTS FOR THE SIMULATION OF REFRACTIVE (META)MATERIALS**

Carina de Freitas Velloso Nozela

Supervisor:

Profa. Dra. Ducinei Garcia

Abstract to the master's thesis submitted to the Graduate Program PROFIS-Sao Carlos, under the National Graduate Program in Physics Teaching (MNPEF), as one of the requirements for obtaining the Master's Degree in Physics Teaching.

This work aims at the development of physical phenomena simulations associated to mathematical modeling and experimentation. The choice of geometrical optics is due, among other reasons, to the need for raising the students' awareness concerning this important Physics theme. Concepts related to the refraction of light were studied, from basic notions to more complex applications like the negative refraction index in metamaterials. A survey was conducted, both in literature and among students, to diagnose existing misconceptions regarding transmission, reflection and refraction of light. In view of the survey results, we analyzed some educational software available for free use (Simulations PhET - Interactive Simulations, Easy Java Simulations, Geogebra, Algodoo, Modellus and their versions and Scratch) to determine which one would be most suitable to the objectives of this work. Modellus-X was chosen because it features construction tools with various representations of the same situation, exploring or building, at the same time, equations, tables, graphics and animations, whether for exploratory or expressive modeling. The set of simulations, experiments and mathematical models presented in this paper is meant to encourage the learner to investigate diverse possibilities within Physics learning, and provide him with an enhanced teaching/learning process.

Keywords: Physics teaching, simulation, mathematical modeling, experimentation, refraction, Modellus-X software.

São Carlos

August 2016



## Sumário

Capítulo 1 Introdução .....	1
Capítulo 2 Concepções alternativas dos estudantes que afetam a aprendizagem de conceitos de óptica geométrica .....	4
2.1 Concepções alternativas .....	4
2.2 Concepções alternativas em óptica geométrica .....	5
Capítulo 3 A combinação de modelagem matemática, recursos computacionais e experimentação com o propósito de favorecer a aprendizagem no ensino de Física .....	20
3.1 Aprendizagem no ensino de Física .....	20
3.2 Diretrizes curriculares relacionadas ao Ensino Médio .....	23
3.3 Modelagem matemática, simulações e experimentação e o uso de tecnologias digitais .....	26
Capítulo 4 Desenvolvimento do trabalho .....	29
4.1 Escolha do <i>software</i> /simulador/plataforma educacional .....	29
4.1.1 Critérios de avaliação do <i>software</i> /simulador/plataforma educacional ..	29
4.1.2 Complementação ao teste LORI de acordo com o objetivo do trabalho	33
4.2 O Currículo do Estado de São Paulo e diagnóstico das concepções alternativas .....	38
4.2.1 Ensino da óptica geométrica segundo o currículo do Estado de São Paulo .....	38
4.2.2 Questionário diagnóstico .....	40
4.3 Desenvolvimento de simulações e experimentos .....	43
4.3.1 Organização das atividades e ferramentas educacionais .....	43
4.3.2 Desenvolvendo as atividades sobre “Fenômenos separados” .....	44
4.3.2.1 A lei do inverso do quadrado da distância para a intensidade luminosa .....	44
4.3.2.2 Medindo e analisando a intensidade luminosa de fontes puntiformes .....	49
4.3.2.3 Medindo e analisando reflexão, refração e absorção da luz .....	55
4.3.3 Desenvolvendo as atividades sobre “O Fenômeno da Refração” .....	56
4.3.3.1 Conceitos sobre refração: do índice positivo ao negativo .....	57

4.3.3.2 “Experimentando” sobre refração com o software Modellus-X.....	66
4.3.4 Desenvolvendo as atividades sobre “Reflexão Interna Total” .....	72
4.3.5 Desenvolvendo as atividades sobre “Imagem Aparente” .....	73
Capítulo 5 Considerações Finais.....	77
Referências .....	82
Apêndice A Questionário diagnóstico, para a investigação de concepções alternativas dos alunos sobre os principais conceitos em óptica geométrica .....	87
Apêndice B Tabela de avaliação de plataformas/softwarees .....	90
Apêndice C Tutorial para o pacote de simulações: “Do positivo ao negativo: utilizando ferramentas computacionais e experimentação para simulações de (meta)materiais refrativos” .....	92

# Capítulo 1

## Introdução

No cenário atual de nossa sociedade, os jovens estão inseridos em um mundo repleto de tecnologias de informação e de comunicação (*TICs*). Passam a maior parte do tempo conectados à *internet*, inclusive com o uso de dispositivos móveis como *tablets* e *smartphones*, informando-se e realizando trocas sociais com influências na aprendizagem e no acúmulo de conhecimentos. Assim, em geral e compreensivelmente, não se sentem mais atraídos por um ensino tradicional, em que o professor é “quem sabe e informa” e, ainda, baseado em lousas e cadernos.

É fato, atualmente, que as escolas de ensino básico estão adeptas ao uso de tecnologias no ensino. Em todas as escolas de atuação da autora, tanto da rede particular de ensino como da pública, existe ao menos um kit multimídia e salas com computadores. Tanto que, em uma dessas escolas, a da rede privada, os alunos recebem um *tablet* ao realizar a matrícula no Ensino Médio. Contudo, embora o acesso à tecnologia esteja aumentado, como uma opção dos próprios projetos político-pedagógicos das escolas, a autora percebe dificuldades dos professores em explorar os recursos de *TICs* em suas mais diversas potencialidades para o ensino. Geralmente, os computadores e *tablets*, assim como as redes de comunicação e informação, são utilizados para extrair informações relacionadas aos conteúdos das disciplinas, com estímulos aos estudantes de realizarem o mesmo, ou substituindo o livro didático impresso pelo livro digital. Desta forma, tal uso faz com que o ensino continue sendo ainda o tradicional.

Por outro lado, particularmente no que tange o ensino de disciplinas de Ciências Exatas, pela prática da autora, percebe-se que, muitas vezes, os alunos não se sentem motivados em aprender Física porque, de acordo com eles, a disciplina tem muita matemática. Acredita-se que isto ocorra porque eles não entendem o significado físico dos modelos matemáticos, uma vez que, expostos a um ensino tradicional e de lousa e giz, predominam as aulas com aplicações de equações apenas para obter resultados de problemas sem a devida contextualização. Contudo, da realidade docente da autora, pode-se afirmar que os estudantes ainda se sentem motivados ao uso de experimentos. Assim, uma combinação do uso adequado de recursos computacionais, de *TIC* e de experimentação poderia resultar em forma mais motivadora para o ensino de Física. Por exemplo, Medeiros et al. (2002) propõem o

uso da experimentação atrelado à análise dos dados mediante modelos matemáticos e simulações computacionais, para que o aluno passe a analisar graficamente os resultados obtidos, bem como interpretar e analisar os parâmetros e variáveis que representa o fenômeno físico.

Pelo exposto acima, o presente trabalho objetivou unir tecnologias computacionais à experimentação, desenvolvendo ou utilizando simulações de fenômenos físicos a partir de modelagem matemática e de dados de experimentos reais, para despertar o interesse dos alunos pelo aprendizado de Física e de lhes proporcionar uma aprendizagem mais significativa. O assunto escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, foi a óptica geométrica, com ênfase nos conceitos de refração da luz, pois pela própria experiência da autora, lecionando Física para anos finais do Ensino Fundamental e do Ensino Médio, verifica-se um desinteresse maior dos alunos em estudar esse tema, sendo considerada por eles, chato e difícil.

No segundo capítulo, apresenta-se uma pesquisa bibliográfica feita sobre as principais concepções alternativas em óptica geométrica. Também, foram considerados conceitos gerais sobre a natureza da luz e suas formas de propagação, assim como conceitos específicos sobre refração da luz.

No terceiro capítulo, inicialmente, são discutidas de forma geral ideias sobre aprendizagem e metodologias aplicadas ao ensino de Física. Em seguida, são discutidas metodologias de experimentação e uso de tecnologias no ensino de Física, de acordo com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Brasileira (LDB) e do currículo de Estado de São Paulo. Por último, expõe-se as principais ideias relacionadas à experimentação, simulações e modelagem matemática, relacionadas ao ensino de ciências.

No quarto capítulo, expõem-se e discutem-se as três etapas que constituíram o desenvolvimento do trabalho. Na primeira etapa, escolheu-se, entre plataformas, simuladores e softwares educacionais livres (Simulações do PhET – Interactive Simulations, Easy Java Simulations, Geogebra, Algodoo, Modellus e suas versões e o Scratch), qual se adequava mais ao desenvolvimento do projeto, de acordo com os objetivos do trabalho e segundo critérios de avaliação do LORI (Learning Object Review Instrument) <sup>1</sup> e da própria autora. Como subproduto deste

---

<sup>1</sup> O LORI (*Learning Object Review Instrument*) é um instrumento utilizado mundialmente para a avaliação de objetos de aprendizagem (OA) (Vargo et al., 2003).

trabalho, elaborou-se uma tabela de avaliação para os softwares/simuladores/plataformas educacionais, segundo critérios propostos pela autora e que complementam os do LORI (Apêndice A). Na segunda parte, construiu-se um teste para diagnosticar as principais concepções alternativas dos alunos em óptica geométrica, com ênfase em conceitos de refração. Dessa etapa, um subproduto educacional foi gerado, representado por um questionário diagnóstico (Apêndice B), que pode ser aplicado de forma integral ou adaptada por colegas professores e interessados. Finalmente, na terceira parte foram desenvolvidas situações-problemas, envolvendo experimentação, modelagem matemática e simulações, com o software escolhido, considerando-se as principais concepções alternativas levantadas sobre conceitos que envolvem a natureza e a refração da luz. Esses materiais encontram-se *on-line*, com acesso público e gratuito, conjuntamente com um guia tutorial (Apêndice C) que traz as orientações para a sua utilização.

No quinto capítulo, apresentam-se as considerações finais sobre este trabalho, incluindo-se comentários aos resultados observados quanto à motivação dos alunos ao aplicar-se os produtos em aulas ministradas pela autora para uma turma de 14 alunos, do segundo ano do Ensino Médio, de uma escola da rede particular de ensino, que já havia estudado óptica geométrica de forma tradicional, mas sem atividades com experimentos ou simulações.

## **Capítulo 2**

### **Concepções alternativas dos estudantes que afetam a aprendizagem de conceitos de óptica geométrica**

Neste capítulo, abordam-se algumas das principais concepções alternativas de estudantes (de Ensino Fundamental, Médio e Superior) relacionadas aos conceitos de óptica geométrica, baseadas em uma revisão da literatura e na experiência profissional da autora. Ver-se-á como essas ideias sem embasamento científico, que incluem conceitos da natureza da luz, podem influenciar negativamente o processo de ensino-aprendizagem de conteúdos básicos da Física como refração da luz, que é tema desse trabalho. Em um primeiro momento, serão discutidas as principais concepções relacionadas à natureza da luz e sua propagação e, posteriormente, aos conceitos específicos de refração, os quais são tema do produto educacional gerado neste trabalho.

#### **2.1 Concepções alternativas**

De acordo com experiência profissional da autora, lecionando Física para o Ensino Médio e anos finais do Ensino Fundamental, o conteúdo de óptica geométrica é considerado, por muitos alunos, um segmento chato, difícil e sem importância. Acredita-se que um dos motivos para essa desvalorização se deve à uma ênfase no ensino tradicional e mecanizado do tema, no qual o estudante apenas decora as equações e as aplica em listas enormes de exercícios repetitivos, com o objetivo de chegar em uma solução final sem análises e interpretações dos resultados e conceitos físicos envolvidos. Além disso, nesse tipo de ensino dificilmente são consideradas as concepções alternativas dos estudantes, as quais podem prejudicar a efetividade do aprendizado do aluno, como se discutirá a seguir.

No entanto, o que são concepções alternativas? Para Almeida, Abs e Soave (2007) “concepções alternativas são modelos, construtos, significados contextualmente errôneos, ou seja, não compartilhados pela comunidade científica”. Essas concepções podem ocorrer por meio de vivências do cotidiano, nas quais os indivíduos tentam esclarecer os fenômenos naturais sem embasamento científico ou até mesmo com explicações fundamentadas em crenças populares. Os meios de

comunicação podem prejudicar ainda mais essas concepções, quando não informam de forma clara e científica algum fato ocorrido. Da mesma forma na escola, mesmo após instrução formal, o estudante pode produzir concepções alternativas ou até mesmo reforçá-las, caso um determinado assunto não seja compreendido corretamente.

Nas pesquisas em ensino de ciências, existem alguns termos utilizados para representar as ideias pré-existentes nos alunos, tais como “conceitos intuitivos”, “ideias prévias”, “concepções espontâneas”, “ideias ingênuas” e “concepções alternativas”. Em Teodoro (2000) esses termos são utilizados como sinônimos. Neste trabalho, o termo “conhecimento prévio” será utilizado para representar todo conhecimento que o aluno tem, com ou sem embasamento científico, enquanto que “concepção alternativa” fará referência às concepções não aceitas pela comunidade científica, apresentadas pelos alunos, tanto antes quanto após a instrução formal.

As concepções alternativas ocorrem independentemente da idade ou do nível de escolaridade dos estudantes e podem ser difíceis de mudar mesmo após instrução formal. Segundo Moreira e Greca (2003) as concepções alternativas são “resistentes à mudança” uma vez que são aprendidas de modo significativo. Por exemplo, o calor muitas vezes é entendido inadequadamente por “calórico”, uma substância, e não como transferência de energia, e as estações do ano explicadas pela variação da distância da Terra ao Sol e não pela inclinação fixa do eixo da Terra em relação à sua trajetória ao redor do Sol.

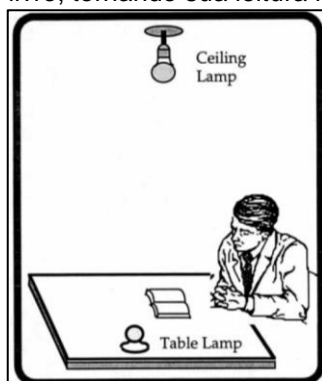
## **2.2 Concepções alternativas em óptica geométrica**

Em trabalho realizado por Harres (1993), foi aplicado um teste de lápis e papel para verificar se estudantes possuíam concepções científicas corretas em relação à óptica geométrica. A pesquisa foi realizada com 152 alunos que já haviam recebido instrução formal em óptica geométrica, dos quais 57 eram do terceiro ano do Ensino Médio (curso de Técnico em Eletrônica da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, Novo Hamburgo - RS) e 95 do Ensino Superior cursando a disciplina de Física III do curso de Engenharia (Pontifca Universidade Católica do Rio Grande do Sul). Verificou-se que os estudantes tinham diversas concepções alternativas, mesmo após terem estudado sobre o assunto. Por exemplo, em uma

questão relacionada à imagem em espelhos planos, do total desses estudantes, somente três concluíram corretamente que o tamanho da imagem é independente da distância do espelho até o objeto.

Geralmente, nos cursos de introdução à óptica geométrica é pouco considerada a discussão sobre a natureza da luz e isso pode dificultar não só o aprendizado na óptica como também em outras frentes da Física. Em uma pesquisa, por meio de um teste, realizado em estudantes do Ensino Médio de Israel, mostrou-se que os alunos possuem dificuldades em explicar corretamente fenômenos relacionados a iluminação e estações do ano, mesmo após terem recebido instrução formal em óptica geométrica. (GALILI; LAVRIK, 1998). Esse teste continha duas perguntas para respostas dissertativas. Na primeira, foi solicitado que os alunos explicassem a causa das estações do ano. Na segunda questão foi apresentada aos estudantes uma figura (Figura 1) em que um homem sentado lia um livro sobre a mesa, com duas lâmpadas disponíveis para iluminação do ambiente: uma fixa no teto e, a outra, na mesa. Enfatizou-se que as duas lâmpadas eram as únicas fontes de luz e ambas geravam o mesmo brilho. Foi perguntado aos alunos, qual das duas lâmpadas forneceria mais luz sobre o livro tornando a leitura mais conveniente. Nas duas questões os alunos foram incentivados a fazer ilustrações para evidenciar melhor suas explicações.

**Figura 1** – Ilustração para teste realizado com alunos do Ensino Médio de Israel, em que se perguntou qual das lâmpadas (“ceiling lamp” ou “table lamp”) disponíveis no ambiente proporcionava mais luz sobre o livro, tornando sua leitura mais conveniente.



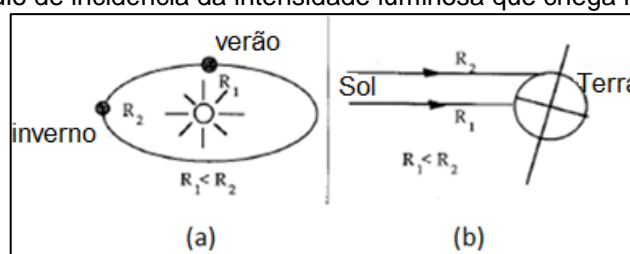
Fonte: Galili e Lavrik (1998)

Nas respostas do teste mencionado acima, quanto a causa das estações do ano, apenas 6% do total de estudantes entrevistados responderam corretamente que as estações dependem do ângulo de incidência da luz na superfície da Terra



devido à inclinação do eixo da Terra em relação à sua trajetória ao redor do Sol. A maioria das respostas e esquemas utilizados dizia respeito à variação da distância da Terra ao redor do Sol, seja devido à trajetória elíptica da Terra em torno do Sol ou somente à inclinação do eixo da Terra. Na Figura 2, são apresentados dois desenhos esquemáticos, feitos pelos alunos, explicando suas concepções sobre o conceito de estações do ano.

**Figura 2** – Representação esquemática inadequada de estudantes para a explicação das estações do ano em resposta à questão do teste aplicado por Galili e Lavrik (1998). Os desenhos apresentam a dependência da distância da Terra ao Sol para explicar o fenômeno. Em (a), a variação da distância acontece devido à forma elíptica da trajetória da Terra ao redor do Sol, enquanto que, em (b), foi levada em consideração a inclinação do eixo da Terra, mas os alunos erraram nessa explicação quando mencionaram que o hemisfério sul está mais próximo no verão ( $R_1 < R_2$ ), sem levar em consideração o ângulo de incidência da intensidade luminosa que chega na superfície da Terra.



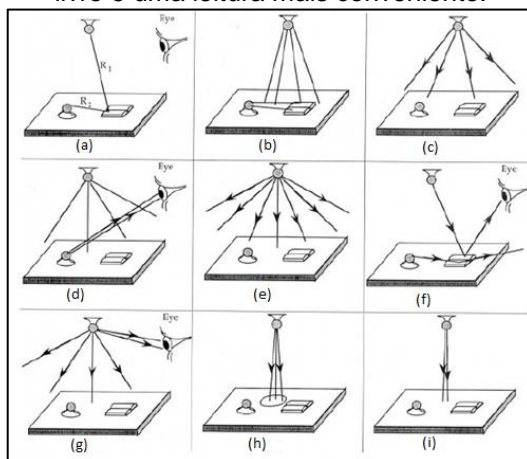
Fonte: Adaptado de Galili e Lavrik (1998)

Em relação à segunda questão do teste de Galili e Lavrik (1998), apenas 8% dos estudantes responderam que a leitura era mais fácil com a iluminação da lâmpada fixa na mesa, por se encontrar mais próxima do livro do que a lâmpada fixa no teto (desenho esquemático da Figura 3a). O restante dos alunos escolheu a luz do teto como resposta, com representações esquemáticas exemplificadas nas Figuras 3b a 3i. A Tabela 1 apresenta as explicações das respostas dos alunos relacionadas a essas figuras.

Para os pesquisadores Galili e Lavrik (1998), a proposta era estudar dois efeitos relacionados ao fluxo de luz incidente numa superfície: o aquecimento e a iluminação. O primeiro causando mudanças climáticas e, o segundo iluminando uma região. Embora exista uma semelhança entre as questões, as respostas dos alunos divergiram muito, enquanto na explicação das estações do ano predominou a variação da distância da Terra em relação ao Sol, na segunda questão a dependência com a distância não foi a resposta mais utilizada. De acordo com os autores da investigação, essa discordância de pensamentos está relacionada a um ensino precário da óptica geométrica, no qual não é levada em consideração a natureza da luz. Por exemplo,

no ensino mais tradicional não se discutem efeitos de iluminação (ou de iluminância) nem sequer conceitos de fluxo de luz para a representação da propagação da luz.

**Figura 3** – Representação esquemática dos estudantes para a explicação da segunda questão do teste de Galili e Lavrik (1998), sobre qual das lâmpadas da Figura 1 proporcionaria mais luz sobre o livro e uma leitura mais conveniente.



Fonte: Adaptado de Galili e Lavrik (1998)

**Tabela 1** – Explicação para os desenhos representados nas Figuras 3b a 3i, em relação as respostas dos alunos à segunda pergunta do teste de Galili e Lavrik (1998), sobre qual das lâmpadas da Figura 1 proporcionaria mais luz sobre o livro.

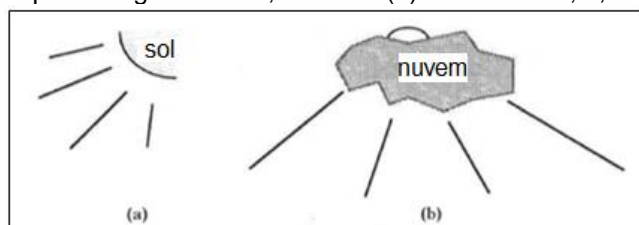
Desenho	Resposta
3b	A lâmpada do teto ilumina todo o livro, enquanto que a da mesa ilumina apenas uma parte.
3c	A lâmpada do teto tem mais direções para iluminar.
3d	A lâmpada da mesa atrapalha a visão do leitor.
3e	A lâmpada do teto irradia mais raios ao redor.
3f	Os raios de luz vindos da lâmpada na mesa não chegam até os olhos do observador.
3g	O observador lê melhor quando está diretamente iluminado.
3h	A lâmpada brilha em linha reta na frente dela.
3i	É mais fácil para a lâmpada do teto iluminar, porque ela cai.

A representação da propagação da luz por retas, ou “raios de luz”, é muito comum para o ensino de óptica geométrica nos livros didáticos (ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013; BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2013; BONJORNIO et al.,2013;

GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2013; LUZ; ÁLVARES, 2013; SANT'ANNA et al., 2013; TORRES, et al., 2013; YAMAMOTO; FUKE, 2013). Pode até auxiliar no processo de ensino e aprendizagem, mas é importante que o professor tome cuidado para que os alunos não interpretem erroneamente a ideia de como usar essa representação.

Segundo Galili e Hazan (2000) muitos estudantes não compreendem a natureza da luz e acreditam que ela é realmente composta por raios. Para os autores isso ocorre porque, além do uso dos modelos de raios, também são muito frequentes o uso e a interpretação inadequados de imagens que induzem esses pensamentos distorcidos da propagação da luz, como representado na Figura 4.

**Figura 4** – Representações comuns que podem induzir concepção alternativa de que a luz solar se dispersa por raios que divergem do Sol, em céu: (a) sem nuvens; e, em (b), com nuvens.



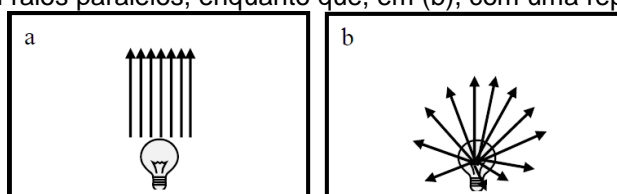
Fonte: Adaptado de Galili e Hazan (2000)

Imagens como as da Figura 4, além de comumente encontradas em livros didáticos (ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013; BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2013; BONJORNO et al., 2013; GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2013; SANT'ANNA et al., 2013; TORRES, et al., 2013; YAMAMOTO; FUKE, 2013), representam um fenômeno típico do cotidiano, podendo facilmente induzir ou até mesmo reforçar a concepção alternativa de que a luz é formada por raios. Assim, a autora deste trabalho acredita que o ensino da óptica geométrica deve ter uma maior atenção quanto ao conceito de dispersão luminosa.

Pela própria experiência da autora, percebe-se que um dos primeiros conceitos ensinados em óptica geométrica é o da propagação retilínea da luz em meios isotrópicos e transparentes, e, a partir dessa análise, representa-se muitas vezes a propagação da luz também por meio de raios, mas inadequadamente sempre paralelos. Almeida, Abs e Soave (2007) apontam uma concepção alternativa em relação a essa abordagem. De acordo com a concepção denominada “raios paralelos”, os alunos geralmente acreditam que os raios de luz que saem de uma fonte

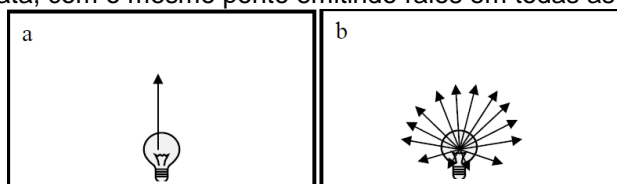
são sempre paralelos, independentemente do tipo de fonte e/ou da distância da fonte ao observador, como representado na Figura 5a. Na Figura 5b, por sua vez, apresenta-se uma representação mais adequada, uma vez que todos os raios divergem de um “mesmo ponto” da fonte luminosa. Segundo os autores, a causa desse erro pode ser devido à disseminação de figuras em livros didáticos que mostram, por exemplo, raios de luz aproximadamente paralelos chegando à superfície da Terra ou, até mesmo, na representação de imagens em espelhos esféricos. Além disso, verificaram que, ao representar raios de luz sendo emitidos de uma fonte, alguns estudantes realmente acreditam que cada ponto da fonte lança apenas um raio de luz (Figura 6a) e não vários (Figura 6b).

**Figura 5** – Representação dos autores da referência Almeida, Abs e Soave (2007) para os tipos de respostas dos estudantes sobre raios de luz gerados por uma fonte próxima ao observador. Em (a), equivocadamente com raios paralelos, enquanto que, em (b), com uma representação mais exata.



Fonte: Almeida, Abs e Soave (2007)

**Figura 6** – Representação dos autores da referência Almeida, Abs e Soave (2007) para os tipos de respostas dos estudantes sobre raios de luz sendo emitidos de cada ponto da fonte. Em (a), erroneamente, cada ponto emite apenas um raio de luz, enquanto que, em (b), a representação é mais exata, com o mesmo ponto emitindo raios em todas as direções.

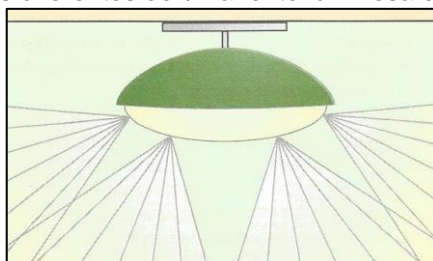


Fonte: Almeida, Abs e Soave (2007)

No Brasil, o Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) avalia as coleções de livros didáticos que poderão ser utilizados por professores da Educação Básica, na rede pública de ensino, nos três segmentos (anos iniciais do Ensino Fundamental, anos finais do Ensino Fundamental e Ensino Médio). Posteriormente à avaliação dos livros, o Ministério da Educação (MEC) disponibiliza um guia contendo as resenhas das coleções aprovadas pelo PNLD, para que os professores da rede Estadual de Ensino possam escolher os livros que irão trabalhar nos próximos três anos, em cada disciplina. Nos livros didáticos disponíveis nas escolas de atuação profissional da autora (ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013; BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2013;

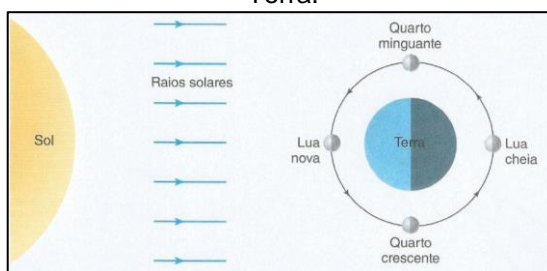
BONJORNO et al.,2013; GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2013; LUZ; ÁLVARES, 2013; SANT'ANNA et al., 2013; TORRES, et al., 2013; YAMAMOTO; FUKE, 2013), que estão inseridos na lista do PNLD, do ano de 2015, verificou-se que a maioria das figuras, usadas para representar a trajetória da luz, pode favorecer as concepções alternativas discutidas acima. Notou-se que, em poucos casos, houve a preocupação de se utilizar o conceito de raios luminosos de forma mais exata. Como exemplo de exceção, no livro didático de Bôas, Doca e Biscuola (2013), encontra-se uma representação mais adequada da emissão de luz, na qual vários raios são emitidos de cada “ponto” de regiões diferentes de uma fonte extensa (Figura 7). Geralmente, predominam-se figuras com raios paralelos representando a trajetória da luz, tanto chegando na superfície da Terra, como refletindo-se de objetos (Figuras 8 e 9).

**Figura 7** – Representação da emissão de vários raios divergentes saindo de um mesmo ponto em regiões diferentes de uma fonte luminosa extensa.



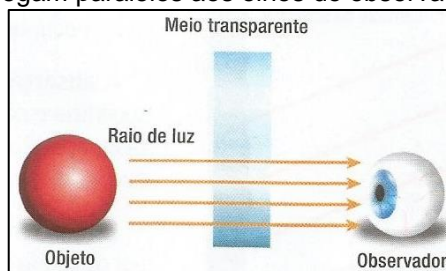
Fonte: Bôas, Doca e Biscuola (2013)

**Figura 8** – Representação da propagação de luz solar por raios que chegam paralelos à superfície da Terra.



Fonte: Torres et al. (2013)

**Figura 9** – Representação da propagação dos raios de luz refletidos por um objeto (à esquerda), que chegam paralelos aos olhos do observador.



Fonte: Artuso e Wrublewski (2013)

Além da concepção alternativa dos “raios paralelos”, discutida acima, Almeida, Abs e Soave (2007) também verificaram uma outra, a dos “conceitos separados da luz”, na qual os estudantes acreditam equivocadamente, por exemplo, que a luz emitida pelo Sol é diferente da luz das lâmpadas. Os estudantes classificam a primeira como natural, enquanto que, a segunda, como artificial, devido ao fato da lâmpada ser fabricada pelo homem.

As concepções alternativas discutidas até agora não esgotam aquelas encontradas para os conceitos de óptica geométrica, mas é possível perceber-se a importância de se realizar mudanças no conteúdo e no processo de ensino-aprendizagem do tema, acrescentado, por exemplo, ideias sobre a natureza da luz, bem como do conceito de fluxo de luz. Uma alternativa poderia ser a introdução do conceito de fluxo de luz ao invés da utilização de apenas raios representando a trajetória da luz. Tal ideia é compartilhada por Galili e Lavrik (1998, p. 609) quando afirmam:

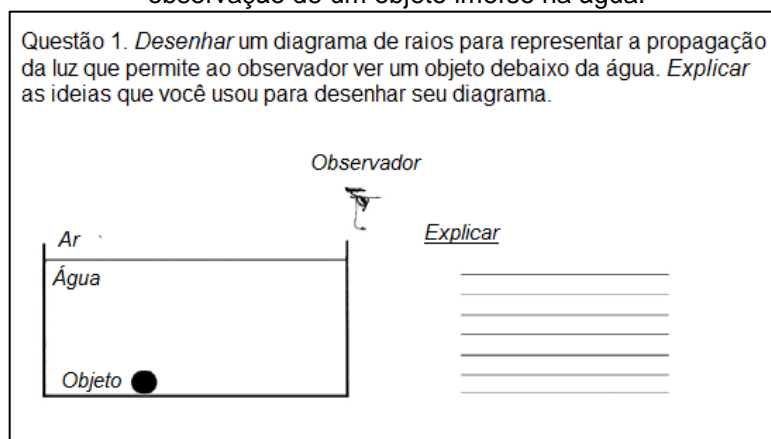
A introdução do conceito de fluxo de luz de modo algum implica num abandono dos raios de luz. Assim, em um curso onde o eletromagnetismo precede óptica, um professor pode introduzir fluxo de luz como uma generalização do fluxo de campos elétricos e magnéticos e relacioná-la com a quantidade de raios interceptando uma área iluminada. (Tradução nossa)

Num trabalho realizado por Keawkhong et al. (2010), foram aplicados testes em duas escolas tailandesas do Ensino Médio, para a verificação de concepções dos estudantes em óptica geométrica. O teste consistia em dezessete questões sobre temas referentes à reflexão e refração da luz. Foram analisadas apenas duas questões do teste, pois, de acordo com os autores, continham respostas mais relevantes. Após análise realizada nas duas questões sobre refração da luz numa interface plana, os autores perceberam, que os estudantes mesmo após instrução (realizada tradicionalmente e sem experimentos), não conseguem aplicar corretamente os conceitos básicos de óptica ao tentar determinar a posição da imagem de um objeto imerso em um aquário contendo água.

A primeira questão do estudo de Keawkhong et al. (2010), tinha a intenção de diagnosticar a capacidade do aluno em construir diagramas de raios de luz relacionando corretamente o observador, objeto e imagem (Figura 10). Na segunda questão o objetivo principal era o de verificar se os alunos conseguiam determinar a posição correta da imagem de um objeto imerso em água (Figura 11). O enunciado

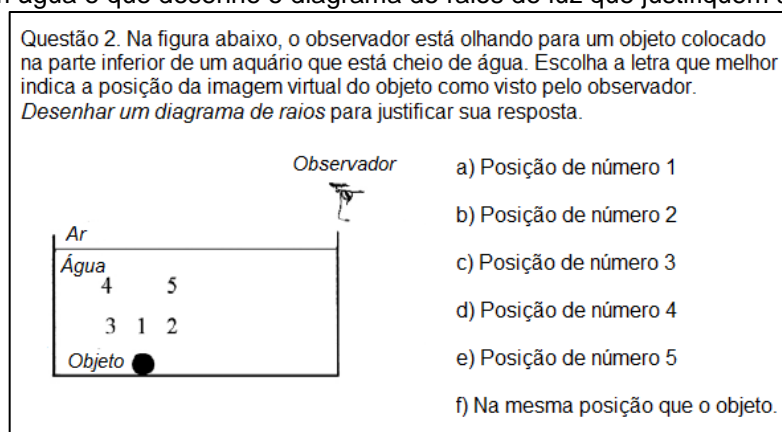
da primeira questão pedia: “Desenhar um diagrama de raios para representar a propagação da luz que permite ao observador ver um objeto debaixo da água. Explicar as ideias que você usou para desenhar seu diagrama”. Para a segunda questão, pedia-se: “Na figura abaixo, o observador está olhando para um objeto colocado na parte inferior de um aquário que está cheio de água. Escolha a letra que melhor indica a posição da imagem virtual do objeto como visto pelo observador. Desenhar um diagrama de raios para justificar sua resposta”.

**Figura 10** – Parte da folha de resposta do teste de Keawkhong et al. (2010), referente à primeira questão que solicita ao aluno o diagrama e a explicação do caminho dos raios de luz para a observação de um objeto imerso na água.



Fonte: Adaptado de Keawkhong et al. (2010)

**Figura 11** – Parte da folha de resposta do teste de Keawkhong et al. (2010), referente à questão que solicita ao aluno que indique a posição, entre as opções propostas, da imagem formada por um objeto imerso em água e que desenhe o diagrama de raios de luz que justifiquem a opção escolhida.

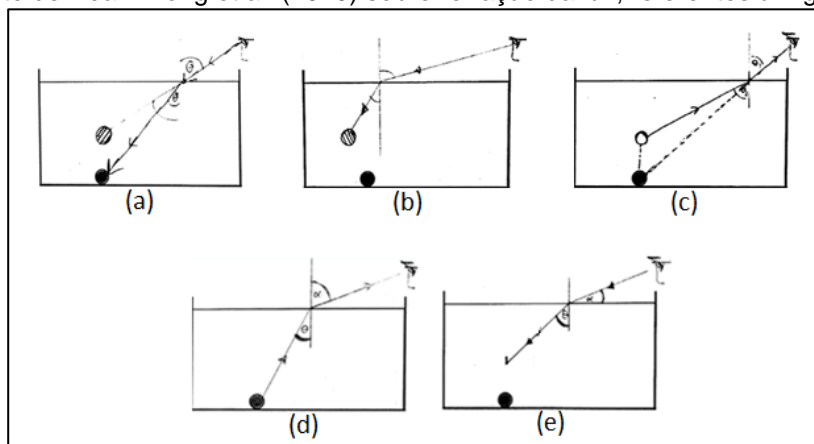


Fonte: Adaptado de Keawkhong et al. (2010)

Na primeira questão, dos 199 alunos submetidos ao teste discutido acima, 29,1% desenharam o raio de luz propagando-se do olho do observador para o objeto (Figura 12a); 25,6 % representaram o raio de luz saindo do olho do observador até a

imagem (Figura 12b); 8,5 % mostraram o raio saindo da imagem até o olho (Figura 12c) e apenas 7 % demonstraram o raio de luz se propagando do objeto para o olho (Figura 12d), mas equivocaram-se ao explicar a imagem formada como sendo visualizada por raio que emerge do olho do observador (Figura 12e).

**Figura 12** – Representações da maioria das respostas dadas pelos alunos para a primeira questão do teste de Keawkhong et al. (2010) sobre refração da luz, referentes à Figura 10.

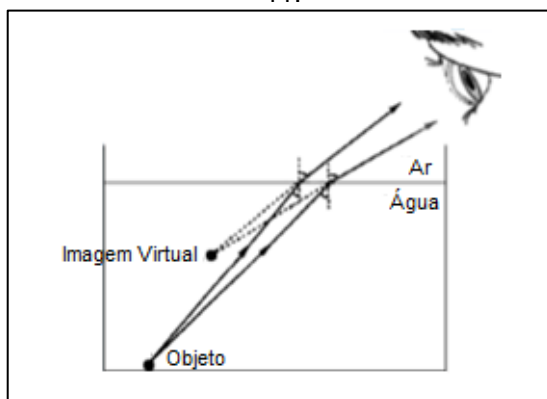


Fonte: adaptado de Keawkhong et al. (2010)

Em relação a segunda questão do teste aplicado e comentado acima, 50,8 % do total de alunos concluíram erroneamente que a localização da imagem virtual, formada pelo objeto imerso na água, seria a posição 1 (Figura 11). Segundo os autores, um motivo para isso ocorrer, seria porque em muitos livros didáticos das escolas da Tailândia existem ilustrações mostrando a localização errada da imagem. Da mesma forma, Keawkhong et al. (2010) comentam que alguns autores de livros didáticos tailandeses, em situações-problema similares, apresentam apenas a imagem virtual quando um observador olha o objeto a um ângulo de  $90^\circ$  em relação à superfície. Acreditam que isto pode confundir os estudantes, induzindo-os a achar que a imagem é formada sempre verticalmente acima do objeto para qualquer ângulo de observação. Acrescentam que uma possível solução seria a de desenhar mais do que um raio para representar o fluxo luminoso e os efeitos da refração para a formação da imagem virtual, como exemplificada na Figura 13.



**Figura 13** – Representação esquemática de raios de luz para indicar a posição da imagem virtual formada por um objeto imerso em água, visualizada por um observador no ar, como exemplo de resposta correta a uma das questões do teste de Keawkhong et al. (2010), representada na Figura 11.

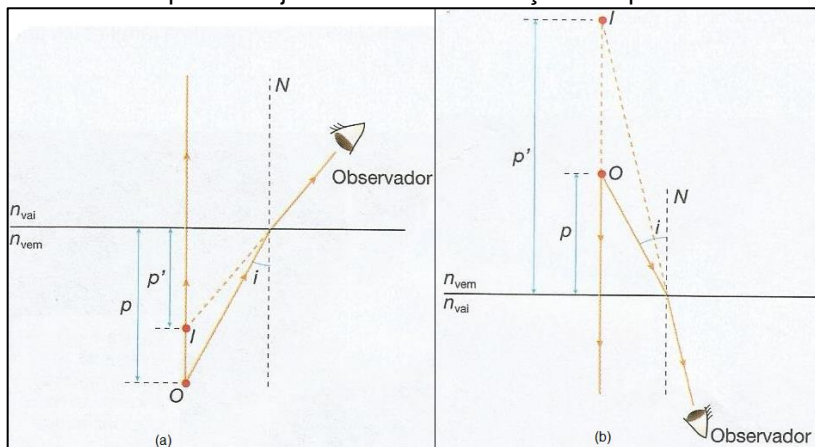


Fonte: Adaptado de Keawkhong et al. (2010)

Novamente, verificando alguns dos livros didáticos para o Ensino Médio (ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013; BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2013; BONJORNO et al., 2013; GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2013; LUZ; ÁLVARES, 2013; SANT'ANNA et al., 2013; TORRES, et al., 2013; YAMAMOTO; FUKU, 2013), dos quais a autora tem acesso e que estão inseridos na lista do PNLD, percebe-se que a maioria deles possuem representações equivocadas sobre as imagens virtuais quando ocorre refração da luz. A Figura 14 mostra exemplos dessas representações, na qual um observador olha para um objeto dentro da água (14a) e outra em que o observador está imerso na água, olhando para um objeto no ar (14b).

A partir do que foi discutido anteriormente e pela prática da autora, pode-se perceber que os estudantes não conseguem explicar as imagens aparentes formadas pela refração da luz. Mesmo após instrução formal, que tradicionalmente é baseado no modelo de raios, os alunos não conseguem, de forma satisfatória, representar a trajetória da luz e formação de imagens. Pela análise das respostas dos alunos para a segunda questão do teste de Keawkhong et al. (2010), discutida acima, torna-se evidente que, para o estudo da refração, também é importante a utilização de mais de um raio, representando o caminho percorrido pela luz. Assim, o uso do modelo de fluxo de luz entre os conceitos fundamentais ensinados na óptica geométrica, como discutido na seção anterior, poderia ser aliado para a desconstrução de concepções alternativas que os alunos têm relacionadas aos efeitos da refração.

**Figura 14** – Representação esquemática equivocada da imagem virtual de um objeto, obtida quando ocorre refração entre os meios água e ar em livro didático do Ensino Médio. Em (a) o observador está imerso no ar, enquanto que em (b) o observador encontra-se na água. Em ambos os casos, as imagens só poderiam ser obtidas, como representadas nas figuras, se o ângulo em que o observador olha para o objeto é de 90° em relação à superfície.



Fonte: Adaptado de Sant'anna et al. (2013)

Em um outro estudo, Singh e Butler (1990) avaliaram as concepções alternativas, especificamente sobre refração, de estudantes do Ensino Médio de Cingapura e iniciantes em graduação em Física de Nova Zelândia. Todos os alunos haviam estudado óptica geométrica como parte do currículo escolar. O trabalho consistiu na aplicação de questionários contendo seis perguntas curtas e claras na intenção de que os alunos não demorassem muito ao responder e não tivessem dúvidas quanto à interpretação das questões. Em uma questão, foi pedido para que os participantes explicassem como ocorre a refração. Dos 35 alunos, 82% consideraram a refração como o desvio da luz incidente em uma interface entre dois meios. Do total de alunos, dois comentaram que, ao incidir perpendicular à interface, a luz também sofre refração e justificaram suas respostas usando a variação de velocidade; quatro usaram a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade no meio como explicação para o índice de refração; e, dos 29 que restaram, 14 alunos utilizaram a relação de Snell<sup>2</sup> como definição para o índice de refração.

Em outra questão do questionário de Singh e Butler (1990), foi pedido que os alunos completassem a trajetória de um raio de luz incidindo em uma superfície plana, considerando todas as direções possíveis. Do total de alunos, 88%

<sup>2</sup> A Lei de Snell ( $n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$ ), na qual  $n_i$  e  $n_r$  são os índices de refração do meio incidente e do meio onde ocorre a refração e  $\theta_i$  e  $\theta_r$  representam os ângulos incidentes e refratados, respectivamente. Foi apresentado primeiramente por Willebrord Snell Van Royen (1591-1626), em uma época na qual os índices de refração eram determinados experimentalmente. Mais tarde, Isaac Newton determinou a Lei de Snell baseando-se em sua teoria corpuscular (HECHT, 2012, p. 133).

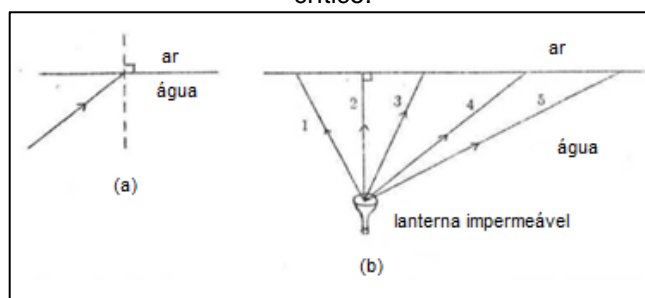
consideraram a ocorrência da refração sem reflexão e, para justificar suas respostas, mencionaram que a reflexão não ocorria uma vez que o raio não estava incidindo em um espelho. Para os pesquisadores desse estudo, essa concepção alternativa dos alunos pode estar sendo construída pelo fato dos livros didáticos do país geralmente apresentarem exercícios cobrando conceitos de apenas um fenômeno óptico de cada vez. Ou seja, por isso os alunos não consideram que ocorra outros fenômenos, por exemplo, de refração, reflexão e absorção, concomitantemente.

Singh e Butler (1990) também identificaram que, para questão em que a luz incide em interface de um meio mais refringente para um meio menos refringente, muitos alunos desprezaram a possibilidade de reflexão interna total em situações em que o fenômeno necessariamente deveria ocorrer. A Figura 15 apresenta as duas ilustrações utilizadas na questão aplicada para a análise de compreensão do conceito de reflexão total. Em uma delas (Figura 15a), um único raio de luz foi desenhado e com ângulo de incidência na interface água/ar maior do que o ângulo crítico<sup>3</sup>. Na outra ilustração (Figura 15b), vários raios com diferentes ângulos incidentes foram indicados, sendo que nos de números 4 e 5, os ângulos superavam o ângulo crítico. Segundo os pesquisadores, foi verificado que, por muitas vezes, os estudantes conheciam as respostas, mas não conseguiam fornecer uma explicação correta e completa porque dispunham de uma compreensão superficial do assunto, faltando-lhes uma estrutura de conhecimento adequada. Além disso, os estudantes obtiveram melhor desempenho nas questões que seguiam padrões semelhantes aos discutidos em sala de aula e livros didáticos, mas não conseguiam relacionar o conceito físico com exemplos novos.

---

<sup>3</sup> O ângulo crítico ( $\theta_c$ ) é o valor peculiar do ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) para o qual o ângulo de refração ( $\theta_r$ ) seja igual a  $90^\circ$ . Para ângulos de incidências iguais ou maiores do que ( $\theta_c$ ), ocorre a reflexão interna total, ou seja, a luz é totalmente refletida (HECHT, 2012, p. 156).

**Figura 15** – Representação dos desenhos esquemáticos de questão do estudo de Singh e Butler (1990), para a verificação da compreensão dos alunos sobre as condições de ocorrência do fenômeno de reflexão interna total: em (a), o raio de luz está incidindo na interface água/ar em ângulo maior do que o crítico; e, em (b), apenas os raios 4 e 5 estão em ângulo de incidência maior do que o crítico.



Fonte: Adaptado de Singh e Butler (1990)

A Tabela 2 apresenta as concepções alternativas, referentes ao fenômeno da refração, discutidas por Keawkhong et al. (2010), Singh e Butler (1990), bem como um resumo das suas principais características.

**Tabela 2** – Concepções alternativas e dificuldades na aprendizagem dos fenômenos de propagação e refração da luz, verificadas nos estudos realizados por Keawkhong et al. (2010) e Singh e Butler (1990).

Fenômeno/Conceito	Dificuldades/Concepções Alternativas	Referência
1 Formação de imagem aparente	Os alunos não conseguem determinar corretamente a posição de uma imagem aparente formada por objeto imerso em meio diferente ao do observador.	Keawkhong et al. (2010)
2 Refração da luz e índice de refração	Os alunos não conseguem explicar o fenômeno da refração. A maioria tenta esclarecer como sendo o desvio da luz ao incidir em outro meio. Muitos utilizam a Lei de Snell como definição para o índice de refração.	Singh e Butler (1990)
3 Refração e os fenômenos de reflexão e absorção da luz	Os estudantes acreditam que os fenômenos de refração, reflexão e absorção da luz acontecem separadamente.	Singh e Butler (1990)
4 Reflexão interna total	Além dos alunos não considerarem a opção da reflexão interna total, não sabem explicar o fenômeno.	Singh e Butler (1990)

Segundo os autores Keawkhong et al. (2010), Singh e Butler (1990), e a experiência profissional da autora, verifica-se que os fenômenos relacionados à óptica geométrica são ensinados separadamente, sem relações entre si. Desta forma, os estudantes estão sujeitos à um ensino precário, em óptica geométrica, obtendo-se um entendimento com pouco aprofundamento, por isso, não conseguem explicar os fenômenos estudados. Como o produto educacional deste trabalho refere-se à aprendizagem de conceitos de refração da luz, será visto no Capítulo 4 que o

desenvolvimento da ferramenta educacional se preocupou em não criar ou reforçar concepções alternativas e, na medida do possível, intencionou desconstruir as que fossem verificadas como existentes. Utilizou-se a experimentação e tecnologia computacional, acreditando-se que tais recursos podem contribuir positivamente no aumento do interesse dos estudantes pelo ensino da óptica geométrica, além de proporcionar uma aprendizagem mais significativa no aluno, como será discutido no próximo capítulo.

## **Capítulo 3**

### **A combinação de modelagem matemática, recursos computacionais e experimentação com o propósito de favorecer a aprendizagem no ensino de Física**

Este capítulo consiste em uma revisão bibliográfica cujas discussões justificam, entre outras opções, um ensino de Física baseado na experimentação e modelagem matemática, com recursos computacionais, para despertar a motivação do aprendiz, como também proporcionar sentido e significado ao que foi estudado por ele. Inicialmente serão discutidos preceitos de uma aprendizagem significativa e seu encaminhamento para o caso da aprendizagem de conceitos de Física. Posteriormente, será discutido o enquadramento de metodologias que utilizam experimentação e uso de recursos tecnológicos nas diretrizes educacionais brasileiras, com ênfase no ensino de Física para o nível médio. Finalmente, na última seção do capítulo, serão expostas as ideias principais para o uso combinado de modelagem matemática, experimentação e recursos computacionais, que motivaram o desenvolvimento do produto educacional deste trabalho.

#### **3.1 Aprendizagem no ensino de Física**

Segundo Hewitt (2011), a Física busca explicações e leis que regem a natureza. Ainda, trata-se de uma ciência fundamental, pois estuda coisas essenciais como o movimento, as forças, a energia, a luz, entre outros. Gircoreano e Pacca (2001), em trabalho sobre ensino de conceitos de luz e visão, apontam as vantagens de uma aprendizagem construtivista, em que os alunos utilizariam modelos acessíveis para a resolução de problemas ao invés de simplesmente aplicarem equações sem pensar em seus significados físicos. Por sua vez, segundo Moreira, citando David Ausubel, o elemento mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno já conhece, logo o papel do professor deve ser o de verificar isso e ensinar de acordo (MOREIRA, 1995).

Na aprendizagem significativa, um conhecimento novo é formado a partir dos existentes na estrutura cognitiva dos indivíduos, chamados de subsunçores (Moreira, 1995). Por exemplo, em óptica geométrica, caso os conceitos sobre a natureza da luz já estivessem na estrutura cognitiva do aprendiz, eles serviriam de

subsunçores (ou seja, ideias-âncoras) para novas informações como aquelas envolvendo os fenômenos de reflexão e refração. Segundo Moreira (1995), Ausubel aponta a aprendizagem mecânica como opção quando não existem subsunçores na estrutura cognitiva dos alunos que possam fazer parte das relações com as novas informações. Isso ocorreria sempre que uma informação fosse totalmente nova ao aprendiz, mas, adquiridos novos conhecimentos, eles podem servir como sustentação para o aprendizado de conceito futuros, iniciando-se uma aprendizagem significativa.

Moreira (2000) afirma que “...nossa visão de mundo é construída primordialmente com as definições que criamos, com as perguntas que formulamos e com as metáforas que utilizamos”. Assim, no que chama de aprendizagem significativa crítica, coloca que o aluno precisa cumprir papel ativo na construção do seu conhecimento, formulando questões e interpretando símbolos, dentro de uma postura crítica. Nesse caso, o professor passa a ser um mediador e não um transmissor de verdades absolutas. Acrescenta que não é necessário ao professor abandonar completamente a lousa-e-giz em salas de aula, mas sim atentar-se em não transferir informações de forma unicamente mecânica. Do mesmo jeito, acredita ser ineficiente à aprendizagem a troca da lousa-e-giz por “tecnologias modernas”, por exemplo, quando passa-se ao uso de uma lousa digital se apenas para apresentação de slides.

Dantas (2011) investigou e analisou relações entre as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) com a teoria da aprendizagem significativa, sobre o conceito de energia e suas transformações, bem como as fontes de energia necessárias para a geração da energia elétrica. Este estudo foi realizado com estudantes do último ano do Ensino Médio, da rede pública estadual do município de Juazeiro do Norte no Ceará. Inicialmente, investigou-se as concepções prévias dos alunos, a partir de questionário aberto. Em seguida, foi disponibilizado textos para os estudantes, para serem discutidos em sala de aula. Posteriormente, realizou-se atividades com simulações, animações e vídeo para além de despertar o interesse do aluno para o estudo do assunto, desenvolver seu pensamento crítico. Por último, os alunos desenvolveram mapas conceituais sobre o que foi estudado. Após algumas atividades, foram aplicadas três entrevistas nos alunos, para a avaliação de seus aprendizados, uma após o uso das simulações e animações, a segunda após o vídeo, e a última depois da apresentação dos mapas conceituais.

A partir dos resultados da aplicação do questionário diagnóstico para a verificação dos conhecimentos prévios, Dantas (2011) percebeu, que mesmo ao final do ensino básico, os estudantes não tinham conhecimento científico mínimo sobre o processo de geração de energia. Além disso, pelas argumentações dos alunos, verificou que eles apresentavam concepções alternativas influenciadas pelo cotidiano e baseadas no senso comum. Para o autor da pesquisa, os mapas conceituais foram importantes, pois além de servirem como ferramenta potencial facilitadora da aprendizagem significativa, também contribuíram como instrumento para avaliação. Verificou-se também que o uso de tecnologias facilitou a aprendizagem significativa do aluno, pois, além de motivar e aumentar o interesse dos alunos pelos conteúdos de Física, ajudou na assimilação do conhecimento. Além disso, o autor pode perceber que as simulações computacionais fortaleceram o papel do professor como mediador e não como detentor do conhecimento.

Tironi et al. (2013) propuseram o uso das TICs para promover a aprendizagem significativa em tópicos de Física Moderna de estudantes do 3º ano do Ensino Médio, da rede pública do município de Massaranduba, em Santa Catarina. Foi construída uma Unidade de Aprendizagem, com atividades que motivassem o interesse dos alunos em aprender sobre nanotecnologia e efeito fotoelétrico. Inicialmente foi aplicado um questionário para diagnosticar os conhecimentos prévios dos estudantes e, em seguida, foram disponibilizados, para os alunos, um artigo e um filme relacionados ao tema. Tanto o artigo, quanto o filme, serviram como organizadores prévios, para a compreensão e estruturação de subsunçores importantes sobre o tema proposto. Posteriormente, foram utilizados roteiros que continham problemas a serem investigados pelos alunos interagindo com simulações virtuais. Depois, foram realizados vários experimentos sobre o tema. Essas atividades foram feitas em grupos, e os alunos produziram relatórios sobre as práticas experimentais. Depois das práticas, cada grupo apresentou seus resultados e dúvidas sobre o assunto. No final, aplicou-se um teste para avaliar a aprendizagem dos alunos.

Segundo Tironi et al. (2013), os testes para detectar os conhecimentos prévios dos alunos foram de fundamental importância, pois os resultados apresentaram grandes falhas nas concepções dos alunos e falta de subsunçores relacionados aos conceitos fundamentais sobre o átomo. Depois do teste final, os autores constataram que houve aprendizagem significativa, pois, além de bons



resultados no teste, os alunos apresentaram várias ideias sobre o tema fotoelétrico. A experimentação, além de auxiliar os estudantes a entenderem melhor o efeito fotoelétrico, foi um recurso muito atrativo e empolgante para os alunos, despertando curiosidade e interesse. Os autores ainda mencionam que ao final das atividades, os alunos pediram para que houvesse mais práticas experimentais em outros assuntos que seriam estudados no decorrer do ano letivo.

Dentro do discutido nesta seção, cabe ressaltar que o desenvolvimento deste trabalho levou em conta os princípios básicos da aprendizagem significativa para a construção de ferramentas (ou seja, do produto educacional) no ensino de conceitos de refração da luz. Considerou-se, como será verificado no próximo capítulo, elementos para: o diagnóstico de conhecimentos prévios e concepções alternativas dos alunos; o favorecimento da formação de subsunções essenciais para as relações de significados dos conceitos e informações; e a possibilidade de construção autônoma e crítica de conhecimentos em fenômenos ópticos refrativos pelo aprendiz do nível do Ensino Médio.

### **3.2 Diretrizes curriculares relacionadas ao Ensino Médio**

De acordo com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) brasileira, Lei nº 9.394 de 20 de dezembro de 1996, no artigo 35 que fala sobre as finalidades do Ensino Médio, o inciso IV diz que uma delas é: “a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina”. Dessa forma a lei determina que o aluno, ao cursar o Ensino Médio, seja capaz de aprender os conceitos cientificamente corretos e consiga relacioná-los com a tecnologia existente. Contudo, pela experiência da autora e também com base nas discussões do capítulo anterior, percebe-se que os alunos, muitas vezes, não conseguem construir adequadamente os conhecimentos, mesmo após instrução formal. No caso da aprendizagem de conhecimentos em Física, nota-se uma grande dificuldade dos estudantes em relacionar os conceitos expressos nas salas de aula e nos livros didáticos com a realidade.

Também segundo a LDB, no artigo 36, o qual discorre sobre as diretrizes do currículo do Ensino Médio, tem-se o inciso II que diz: “adotará metodologias de ensino e de avaliação que estimulem a iniciativa dos estudantes”.

Ainda, nas Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica (BRASIL, 2013, p.163), diz-se que nem toda a informação pode ser considerada como conhecimento, e que cabe ao professor estabelecer relações entre as informações recém adquiridas e o conhecimento científico, acrescentando:

“Essas novas exigências requerem um novo comportamento dos professores que devem deixar de ser transmissores de conhecimento para serem mediadores, facilitadores da aquisição de conhecimentos; devem estimular a realização de pesquisas, a produção de conhecimento e o trabalho em grupo.”

Nota-se, então, pela LDB, uma preocupação de políticas públicas nacionais em estimular os alunos ao aprendizado desde que cumprindo um papel ativo no processo. Também indica, aos responsáveis pela mediação da aprendizagem, a necessidade imperativa do uso de metodologia de ensino que favoreçam a iniciativa do aprendiz. Quais seriam essas metodologias no caso da área de ensino de ciências como a Física?

Pela LDB (2013, p. 167), propõe-se, por exemplo, que:

“A apropriação de conhecimentos científicos se efetiva por práticas experimentais, com contextualização que relacione os conhecimentos com a vida, em oposição a metodologias pouco ou nada ativas e sem significado para os estudantes.”

De acordo com o Currículo do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2012, p. 100), o qual a autora atua, “... é preciso garantir o estudo de diferentes campos de fenômenos e diversas formas de abordagem, privilegiando a construção de um olhar investigativo sobre o mundo real”. Também, propõe-se que a aprendizagem mecânica não pode ser a única forma de ensino. Ainda, “Vale ainda destacar duas dimensões importantes do conhecimento físico, que, embora tratadas no ensino atual, o são de forma pouco proveitosa para a formação dos estudantes, a saber: a formulação matemática e a experimentação”.

Acredita a autora deste trabalho que um ensino com investigação, experimentação, modelagem matemática e contextualização, além de instigar a curiosidade dos alunos para o aprendizado de ciências, pode ser um grande aliado na

compreensão adequada do aprendiz sobre as relações entre o abstrato e o concreto. A despeito da importância do uso da experimentação no processo de ensino e aprendizagem, como destacado pelas proposições das diretrizes curriculares nacionais e estaduais comentadas acima, pela experiência da autora nas escolas em que leciona, essa prática é pouco valorizada pelas autoridades escolares, principalmente no ensino de Física. Geralmente, as escolas possuem laboratórios ou *kits* de Química, mas dificilmente existem experimentos para a prática do ensino de Física. Na realidade, sempre que necessário, a autora utiliza-se de recursos e equipamentos pessoais para propor e realizar experimentos com os alunos.

Sabe-se que os estudantes atualmente vivem em um mundo rodeado por tecnologias de informação e de comunicação (TICs), conectados a maior parte do tempo a *internet*, e com o uso cada vez mais popular dos *tablets* e *smartphones*. Isso lhes proporciona uma quantidade vasta de informações e, quando chegam na escola, muitas vezes essas informações não se relacionam com o que está sendo estudado, criando conflitos desestimulantes à aprendizagem. Dessa forma, como os materiais para experimentação nas escolas são precários senão inexistentes, acredita a autora que o uso de recursos computacionais e de TICs pode contornar esse problema, ao se utilizar de *softwares* e simuladores que proporcionem a prática virtual de experimentação/investigação com modelagem matemática. Isso levando-se em conta a autonomia do aprendiz no uso e controle das ferramentas. Como exemplo, a autora utiliza em sala de aula as simulações do *PhET – Interactive Simulations*, da Universidade do Colorado, EUA, assim como constrói suas simulações a partir da modelagem matemática própria como *software Modellus*. Ambos recursos foram explorados para o desenvolvimento do produto educacional deste trabalho, como discutido no próximo capítulo.

### 3.3 Modelagem matemática, simulações e experimentação e o uso de tecnologias digitais

Pela própria experiência da autora, verifica-se que uma das principais reclamações dos professores relacionadas às dificuldades dos alunos no aprendizado de ciências exatas se refere aos obstáculos encontrados pelos estudantes na aplicação da teoria em situações cotidianas. Além disso, a exemplo do que foi parcialmente concluído por Singh e Butler (1990), na seção 2.2 deste trabalho, em geral, os estudantes não conseguem resolver problemas quando propostos em situações diferentes daquelas já discutidas em sala de aula.

Nas escolas em que a autora lecionou e leciona alguns alunos acreditam que estudar significa memorizar os conteúdos de Física necessário para a realização das avaliações, mediante a resolução de enormes listas de exercícios repetitivos. Casos extremos como esse, provavelmente, não ocorreriam se a aprendizagem estivesse sendo incentivada a partir de experimentação, modelagem matemática dos fenômenos físicos e uso de TICs. Contudo em todas as escolas em que a autora leciona, tanto na rede particular de ensino quanto na pública, existem ao menos uma sala de informática disponível para os estudantes, sendo que em um dos colégios particulares os alunos recebem um *tablet* ao efetuarem a matrícula no Ensino Médio. Mas percebe-se que, na maioria das vezes, esses computadores são utilizados para pesquisas bibliográficas dos assuntos relacionados com as disciplinas ou para acompanhar a matéria, substituindo o livro didático impresso. A autora constatou também que os alunos utilizam os dispositivos móveis, recebidos da escola, para tirar fotos e brincar com jogos que não tem relação com as disciplinas em estudo.

O uso do computador e de tecnologias digitais, além de ser mais atrativo para o aluno, pode auxiliar em sua aprendizagem ativa. Por sua vez, inserir o computador nas escolas, utilizando-o somente como fonte de informações pela *internet*, não mudará o cenário tradicional de uma educação baseada na aprendizagem mecânica. Como apresenta Veit e Teodoro (2002, p. 87):

“.... Embora ferramenta indispensável para o ensino a distância e que em muito enriquece o ensino presencial, há que se tomar cuidado para que o uso do computador não se restrinja a uma *máquina de fornecer informação*, como aconteceu com grande parte dos programas tutoriais do passado. ”

As escolas já perceberam a importância da inserção das tecnologias digitais no ensino, mas como utilizar os computadores e *tablets* para a melhoria da aprendizagem?

Segundo Valente (1999), o professor precisa ter ciência dos potenciais educacionais que poderá utilizar com o computador e estar apto a transformar as atividades realizadas de forma tradicional em atividades com o uso de novas tecnologias. Porém, é essencial que o aluno construa seu conhecimento e não apenas receba as informações transmitidas.

Lecionando aulas de Física, tanto para o Ensino Médio quanto para anos finais do Ensino Fundamental, a autora pode perceber que os estudantes não conseguem diferenciar a área de conhecimento da Física com a Matemática. Frequentemente, a autora ouve algumas frases no decorrer das aulas, tais como: “a Física e a Matemática são a mesma coisa” ou “não gosto da Física porque ela tem muita Matemática” ou também “não sei Física porque não entendo Matemática”. Por outro lado, sentem-se muito atraídos e motivados para aulas experimentais, mencionadas por eles como “diferentes” das tradicionais.

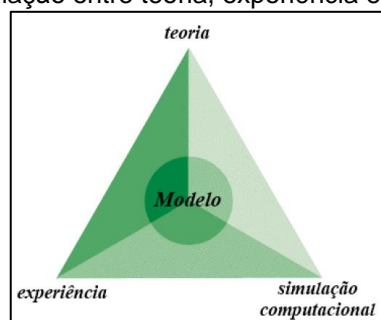
Medeiros et al. (2002) apontam que alguns estudantes além de não conseguirem relacionar as equações com os fenômenos físicos envolvidos, acreditam que a Física é um conjunto de fórmulas sempre com o objetivo principal de ser aplicado em problemas específicos. Contudo, com a experimentação, a análise dos dados com modelos matemáticos e simulações computacionais, o foco do aluno passaria da simples resolução matemática de problemas específicos de Física para a análise gráfica dos resultados obtidos, as interpretações das soluções, a investigação dos parâmetros e variáveis que representam o fenômeno e a avaliação de possíveis restrições que possui o modelo estudado.

De acordo com Veit e Araújo (2005, p. 3):

“... modelos científicos são ideais, na medida em que trabalham com objetos ou entidades que não têm existência real na natureza, e são simplificados, pois mantêm apenas as características essenciais dos sistemas ou fenômenos que se pretende representar. Em outras palavras, modelo científico é um análogo estrutural do sistema representado, não se constituindo em sua imagem especular, mas apenas incorporando as características e relações essenciais, de modo aproximado.”

Para Heidemann et al. (2012, p. 972) os modelos para simulação computacional de fenômenos “podem ser concebidos como os mediadores entre as teorias, a realidade e as simulações computacionais: o tripé metodológico que sustenta o desenvolvimento científico”, como representado na Figura 16.

**Figura 16** – Representação esquemática de Heidemann et al. (2012) de como o modelo de um fenômeno integra uma relação entre teoria, experiência e simulação computacional.



Fonte: Brandão apud Heidemann et al (2012)

Existem duas formas de modelagem computacional, a exploratória e a expressiva (VEIT E ARAÚJO, 2005). Na exploratória o usuário pode analisar os resultados de uma simulação de fenômeno a partir de um modelo proposto por terceiros, podendo inserir arbitrariamente ou de forma limitada valores para as variáveis, ou mesmo alterar parâmetros e modelo matemático. Na modelagem expressiva, por outro lado, o estudante constrói seu próprio modelo e depois os analisa. Acredita-se que as duas formas de modelagem são importantes e podem ser utilizadas dependendo do tratamento que se pretende e do assunto em estudo. Neste trabalho serão abordadas as duas formas, por isso utilizar-se-á um software gratuito, no caso o *Modellus* (VEIT E TEODORO, 2002), no qual pode-se empregar tanto a modelagem exploratória, quanto a expressiva. A razão pela escolha desse software, entre outros disponíveis gratuitamente, será justificada a seguir, no capítulo de desenvolvimento do projeto.

## Capítulo 4

### Desenvolvimento do trabalho

O desenvolvimento do trabalho foi realizado em três partes. Na primeira parte, foi feita a escolha do *software*/simulador/plataforma mais adequado para o desenvolvimento do projeto. Levantou-se e analisou-se aqueles gratuitos e/ou livres, levando-se em conta os critérios de avaliação internacionais para objetos virtuais de aprendizagem e critérios suplementares da autora. Na segunda parte, foi montado um teste diagnóstico para a análise de compreensão dos principais conceitos e conteúdos envolvendo óptica geométrica, segundo orientações curriculares do Estado de São Paulo, que regem a atuação da autora. O teste foi aplicado com alunos do Ensino Médio de escola da rede particular de ensino que a autora leciona, e os resultados analisados qualitativamente. Na terceira parte, principalmente em ambiente virtual proporcionado pelo *software* escolhido na primeira parte, foram desenvolvidas situações-problema envolvendo experimentação, modelagem matemática e simulações para a aprendizagem de fenômenos ópticos refrativos e considerando formas de desconstruir as principais concepções alternativas levantadas. Neste ambiente, o aprendiz é convidado a também cumprir papel ativo na construção das simulações para análise e solução de problemas, podendo alcançar resultados inusitados e novos conhecimentos que envolvem inclusive o conceito de índice de refração negativo em metamateriais. Um guia tutorial para a utilização dos conjuntos de ferramentas educacionais foi gerado a partir da conclusão dessas três etapas e está reproduzido em apêndice desse texto.

#### 4.1 Escolha do *software*/simulador/plataforma educacional

##### 4.1.1 Critérios de avaliação do *software*/simulador/plataforma educacional

O LORI (*Learning Object Review Instrument*) (Nesbit, Belfer e Leacock 2003), desenvolvido pela *e-Learning Research and Assessment Network* (eLera) é um instrumento utilizado mundialmente para a avaliação de objetos de aprendizagem (OA) (Vargo et al., 2003). Busca auxiliar os usuários na escolha de objetos de aprendizagem com melhor desempenho, de acordo com os objetivos pretendidos.

Trata-se basicamente de um questionário, a ser respondido pelos usuários, para levantar o grau de satisfação (de 1 a 5, sendo 1 o mínimo e, 5, o máximo) de cada característica, entre aquelas consideradas essenciais aos OA, assim como determinar se a característica é aplicável ou não ao objeto. É disponibilizado na língua inglesa, como representado na Figura 17 com nove critérios/características de análise sobre o objeto de aprendizagem, a saber:

- 1 Qualidade do conteúdo: veracidade, precisão, apresentação equilibrada das ideias e nível de detalhe adequado;
- 2 Harmonização dos objetivos de aprendizagem: alinhamento entre os objetivos de aprendizagem, atividades, avaliações e características dos alunos;
- 3 Feedback e adaptação: conteúdo adaptativo ou *feedback* aos comentários dos alunos, de acordo com suas necessidades específicas;
- 4 Motivação: capacidade de motivar aprendizes de um grupo identificado;
- 5 *Design* de apresentação: concepção dos elementos visuais e auditivos para melhor efetividade na aprendizagem e no processamento mental;
- 6 Usabilidade da interface: facilidade de navegação e de reconhecimento da interface pelo usuário, e qualidade dos recursos de ajuda disponíveis;
- 7 Acessibilidade: concepção dos controles e formatos de apresentação que acomodem os aprendizes portadores de deficiências, assim como os que utilizam dispositivos móveis;
- 8 Reutilização: capacidade de utilização em diferentes contextos de aprendizagem e com alunos de diferentes origens; e
- 9 Conformidade com as normas: adesão às normas e especificações internacionais.



**Figura 17** – Questionário do LORI, para a escolha do *software* educacional a ser utilizado.

Scoring Sheet								
Learning Object _____			Reviewer _____					
General Remarks								
			Low → High					
1. Content Quality: Veracity, accuracy, balanced presentation of ideas, and appropriate level of detail			1	2	3	4	5	NA
2. Learning Goal Alignment: Alignment among learning goals, activities, assessments, and learner characteristics			1	2	3	4	5	NA
3. Feedback and Adaptation: Adaptive content or feedback driven by differential learner input or learner modeling			1	2	3	4	5	NA
4. Motivation: Ability to motivate and interest an identified population of learners			1	2	3	4	5	NA
5. Presentation Design: Design of visual and auditory information for enhanced learning and efficient mental processing			1	2	3	4	5	NA
6. Interaction Usability: Ease of navigation, predictability of the user interface, and quality of the interface help features			1	2	3	4	5	NA
7. Accessibility: Design of controls and presentation formats to accommodate disabled and mobile learners			1	2	3	4	5	NA
8. Reusability: Ability to use in varying learning contexts and with learners from differing backgrounds			1	2	3	4	5	NA
9. Standards Compliance: Adherence to international standards and specifications			1	2	3	4	5	NA

**Fonte:** Nesbit, Belfer e Leacock (2003)

Neste trabalho, utilizou-se os critérios do LORI para uma pré-avaliação de recursos digitais e *softwares/simuladores/plataformas* educacionais disponíveis gratuitamente no mercado. Foram avaliados: Simulações do PhET - Interactive Simulations (PhET, 2015); Algodoo (Algodoo, 2015); Easy Java Simulations (EJS) (EJS, 2015); Geogebra (Geogebra, 2015); Scraeth (Scraeth, 2015); e Modellus nas versões 2.5, 4.0 e X (Modellus, 2015). A autora os escolheu por já tê-los utilizado em sala de aula e/ou conhecido durante as aulas do Mestrado Profissional em Ensino de Física. A Tabela 3 apresenta a avaliação da autora para esses recursos, quando aplicados os nove aspectos do LORI, mencionados acima.

**Tabela 3** – Avaliação da autora deste trabalho, segundo os critérios do LORI (Nesbit, Belfer e Leacock 2003), para alguns recursos digitais e softwares educacionais disponíveis gratuitamente no mercado.

<b>Critérios propostos pelo LORI</b>	<b>PhET</b>	<b>Algodo</b>	<b>EJS</b>	<b>Geogebra</b>	<b>Scratch</b>	<b>Modellus 2.5</b>	<b>Modellus 4.0</b>	<b>Modellus X</b>
<b>Qualidade do conteúdo</b>	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Harmonização dos Objetivos de Aprendizagem</b>	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Feedback e Adaptação</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Motivação</b>	5	5	3	4	5	4	4	5
<b>Design de Apresentação</b>	5	5	3	4	5	5	5	5
<b>Usabilidade da interface</b>	5	5	2	4	4	4	5	5
<b>Acessibilidade</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Reutilização</b>	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Conformidade com as normas</b>	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Total:</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	30	34	36	35	36	<b>37</b>

Da Tabela 3, percebe-se que houve empate entre os recursos digitais do PhET, do Algodo e do Modellus X, na pré-avaliação segundo os critérios do LORI. Contudo, como o objetivo deste trabalho é o de desenvolvimento de produto educacional baseado no uso de modelagem matemática dos fenômenos físicos com experimentação e simulação, na seção seguinte é apresentada uma complementação ao teste, em que se analisam, por exemplo, critérios como capacidade de inserção de imagens para a realização de medições, construção de tabelas e gráficos e/ou vídeos, entre outros.

#### *4.1.2 Complementação ao teste LORI de acordo com o objetivo do trabalho*

Como discutido anteriormente, ocorreu a necessidade de se construir um modelo complementar ao LORI para a avaliação dos *softwares/simuladores/plataformas*, levando-se em consideração aspectos relevantes para o desenvolvimento do produto educacional a que diz respeito esse trabalho. Ressalta-se, contudo, que com essa análise não se pretendeu verificar qual é o melhor ou pior objeto digital, mas sim escolher qual tem as características mais adequadas ao alcance dos objetivos deste trabalho. Foram avaliadas características principais: 1) recursos; 2) interatividade; e 3) interface visual, como apresenta a Tabela 4. As notas foram atribuídas com valor mínimo de 1 ponto e máximo de 3 pontos, e utilizou-se o símbolo “hífen” para os casos em que não se verificou determinado atributo.

**Tabela 4** – Avaliação complementar ao teste LORI (Tabela 3), sobre as características específicas de *softwares/simuladores/plataformas* educacionais de acordo com os objetivos pretendidos neste trabalho. Um ponto é o valor mínimo para o grau de qualidade atribuído e, três pontos, é o máximo. O hífen indica que o atributo não é atendido.

<b>Simulador/Software</b> →		<b>PhET</b>	<b>Algodoo</b>	<b>EJS</b>	<b>Geogebra</b>	<b>Scratch</b>	<b>Modellus 2.5</b>	<b>Modellus 4.0</b>	<b>Modellus X</b>
<b>Características Principais e seus Atributos</b> ↓									
<b>1. Recursos</b>	1.1 Construção de gráficos	1	2	3	3	3	3	3	3
	1.2 Construção de tabelas	1	1	3	3	1	3	3	3
	1.3 Objetos disponíveis para a construção das simulações	-	3	2	2	2	1	2	3
	1.4 Inserção de imagens e vídeos	-	2	2	2	2	3	2	2
	1.5 Ferramentas para medições em imagens inseridas na tela	-	1	1	1	1	3	2	2
	1.6 Controle da variável tempo	1	1	1	1	1	3	3	3
<b>2. Interatividade</b>	2.1 Simulações com parâmetros físicos	3	3	3	3	3	3	3	3
	2.2 Simulações a partir da própria modelagem matemática	-	-	2	2	-	3	3	3
<b>3. Interface Visual</b>	3.1 Amigável ao usuário	3	3	1	2	3	1	2	3
	3.2 Simulações 2 D	3	3	3	3	3	3	3	3
	3.3 Simulações 3 D	3	1	3	3	3	1	1	1
	3.4 Dispensa conhecimentos sobre linguagem de programação	3	3	1	3	2	3	3	3
	3.5 Funciona nos atuais sistemas operacionais: Windows 8 e 10, Linux, Mac Os	3	2	1	3	3	1	3	3
	3.6 Funciona em dispositivos móveis	3	3	2	3	3	-	-	-
	3.7 Comandos em português	3	-	-	3	3	3	3	3
<b>Total</b>		<b>27</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>37</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>36</b>	<b>38</b>

Os principais aspectos e justificativas para a atribuição dos pontos indicada na Tabela 4, segundo cada atributo, foram:

### **Característica 1- Recursos**

*Construção de gráficos.* O software Algodoo recebeu 2 pontos porque, durante a simulação, os parâmetros dos gráficos já são determinados pelo sistema. Isto é, não se pode construir um outro gráfico mediante a mudança de parâmetros. Da mesma forma, o PhET recebeu apenas um ponto porque somente algumas simulações possuem gráficos e, além disso, não é possível variar seus parâmetros. Enquanto que, nos outros programas, pode-se construir mais de um gráfico em uma mesma simulação.

*Construção de tabelas.* O Algodoo, o Scratch e o PhET não possuem ferramentas adequadas para a construção de tabelas pelo usuário. Assim, por exemplo, não se pode inserir dados para, posteriormente, construir um gráfico. As únicas tabelas são as que o próprio programa gera.

*Objetos disponíveis para a construção das simulações.* Todos os softwares analisados possuem esse atributo (com exceção do PhET, cujos objetos têm o uso pré-determinado dentro de cada simulação proposta). A pontuação variou com a quantidade de objetos disponibilizados: mais objetos, mais pontos.

*Inserção de imagens e vídeos.* Todos os softwares (com exceção do simulador PhET) permitem a inserção de imagens, mas somente com o Modellus-2.5 permite inserir vídeos, para posterior análise.

*Ferramentas para medições em imagens inseridas na tela.* O Modellus na versão 2.5 é o que mais tem ferramentas para a análise e medidas de imagens. As versões mais recentes do Modellus (4.0 e X), contudo, não possuem algumas dessas ferramentas.

*Controle da variável tempo.* Apenas o Modellus, nas três versões analisadas, disponibiliza ao usuário o controle da variável tempo, utilizada para parametrizar os modelos matemáticos que geram as simulações.

## **Característica 2 - Interatividade**

Para estudar a interatividade dos programas, foram escolhidos dois atributos: “simulações com parâmetros fixos”, típicos da modelagem exploratória; e “simulações a partir da própria modelagem matemática”, comum à modelagem expressiva (Veit e Araujo, 2005). Todos os *softwares* possuem simulações com parâmetros fixos, mas apenas o Modellus (nas três versões analisadas), o EJS e o Geogebra podem ser utilizados para a modelagem expressiva. O *software* Modellus recebeu três pontos por ser o que mais favorece a interatividade do usuário.

## **Característica 3 – Interface Visual**

*Amigável ao usuário.* Considerou-se a quantidade de objetos e ferramentas interativas que motivem o seu uso, proporcionando movimentos dos modelos construídos e melhor efeito visual. Neste item tanto o EJS quanto o Modellus 2.5 receberam apenas um ponto. No Modellus 2.5, a sua interface não é muito atrativa e as janelas de controle e simulação são abertas separadamente, dificultando o trabalho. No EJS, por sua vez, a interface é de difícil manipulação, sendo necessário conhecimentos de programação para a construção das simulações.

*Simulações 2D e 3D.* Todos os *softwares* conseguem realizar simulações em duas e três dimensões, mas versões em 3D são verificadas com maior facilidade de desenvolvimento nos softwares EJS, Geogebra e Scratch.

*Dispensa conhecimento sobre linguagem de programação.* Para a realização de simulações, no programa EJS são necessários conhecimentos sobre lógica de programação, por isso recebeu apenas um ponto. Já no Scratch, não se precisa saber linguagem própria como no EJS, mas é imprescindível o uso de lógica para a realização das simulações.

*Funciona nos atuais sistemas Windows 8 e 10, Linux e Mac Os.* Tanto o EJS quanto o Modellus 2.5 só funcionam em Windows com versões até 7. O Algodoo ainda não têm download para Linux.

*Funciona em dispositivos móveis.* As versões do Modellus não funcionam em dispositivos móveis, como *tablets* e *smartphones*, por isso não receberam pontos. O mesmo para o EJS, cuja estrutura é o Java (Perry, 2016), gerado para operar em múltiplas plataformas, mas que se tornou obsoleto e não funciona em sua plenitude.

*Comandos em Português.* Apenas o Algodoo e o EJS não possuem comandos em português. Considerou-se essa característica importante, porque é mais efetiva a interação quando o usuário não precisa traduzir comandos.

Com essa análise dos softwares, a partir dos resultados da Tabela 2 e 3, verificou-se que o Modellus-X é o que melhor desempenharia as funções relevantes para a realização deste trabalho, considerando-se que o objetivo principal é a simulação de fenômenos físicos com modelagem matemática e experimentação. Na verdade, segundo os idealizadores (Veit e Teixeira, 1999) o Modellus foi concebido com a finalidade de modelagem em Ciências Físicas e Matemáticas. Com ele pode-se fazer várias representações de uma mesma situação, explorando ou construindo, ao mesmo tempo, equações, tabelas, gráfico e animações (Veit e Teodoro, 2002). Pode-se usar as duas formas de modelagem computacional, discutidas na seção 3.3 do capítulo anterior, pois para manipulá-lo não é necessário o conhecimento de linguagem de programação, portanto o usuário-aluno pode tanto investigar um modelo pronto (modelagem exploratória), como construir sua própria simulação inserindo as equações da mesma forma como é estudada na sala de aula (modelagem expressiva).

## 4.2 O Currículo do Estado de São Paulo e diagnóstico das concepções alternativas

### 4.2.1 Ensino da óptica geométrica segundo o currículo do Estado de São Paulo

De acordo com o Currículo do Estado de São Paulo, o ensino da óptica geométrica inicia-se no terceiro bimestre do segundo ano do Ensino Médio. A Tabela 5 apresenta os conteúdos e habilidades que devem ser desenvolvidas pelo aluno, segundo essa norma. Primeiramente o currículo prevê o estudo sobre os fenômenos relacionados à propagação da luz, como a reflexão, refração e formação de imagens, mediante sistemas de raios. No quarto bimestre o currículo propõe o estudo da luz de acordo com sua natureza, considerando-se seu caráter eletromagnético, como apresenta na Tabela 6.

**Tabela 5** – Conteúdos e habilidades sobre óptica geométrica, indicados para o terceiro bimestre do segundo ano do Ensino Médio, segundo o Currículo do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2012).

<b>Conteúdos: Luz – características físicas e fontes</b>	<b>Habilidades</b>
Formação de imagens, propagação, reflexão e refração da luz	Identificar objetos, sistemas e fenômenos que produzem, ampliam ou reproduzem imagens no cotidiano
	Reconhecer o papel da luz, suas propriedades e fenômenos que envolvem a sua propagação, como formação de sombras, reflexão, refração etc.
	Associar as características de obtenção de imagens a propriedades físicas da luz para explicar, reproduzir, variar ou controlar a qualidade das imagens produzidas
Sistemas de ampliação da visão, como lupas, óculos, telescópios e microscópios	Reconhecer diferentes instrumentos ou sistemas que servem para ver, melhorar e ampliar a visão, como olhos, óculos, lupas, telescópios, microscópios etc., visando à sua utilização adequada
	Reconhecer aspectos e influências culturais nas formas de apreciação de imagens



**Tabela 6** – Conteúdos e habilidades sobre ondas eletromagnéticas, relacionadas ao estudo da natureza da luz, indicados para o quarto bimestre do segundo ano do Ensino Médio, segundo Currículo do Estado de São Paulo.

<b>Conteúdos: Ondas eletromagnéticas</b>	<b>Habilidades</b>
A interpretação do caráter eletromagnético da luz	Utilizar o modelo eletromagnético da luz como uma representação possível das cores na natureza
	Identificar a luz no espectro de ondas eletromagnéticas, diferenciando as cores de acordo com as frequências
Emissão e absorção de luz de diferentes cores	Reconhecer e explicar a emissão e a absorção de diferentes cores de luz
Evolução histórica da representação da luz como onda eletromagnética	Identificar e caracterizar modelos de explicação da natureza da luz ao longo da história humana, seus limites e embates
	Reconhecer o atual modelo científico utilizado para explicar a natureza da luz

Nos materiais didáticos propostos por escolas da rede particular de ensino, nas quais a autora leciona, o conteúdo está de acordo com o currículo do Estado de São Paulo, mas geralmente são transmitidos, aos alunos, de forma tradicional, com aulas expositivas e com ausência de experimentos ou simulações. Já no caderno do aluno, que é um material de apoio ao currículo do Estado de São Paulo e distribuído pela Secretaria da Educação (Disponível em: <<http://www.educacao.sp.gov.br/caderno-aluno>>. Acesso em: 12 jul. 2016), a óptica geométrica inicia-se com a proposta de um experimento para a verificação de imagens obtidas em câmaras escuras de orifício, mostrando-se sua relação com o olho humano e as máquinas fotográficas. Em seguida são orientados estudos de conceitos sobre reflexão, e propostos experimentos e análises relativos aos espelhos planos e cilíndricos. Depois são tratados os conceitos sobre a refração e consideradas aplicações como em lentes convergentes e divergentes. É proposto um experimento sobre a construção de lentes e a análise das relações entre problemas de visão e os conceitos estudados. Em seguida são tratados temas relativos as cores dos objetos e a decomposição da luz branca. Após um texto sobre cargas, campos e ondas eletromagnéticas, é proposta a análise da luz como uma onda eletromagnética e experimentos da transmissão e captação de ondas eletromagnéticas por celulares e aparelhos eletrônicos.

No estudo da refração, segundo o caderno do aluno da Secretaria de Educação do Estado de São Paulo, os experimentos dão ênfase às análises qualitativas, isto é, não são considerados cálculos matemáticos relativos aos

conceitos estudados. Assim, não foram considerados quaisquer modelos de dependência com a distância da intensidade luminosa gerada por fontes. Além disso, há lacunas em relação ao tratamento de diversos temas atuais. Por exemplo, não é considerada a existência de materiais com índice de refração negativo, bem como não se discute a produção de novos dispositivos tecnológicos a partir dessa nova característica.

Percebe-se que o caderno do aluno tem como base uma construção conceitual muito ampla e fundamentada em experimentos, mas poucas relações matemáticas (modelos físicos) para os fenômenos discutidos. Enquanto isso, os materiais didáticos das escolas particulares, entre os que a autora conhece, enfatizam os cálculos matemáticos sem relações com experimentos e teoria. Os efeitos dessas diferentes abordagens da rede pública e privada de ensino necessitam de avaliação em curto, médio e longo prazo, para a decisão de promover mudanças. No caso deste trabalho, a autora montou e aplicou um questionário diagnóstico curto para avaliar os conhecimentos dos alunos em conceitos básicos de propagação e refração da luz para subsidiar o desenvolvimento do produto educacional, como será discutido a seguir.

#### *4.2.2 Questionário diagnóstico*

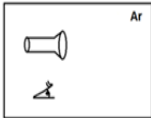
Neste trabalho, foi produzido um questionário diagnóstico (Apêndice A), com seis questões, para investigar a compreensão dos alunos sobre os principais conceitos em óptica geométrica trabalhados no currículo do Estado de São Paulo como também conceitos mais atuais não contemplados nesse currículo. Especificamente, foram abordados aspectos sobre a natureza da luz, formas de propagação e conceitos relacionados à refração, tanto em meios com índices de refração positivo quanto negativo. Particularmente, o questionário foi construído com questões para a verificação de concepções alternativas discutidas no capítulo 2 deste trabalho e naquelas percebidas pela própria experiência da autora.

Duas questões, as iniciais (Figuras 18 e 19), são de mesmo teor daquelas propostas no teste diagnóstico de Almeida, Abs e Soave (2007). Na primeira (Figura 18), a intenção é verificar se os alunos consideram se há a reflexão da luz por partículas suspensas no ar, enquanto que, na segunda (Figura 19), averigua se há o

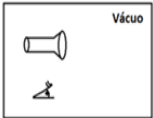
entendimento sobre a correta representação de raios de luz, já que confundem a ideia de “propagação retilínea da luz” com a de “raios paralelos”.

**Figura 18** – Representação da primeira questão do teste diagnóstico produzido neste trabalho.

Questão 1: As figuras abaixo representam uma lanterna ligada em uma sala fechada contendo ar e outra no vácuo. Em qual(ou quais) da(s) situação(ões) o observador conseguiria perceber a luz?



( )



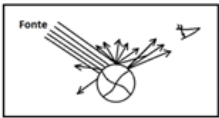
( )

Justifique sua escolha: \_\_\_\_\_

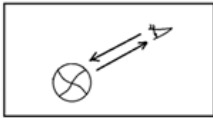
**Fonte:** Adaptado de Almeida, Abs e Soave (2007).

**Figura 19** – Representação da segunda questão do teste diagnóstico produzido neste trabalho.

Questão 2: Ao se ver uma bola qual é a melhor representação do fenômeno de reflexão?



( )



( )

Justifique sua escolha: \_\_\_\_\_

**Fonte:** Adaptado de Almeida, Abs e Soave (2007).


Na terceira questão (Figura 20), retirada e adaptada ao português da proposta de Galili e Lavrik (1998), tenta-se verificar o conhecimento do aluno sobre o conceito de fluxo de luz e intensidade luminosa.

**Figura 20** – Representação da terceira questão do teste diagnóstico produzido neste trabalho.

Questão 3: Qual das lâmpadas, da figura ao lado, proporciona melhor iluminação para a leitura do livro?

( ) lâmpada fixa no teto      ( ) lâmpada em cima da mesa

Justifique a escolha: \_\_\_\_\_



**Fonte:** Adaptado de Galili e Lavrik (1998).

Nas questões 4 e 5 do questionário diagnóstico (Figuras 21 e 22, respectivamente), investigam-se os conhecimentos dos alunos sobre o fenômeno da refração. Particularmente na questão 4 (Figura 21), tenta-se verificar o que os alunos sabem sobre a refração, uma vez que, segundo o teste realizado por Singh e Butler (2009), muitos estudantes entendem a refração apenas como o desvio da luz incidente

na interface entre dois meios. Já na questão 5 (Figura 22), pretende-se averiguar se o aprendiz determina a posição da imagem aparente do objeto (peixe), levando-se em consideração o ângulo de observação, porque, de acordo com Keawkhong et al. (2010) muitos alunos acham que a imagem aparente ocorre sempre verticalmente acima do objeto, independentemente da posição do observador.

**Figura 21** – Representação da quarta questão do teste diagnóstico produzido neste trabalho.

Questão 4: A figura abaixo representa a foto de um aquário de vidro com um lápis imerso em água. Por que o lápis parece estar quebrado?

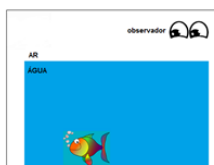


Justifique sua resposta: \_\_\_\_\_

**Fonte:** da própria autora

**Figura 22** – Representação da quinta questão do teste diagnóstico produzido neste trabalho.

Questão 5: A figura abaixo representa a posição real de um peixe num aquário. Esquematize, com representação de feixes de luz, a formação da imagem do peixe vista pelo observador.



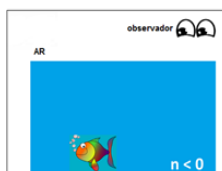
Justifique sua resposta: \_\_\_\_\_

**Fonte:** da própria autora

Na última questão, a sexta (Figura 23), tenta-se analisar a capacidade do aluno em representar a imagem formada em um meio com índice de refração negativo.

**Figura 23** – Representação da sexta questão do teste diagnóstico produzido neste trabalho.

Questão 6: Se o peixe da questão anterior estivesse imerso em um suposto líquido com índice de refração negativo. Onde estaria a imagem vista pelo observador?



Justifique sua resposta: \_\_\_\_\_

**Fonte:** da própria autora

A autora aplicou o questionário diagnóstico (Apêndice A) em uma escola particular de ensino, localizada na cidade de Araraquara no interior de São Paulo, na qual leciona. As respostas obtidas do grupo de respondentes (em um total de 14 alunos, do segundo ano do Ensino Médio), que já haviam estudado óptica geométrica

de forma tradicional, isto é, sem experimentos ou simulações, confirmaram as concepções alternativas discutidas anteriormente, tanto relacionadas à natureza da luz e sua forma de propagação, quanto sobre o fenômeno da refração. Além disso, revelaram que os estudantes não tinham conhecimento sobre a existência de materiais com índice de refração negativo.

### **4.3 Desenvolvimento de simulações e experimentos**

#### *4.3.1 Organização das atividades e ferramentas educacionais*

O produto educacional principal deste trabalho consistiu no desenvolvimento de propostas de atividades baseados em simulações de fenômenos físicos com modelagem matemática e experimentação. O objetivo da aplicação dessas atividades em salas de aulas, particularmente do Ensino Médio (EM), é o de despertar o interesse dos alunos pelo ensino de óptica geométrica e de lhes proporcionar uma aprendizagem mais significativa. As simulações e experimentos foram construídos levando-se em conta que, para a faixa etária dos alunos do EM, a progressão do aprendizado dos conceitos pode estar sendo prejudicada por senso comum e concepções alternativas. Por isso, cada grupo de atividades para o ensino de determinado conceito levou em conta quais as possíveis concepções alternativas estariam afetando negativamente a aprendizagem, evidentemente no intuito de contorná-las e ou desconstruí-las. Na Tabela 7, apresentam-se o conjunto de atividades e suas respectivas ferramentas educacionais baseados em conceitos e concepções alternativas resumidas na Tabela 2, da seção 2.2. O desenvolvimento das atividades está detalhadamente discutido nas seções seguintes, sendo cada seção dedicada a um dos quatro grupos classificados na Tabela 7.

Todos os quatro conjuntos de atividades da Tabela 7 estão descritos e discutidos de forma concisa em um Guia Tutorial, dedicado ao professor aplicador e interessados. Tal Guia está reproduzido no Apêndice C. Nele, indicam-se os endereços URL para o acesso de todos os simuladores desenvolvidos com o Modellus-X e que foram sugeridos para as atividades.

**Tabela 7** – Atividades propostas para a motivação e o favorecimento da aprendizagem de conceitos do fenômeno de refração, com o uso de diferentes ferramentas educacionais como recursos computacionais, TIC, simulações com modelagem matemática e experimentação.

Título das Atividades		Ferramentas utilizadas	Objetivos Principais
1	Fenômenos Separados	- Experimentos envolvendo refração, reflexão e absorção, ocorrendo simultaneamente, assim como o conceito de intensidade luminosa; - Simulação no software Modellus-X, para a verificação do gráfico de intensidade luminosa versus distância da fonte de luz.	Mostrar que os fenômenos da refração, reflexão, transmissão e absorção da luz ocorrem simultaneamente
2	O Fenômeno da Refração	- Experimentos sobre refração. - Modelagem no software Modellus-X, utilizando fotos do experimento e simulações para a verificação dos ângulos incidentes e refratados, dependendo dos índices de refração.	Entender que a trajetória da luz depende do ângulo incidente e do índice de refração do meio em que será refratado.
3	Reflexão Interna Total	- Experimento verificando qualitativamente o ângulo crítico, de um laser incidindo em uma interface água/ar; - Simulações no software Modellus-X, para a determinação do ângulo crítico dependendo da variação dos índices de refração.	Mostrar que a reflexão interna pode ocorrer, dependendo do ângulo incidente e do meio em que será refratado.
4	Imagem Aparente	- Experimento simples para a verificação qualitativa de uma imagem aparente formada mediante um objeto imerso em água; - Simulação no software Modellus-X, para a verificação da possível posição de uma imagem aparente, de acordo com a variação do índice de refração do meio em que está o objeto.	Entender como se forma a imagem aparente de um objeto imerso em meio diferente. Verificar que a imagem aparente depende do índice de refração do meio no qual encontra-se o objeto, e também, da posição do observador.

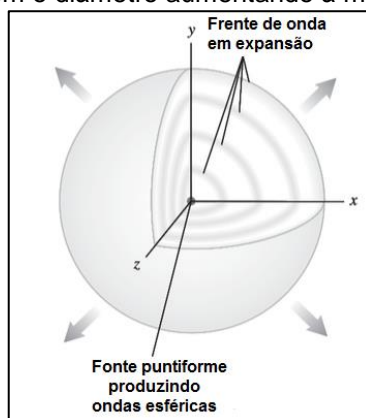
#### 4.3.2 Desenvolvendo as atividades sobre “Fenômenos separados”

Nesta seção discute-se o desenvolvimento da proposta de atividades 1 da Tabela 7, intitulada “Fenômenos Separados”, que envolve experimentos e a utilização de aplicativos de uso livre para *smartphones* e do *software* Modellus-X sobre fluxo luminoso e intensidade luminosa, para a compreensão de que fenômenos de refração, reflexão, transmissão e absorção de luz ocorrem simultaneamente.

##### 4.3.2.1 A lei do inverso do quadrado da distância para a intensidade luminosa

Em uma fonte luminosa pontual ideal, a luz emitida é isotrópica, isto é, a radiação emitida propaga-se radial e uniformemente em todas as direções (Figura 24). Suas frentes de onda (representações da propagação da onda) são esferas concêntricas cujo diâmetro aumenta à medida com que se propagam no espaço (HECHT, 2012).

**Figura 24** – Representação de uma fonte de luz pontual (puntiforme), produzindo ondas esféricas concêntricas (frentes de onda), com o diâmetro aumentando à medida que se propagam no espaço.



Fonte: Adaptado de Young e Freedman, 2009.

Como em uma fonte pontual de luz, a frente de onda é esférica, define-se o ângulo sólido  $\omega$  (Figura 25), como a razão entre o elemento de área  $A$  na superfície da esfera e o seu raio  $r$  ao quadrado (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2013):

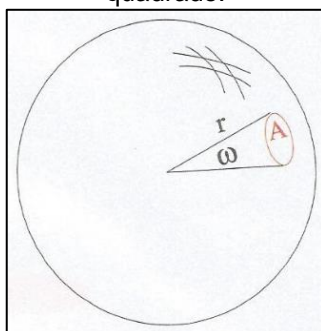
$$\omega = \frac{A}{r^2} \quad (1)$$

O elemento do ângulo sólido  $d\omega$ , nas coordenadas esféricas, é dado por

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2)$$

e a sua unidade é o esferorradiano (sr). Assim, o maior ângulo equivale a toda a área superficial da esfera, isto é,  $4\pi$  esferorradianos (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2013).

**Figura 25** – Ângulo sólido  $\omega$ , formado pela razão entre a área na superfície da esfera e seu raio ao quadrado.



Fonte: Oliveira Filho e Saraiva, 2013.

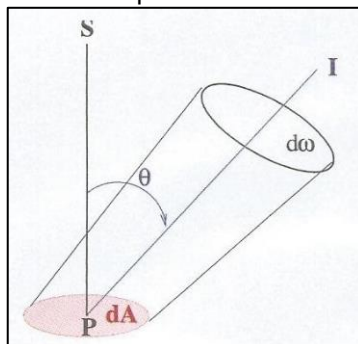
Define-se intensidade luminosa específica  $I$ , como a energia ( $dE$ ) que atravessa a unidade de área da fonte ( $dA$ ), por unidade de tempo ( $dt$ ) e por unidade de ângulo sólido, como a seguir:

$$I = \frac{dE}{dt dA d\omega} \quad (3)$$

Quando a energia não se propaga isotropicamente, como no caso da luz passando por um orifício, em uma placa opaca na frente da fonte luminosa (Figura 26), a intensidade passa a depender do ângulo ( $\theta$ ) entre a direção considerada e a normal à área:

$$I_{\perp} = \frac{dE \cos \theta}{dt dA d\omega} \quad (4)$$

**Figura 26** – Representação da intensidade específica na direção  $\theta$ , dentro de um ângulo sólido  $d\omega$ , na qual o segmento PS representa a normal à superfície  $dA$ .



Fonte: Oliveira Filho e Saraiva, 2013.

A intensidade, medida em  $J m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$  no SI (Sistema Internacional), não varia com a distância da fonte, porque sua quantidade de energia permanece constante, dentro do ângulo sólido. Em contrapartida, o fluxo luminoso ( $\Phi$ ), que é definido pela energia por unidade de área e por unidade de tempo, podendo ser medido por um detector, depende da distância em relação à fonte de luz (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). O fluxo de luz pode ser compreendido como a quantidade líquida de energia radiante atravessando a unidade de área, por unidade de tempo:

$$d\Phi = \frac{dE \cos \theta}{dA dt} = I_{\perp} d\omega \quad (5)$$

Integrando a equação (5), tem-se o fluxo dado por:

$$\Phi = \int I_{\perp} d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (6)$$



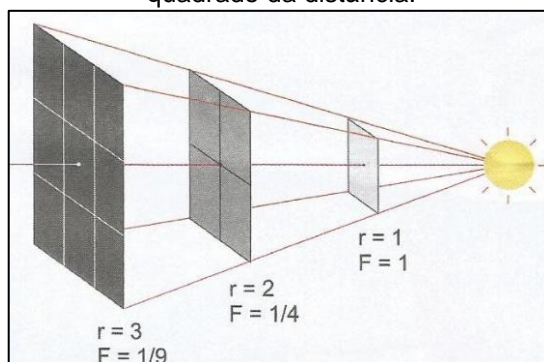
Desta forma, o fluxo corresponde à potência através de uma superfície, medido em watt m<sup>-2</sup> no SI.

Para uma fonte de luz puntiforme, o fluxo em função do raio  $r$  que define a distância à fonte será:

$$\Phi(r) = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (7)$$

sendo  $L$  a luminosidade intrínseca (ou potência) da fonte, isto é, a energia total emitida por unidade de tempo em todas as direções. Logo, o fluxo decresce com o quadrado da distância. A figura 27 mostra a representação de como o fluxo de luz diminui, por um fator de  $1/r^2$ , conforme aumenta-se a distância em relação ao centro de uma estrela, se considerada como fonte de luz pontual.

**Figura 27** – Variação do fluxo de luz, vindo de uma estrela considerada como fonte pontual. Conforme aumenta-se a distância em relação ao centro da estrela, o fluxo diminui com o inverso do quadrado da distância.



Fonte: Oliveira Filho e Saraiva, 2013.

Conceitos sobre intensidade e fluxo luminosos são cotidianamente tratados pela fotometria, que segundo Oliveira e Saraiva (2014), é a medida da luz proveniente de um objeto. Exemplos de aplicação da fotometria estão nas áreas de astronomia, como no caso de observação das estrelas e na luminotécnica, que trata questões iluminação artificial tanto em espaços interiores e exteriores, geralmente por profissionais de arquitetura e de fotografia (TOGINHO FILHO E LAURETO, 2009). Na luminotécnica, são empregados alguns conceitos como iluminância e luminância, além de intensidade e potência luminosas. A tabela 8 apresenta os significados dos termos técnicos utilizados na fotometria, bem como as unidades de medida no SI das grandezas físicas associadas a eles.

**Tabela 8** – Definição dos termos técnicos utilizados na fotometria, para a medida de luz proveniente de um objeto, assim como sua unidade de medida no Sistema Internacional. Adaptado de Toginho Filho e Laureto, 2009.

Termo Técnico	Unidade de Medida no SI	Definição
Fluxo luminoso	lm (Lúmen)	Energia luminosa por unidade de tempo ou potência luminosa
Intensidade Luminosa	lm/sr = cd (candela)	Potência luminosa por unidade de ângulo sólido
Iluminância ou iluminamento	lm/m <sup>2</sup> = lx (lux)	É a potência luminosa incidente em uma superfície, por unidade de área
Luminância	lm/m <sup>2</sup> .sr	Potência luminosa por unidade de área projetada por unidade de ângulo sólido

A diferença entre iluminância e luminância (Tabela 8) é que a primeira se refere à luz que chega à uma determinada área de uma superfície, enquanto que a luminância é a quantidade de luz que é refletida pela superfície. A luminância é utilizada para caracterizar emissores planos brilhantes ou superfícies refletoras, como apresenta a Figura 28.

**Figura 28** – Representação esquemática para a compreensão da diferença entre iluminância e luminância. Em (a) têm-se a representação da iluminância, na qual a luz incidente, emitida por uma fonte luminosa, chega até uma determinada superfície. Esta luz incidente na superfície, não é a visualizada pelo observador. Enquanto que, em (b), se representa a luminância, que é a luz refletida por uma superfície, e que pode ser percebida por um observador.



Fonte: Adaptado de CONCEITOS FUNDAMENTAIS [2010]

O fluxo descrito por Oliveira Filho e Saraiva (2014) e definido na eq. 7 é denominado por iluminância na fotometria (Tabela 8). A fim de se evitar ambiguidades, neste trabalho considerar-se-á como sinônimos a intensidade luminosa que chega a uma determinada área e a iluminância. O qual pode ser medido por meio de um aparelho denominado de luxímetro. O luxímetro é um aparelho que geralmente não têm nos laboratórios didáticos das escolas de Ensino Médio, mas existem muitos softwares livres de *smartphones* e *tablets*, que exercem a mesma função do aparelho.

Na próxima seção serão discutidos os experimentos desenvolvidos neste trabalho que envolvem a medida de intensidade luminosa de fontes puntiformes em função da distância, utilizando-se dois *smartphones*.

#### 4.3.2.2 Medindo e analisando a intensidade luminosa de fontes puntiformes

Embora, o conceito de intensidade luminosa não esteja incluído no currículo do Estado de São Paulo, a autora acredita que seu aprendizado pelo aluno favorecerá a desconstrução de possíveis concepções alternativas em óptica geométrica, tais como a de que os raios de luz são sempre paralelos, como discutido no capítulo 2 deste trabalho. Além disso, de acordo com Vieira, Lara e Amaral (2014), a relação com o inverso do quadrado da distância, prevista para a iluminância (eq. 7), é modelo de importância na Física, pois ocorre em outras situações, como na Lei Gravitação Universal de Newton ou na Lei de Coulomb.

Para a realização dos experimentos de medida da dependência da intensidade luminosa ou iluminância de uma fonte luminosa em função da distância são necessários dois dispositivos móveis do tipo *smartphone* ou *tablet*, que contenham câmeras fotográficas. Utiliza-se um deles como fonte de luz e o outro como luxímetro (ou seja, como medidor de intensidade luminosa).

Existem vários aplicativos gratuitos, tanto para a plataforma Android, quanto para a iOS e WindowsPhone que medem a intensidade luminosa. Neste trabalho foram testados dois aplicativos: o *Ourolux*<sup>4</sup> e o *Light Meter Tools-Trial*<sup>5</sup>. Ambos são considerados de fácil manipulação e de leitura simplificada, pois basta posicionar o dispositivo em frente à fonte de luz, para se ter o valor da intensidade luminosa, em lux, na tela. Os testes iniciais foram realizados com o aplicativo *Ourolux*, mas verificou-se que, para ele funcionar, o *smartphone* ou *tablet* precisa ter sensor de luz. Utilizando dispositivos diferentes, a autora percebeu que alguns deles não possuem esses sensores. Por outro lado, o *Light Meter Tools-Trial* realiza a medida

---

<sup>4</sup> Disponível em: <[https://play.google.com/store/apps/details?id=br.luximetro&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=br.luximetro&hl=pt_BR)>. Acesso em: 8 de julho de 2016.

<sup>5</sup> Disponível em: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=camera.sunnysixteen.standalone>>. Acesso em: 8 de julho de 2016.

em dispositivos com ou sem o sensor de luz, desde de que possuam câmera fotográfica.

O aplicativo *Ourolux* é realmente de fácil instalação e execução. No modo de execução, aparece uma tela uma lista de opções (Figura 29-a), entre elas “luxímetro”. Para essa opção, o aplicativo entra em uma segunda tela (Figura 29-b), passando automaticamente a funcionar como luxímetro “analógico” (ou seja, medidor de ponteiro). Para fixar-se o valor da leitura, espera-se o ponteiro parar de oscilar e aperta-se o botão “capturar”, e, para nova leitura, deve-se “liberar sensor”. Caso o usuário tenha acesso à um luxímetro de uso profissional, ele poderá efetuar a calibragem do aplicativo pela barra de rolamento que se encontra logo abaixo do botão “capturar”.

**Figura 29** – Imagens de tela de execução do Aplicativo *Ourolux*: em (a) tem-se a tela inicial, e clicando-se na opção “luxímetro”, aparece a segunda tela (b), modo em que o dispositivo móvel passa a operar como medidor de intensidade luminosa, em lux. Detalhe: para o uso deste aplicativo é necessário que o *smartphone* ou *tablet* tenha o recurso de sensor de luz operante.



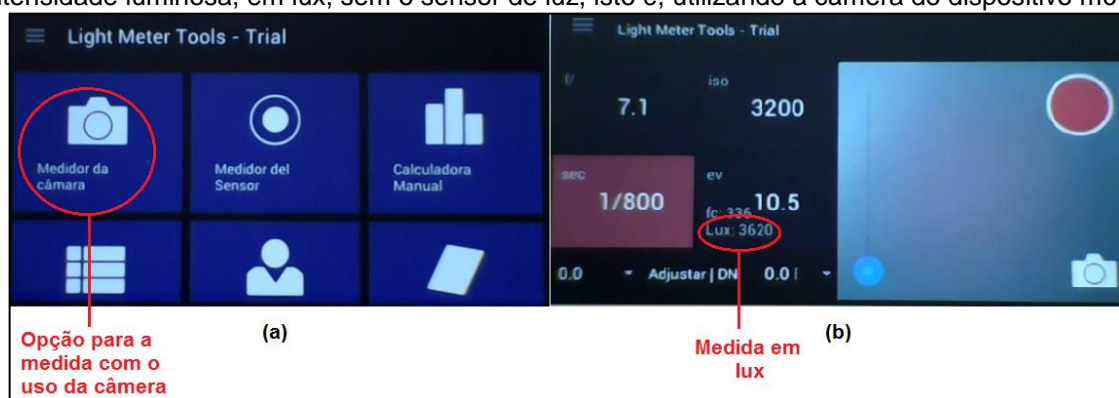
Fonte: Adaptado do manual de uso do *Ourolux*<sup>6</sup>.

O *Light Meter Tools-Trial* também é um aplicativo de fácil instalação, mas não há versão em português. Na tela inicial do aplicativo encontram-se duas opções de medida relacionadas ao tipo de sensor de luz (Figura 30-a). Escolhendo-se a opção “Medidor da câmara” ou “Medidor del sensor” (na versão em espanhol), o usuário estará optando por utilizar o luxímetro com o uso da câmera ou com o uso do sensor de luz, respectivamente. Escolhida uma das opções, aparecerá a segunda tela, onde há a possibilidade de leitura do valor da intensidade luminosa em lux. No exemplo da

<sup>6</sup> Disponível em: <<http://www.ourolux.com.br/app/manual/>>. Acesso em: 8 de julho de 2016.

Figura 30-b, encontra-se o modo de operação do aplicativo para a opção “Medidor da câmara”. O *Light Meter Tools-Trial* permite ao usuário variar alguns parâmetros como a abertura da câmera, o tempo de exposição e a medida que indica a sensibilidade do sensor da câmera à luz ambiente. Esses parâmetros auxiliam um fotógrafo no ajuste de condições como brilho e contraste para a obtenção de uma foto. Porém, a variação desses parâmetros para otimização de medidas da iluminância não foi analisada neste trabalho.

**Figura 30** – Aplicativo *Light Meter Tools-Trial*, em (a) tem-se a tela inicial, e clicando-se em “Medidor da Câmera”, aparece a segunda tela (b), a qual será utilizada para a realização das medidas de intensidade luminosa, em lux, sem o sensor de luz, isto é, utilizando a câmera do dispositivo móvel.

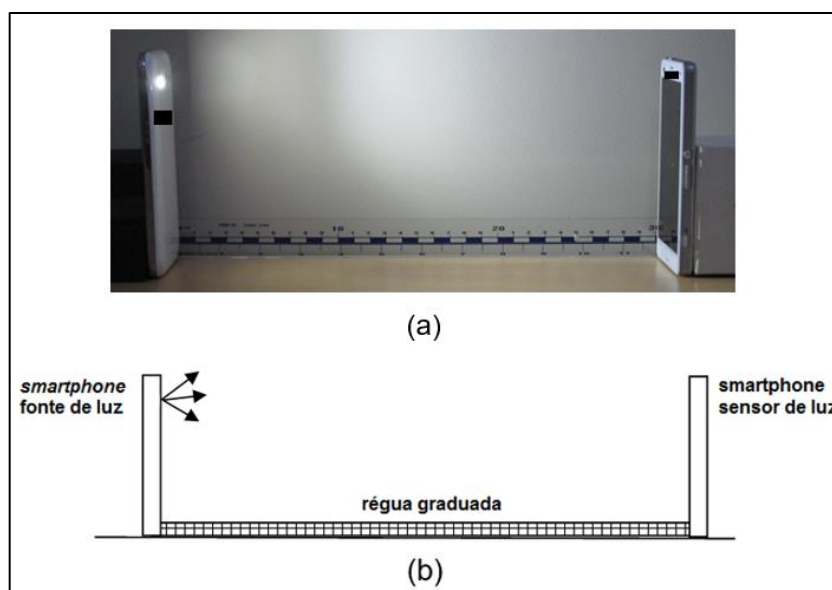


Fonte: da própria autora

Como comentado anteriormente, um dos dois dispositivos móveis (*smartphone* ou *tablet*) é utilizado como lanterna. Há diversos aplicativos gratuitos para as plataformas iOS e Android que utilizam o flash da câmera fotográfica para iluminação. O aplicativo *Brightest Flashlight Free*, por exemplo, é um dos ofertados gratuitamente para a plataforma Android.

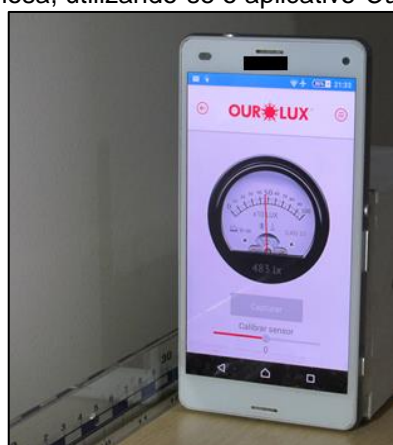
As medidas de intensidade luminosa foram realizadas a partir de montagem simples, como a exemplificada na Figura 31. Para verificar a queda na intensidade luminosa variou-se a distância do dispositivo luxímetro, medindo-se essa distância com uma régua e mantendo a posição do dispositivo fonte de luz constante. A Figura 32 mostra a tela do aplicativo *Ourolux*, ao realizar-se a medida da intensidade luminosa durante o experimento.

**Figura 31** – Foto (a) e diagrama esquemático (b) da montagem para a medida de intensidade luminosa em função da distância à fonte de luz. Um dos dois *smartphones*, o da esquerda, foi fixado e alinhado no ponto de referência “zero” e utilizado como fonte de luz. O *smartphone* da direita foi alinhado e utilizado como sensor para a medida da intensidade luminosa, enquanto variava-se sua distância em relação à fonte de luz. Uma régua foi utilizada para a medida do deslocamento e, com esses dados, a distância em relação a origem foi determinada. Detalhe: a régua foi disposta, sobre uma mesa, ao longo de uma parede, para se garantir o alinhamento horizontal do *smartphone*-sensor, durante o deslocamento.



Fonte: da própria autora.

**Figura 32** – Foto com tela ativa de *smartphone* no modo de operação para a medida da intensidade luminosa, utilizando-se o aplicativo *Ourolux*.



Fonte: da própria autora.

Na análise de dados, utilizou-se o *software* Modellus-X para gerar um gráfico de intensidade luminosa, medida em lux, em função da distância em relação a

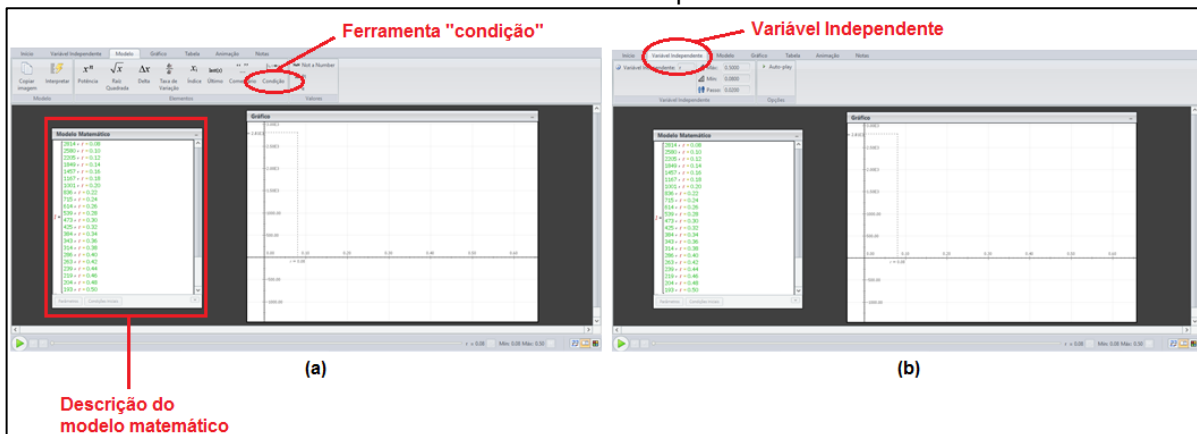
fonte de luz, em metros. O Modellus-X<sup>7</sup> é auto-explicativo e, além disso, as diversas ferramentas que oferece podem ser facilmente aprendidas a partir de tutoriais do atual desenvolvedor, encontrados, inclusive em português, *online* (Modellus, 2016).

Para gerar o gráfico no *software* Modellus-X, a partir dos dados obtidos experimentalmente, foi necessário utilizar a ferramenta “condição” que se encontra na aba “modelo” (Figura 33a). Esta ferramenta permitiu inserir os valores de intensidade luminosa para cada distância medida. A variável independente, que normalmente é o tempo, foi trocada pela variável  $r$  (distância da medida da intensidade luminosa até a fonte), Figura 33b. Assim, ao acionar-se o “play”, a curva de intensidade luminosa, em lux, em função da distância ( $r$ ), em metros, foi traçada, como a representada pela linha vermelha no gráfico da Figura 34. Para comparação, uma outra curva foi traçada considerando-se o modelo previsto do inverso do quadrado da distância para a iluminância (Eq. 7), no mesmo intervalo de  $r$  utilizado no experimento. O maior valor de iluminância medido no experimento foi utilizado como sendo o maior valor da curva simulada. Para isso, calculou-se a potência luminosa da fonte a partir do produto dos valores experimentais da iluminância máxima e  $r^2$  mínimo, e simulou-se os valores da iluminância como sendo a razão entre essa potência e o quadrado da distância, representados pela curva em roxo no gráfico da Figura 34. Outras abordagens poderiam ter sido realizadas para a escolha dos valores de referência da curva simulada ou mesmo mais dados poderiam ter sido obtidos para uma melhor acurácia e precisão dos valores. Porém, da Figura 34, percebe-se um bom grau de concordância entre os resultados experimentais e a simulação. Acredita-se que, com esse experimento e essa análise de dados, pode-se ensinar o conceito de fluxo de luz, para os alunos, além de se mostrar a queda da intensidade luminosa com o quadrado da distância. Se utilizados argumentos e discussões sobre como se dá essa dependência de queda da intensidade luminosa, a partir, por exemplo, da representação de raios de luz divergentes da fonte de luz puntiforme como os da Figura 27 e os da Figura 35, pode-se explicar que a densidade de raios diminui com o inverso do quadrado da distância, ao atravessarem as áreas das esferas concêntricas de raio  $r$  e com a fonte ao centro. Assim, o tratamento de conceitos como fluxo luminoso e intensidade luminosa podem passar a auxiliar a compreensão dos fenômenos óticos no caso de alunos do EM.

---

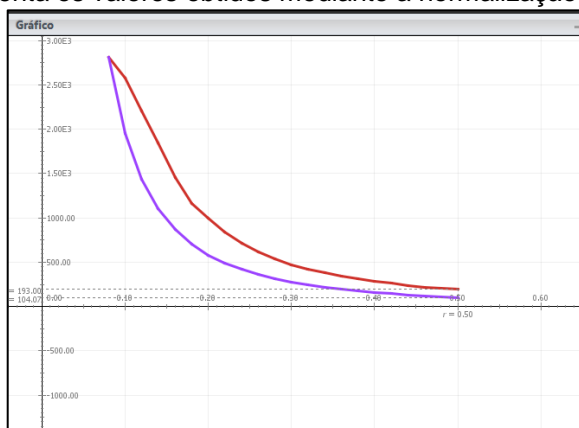
<sup>7</sup> A versão mais recente é a Modellus X (0.4.05), disponível para Windows, Linux e Mac OS.

**Figura 33** – Telas do software Modellus-X para a análise de dados do experimento de intensidade luminosa em: (a) apresenta-se a ferramenta “condição” utilizada para relacionar os valores experimentais da intensidade luminosa em função da distância ( $r$ ) da fonte de luz, dentro da descrição do modelo matemático; e (b) a variável independente foi definida como a distância da fonte luminosa  $r$  ao invés do tempo  $t$ .



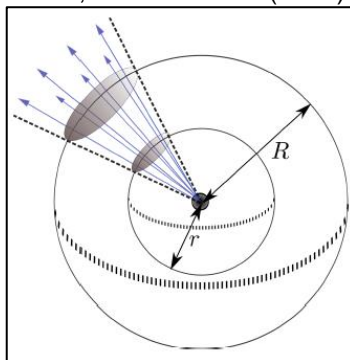
Fonte: da própria autora.

**Figura 34** – Curvas obtidas mediante o software Modellus-X. A curva de cor vermelha representa os valores de intensidade luminosa, em lux, em função da distância da fonte luminosa, em metros. A curva de cor roxa representa os valores obtidos mediante a normalização da grandeza dependente.



Fonte: da própria autora.

**Figura 35** – Representação da densidade de raios, dentro de um ângulo sólido, demonstrado por Vieira, Lara e Amaral (2014).



Fonte: Vieira, Lara e Amaral, 2014



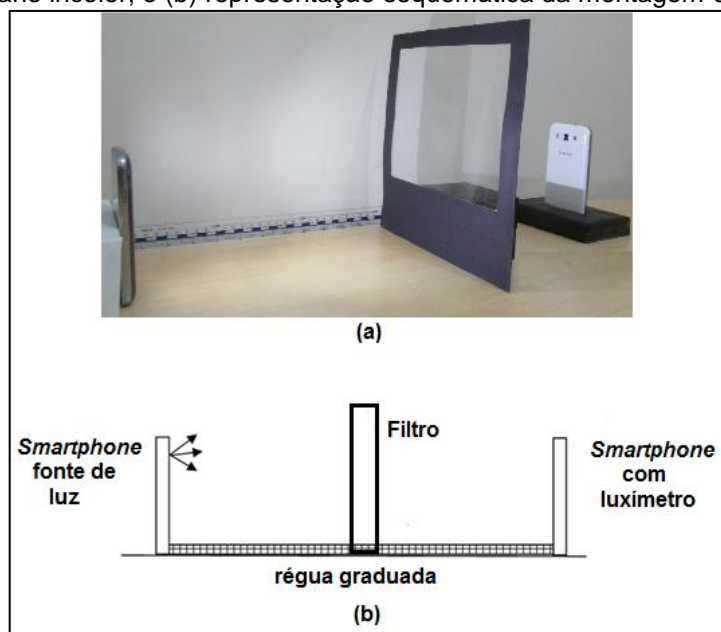
#### 4.3.2.3 Medindo e analisando reflexão, refração e absorção da luz

Para a verificação experimental e análise dos fenômenos da refração, da absorção e da reflexão ocorrendo concomitantemente, além dos dispositivos móveis e do aplicativos para fonte de luz e luxímetro, se propôs a utilização de filtros de luz. Como discutido anteriormente, geralmente nas escolas de nível básico não existem materiais disponíveis para a experimentação no ensino de Física, então, papel celofane foi utilizado como material substituto aos filtros de luz comerciais. O papel celofane além de ser muito acessível, é encontrado em qualquer papelaria.

Para a realização do experimento, fixou-se as posições do dispositivo fonte de luz e do dispositivo luxímetro a uma distância de mais ou menos 50 cm um do outro. Tomou-se a medida da intensidade da luz, em lux, para essa condição. Em seguida, entre a fonte de luz e o luxímetro, posicionou-se, de cada vez, diferentes filtros de luz (papel celofane, incolor e nas cores vermelho e azul, em uma estrutura de papel cartão), e mediu-se o valor da intensidade luminosa para cada caso. O arranjo experimental utilizado para essas medidas está representado na Figura 36. Com o filtro incolor não se verifica mudanças significativas no valor da intensidade luminosa. Desta forma, pode-se discutir com o estudante que o filtro incolor pouco absorve ou reflete a luz, e, portanto, a luz é transmitida/refratada quase que totalmente neste caso. Contudo, com o filtro vermelho (azul), ocorre uma drástica queda no valor da intensidade luminosa, sendo possível observar-se apenas a luminância dessa luz, vermelha (azul) em obstáculos à frente do luxímetro. Assim, pode-se discutir com os alunos que somente a luz vermelha (azul) sofre transmissão/refração, reduzindo a luminância original da fonte porque o filtro absorve as outras cores.

Para verificar-se o quanto cada filtro reflete de luz, colocou-se o luxímetro à frente do filtro para a medida da intensidade luminosa. Depois, retirou-se o filtro para nova medida e, a partir da comparação da intensidade medida com e sem o filtro, verifica-se que a intensidade luminosa é maior com o filtro, provando assim a ocorrência da reflexão. Portanto, por meio desse experimento semi-quantitativo, identifica-se os três fenômenos, a refração, a reflexão e a absorção, ocorrendo concomitantemente. Acredita-se que desta forma pode-se contribuir para a desconstrução da concepção alternativa de “fenômenos separados”, evidenciada nos estudos de Singh e Butler (1990).

**Figura 36** – Experimento para a verificação da refração, absorção e reflexão, a partir de medidas de iluminância através de filtro feito com papel celofane: (a) foto da montagem com o filtro feito com papel celofane incolor; e (b) representação esquemática da montagem experimental.



Fonte: da própria autora.

#### 4.3.3 Desenvolvendo as atividades sobre “O Fenômeno da Refração”

Como visto no capítulo 2 deste trabalho, muitos alunos explicam a refração como o desvio sofrido pela luz ao atravessar um meio diferente, por não compreenderem bem o fenômeno de refração. Afinal, no caso de incidência de luz perpendicular à interface, segundo essa explicação dos alunos, o fenômeno não ocorreria. Além disto, de acordo com experiência profissional da autora, alguns estudantes explicam o fenômeno segundo a Lei de Snell, mas na verdade não conseguem se aprofundar no significado do índice de refração, e muito menos, entender como o índice de refração afeta a passagem da luz em um certo meio. Desta forma, neste conjunto de atividades, intitulado “O Fenômeno da Refração”, pensou-se em experimentos e simulações utilizando ferramentas computacionais de modelagem matemática (software Modellus-X) para motivar a compreensão desse tema, incluindo o “novo” conceito de índice de refração negativo.

#### 4.3.3.1 Conceitos sobre refração: do índice positivo ao negativo

Para Salvetti (2008), a luz pode ser analisada sob duas vertentes, considerando-se a sua interação com o material como um todo, ou apenas com os elétrons. Quando sua interação acontece com os materiais, seu estudo pode ser analisado por meio dos conceitos relativos às ondas eletromagnéticas. Uma vez que essa interação ocorra com os elétrons do material, deve-se considerar seu comportamento corpuscular por partículas, chamadas de fótons. Portanto, a luz interage de duas formas, macroscopicamente com a matéria, com características de onda, e microscopicamente com as partículas, comportando-se como fóton. De acordo com os objetivos desse trabalho, que envolve o estudo da óptica geométrica, considerou-se apenas a luz como onda eletromagnética.

Segundo Salvetti (2008), o movimento é a essência da luz. A luz, da perspectiva de ondas eletromagnéticas, é produzida por cargas elétricas em movimento. Por exemplo, por meio de aquecimento de metais. Quanto maior o aquecimento do material, maior será a frequência de oscilação das cargas elétricas e conseqüentemente, maior será a frequência da luz emitida.

Quando uma onda eletromagnética incide em um meio, cujas frequências naturais de vibrações dos elétrons são diferentes da frequência da onda incidente, os elétrons vibram e transmitem a radiação incidente, permitindo que a onda se propague através dele. Materiais como vidro e água, que permitem que a luz se propague através deles, são considerados materiais transparentes. Contudo, os elétrons do vidro, por exemplo, possuem frequência natural de vibração próxima do ultravioleta, então, embora transparentes para a luz visível, vidros tornam-se opacos para ondas eletromagnéticas nessa faixa do espectro. Os elétrons absorvem essa energia radiante pois entram em ressonância para essas frequências, vibrando em uma amplitude relativamente alta, fazendo com que o material perca energia em forma de calor devido à colisão de cada átomo do vidro com os seus vizinhos (Hewitt 2011). Desta forma, quando a luz atravessa um meio, a frequência da luz reemitida, a qual é transferida de átomo para átomo, é a mesma da que iniciou a oscilação<sup>8</sup>, mas, devido

---

<sup>8</sup> Há outros efeitos da radiação com a matéria, envolvendo, por exemplo, vibrações da rede cristalina (fônons), que podem alterar a frequência da luz reemitida pelo material, mas não serão tratados neste trabalho.

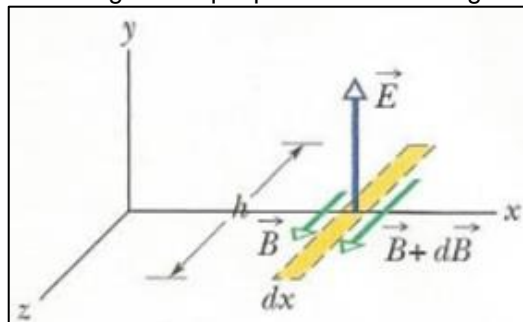
as absorções e re-emissões, ocorre um “atraso” para a luz se propagar. Portanto, a luz se propaga com valores de velocidades diferentes nos meios materiais. Essa velocidade é conhecida como velocidade de fase, como será discutida a seguir.

A Figura 37 representa uma região no espaço vazio por onde passa uma onda eletromagnética. O fluxo do campo elétrico  $\Phi_E$  varia com o tempo e, segundo a Lei de Maxwell para a indução, um campo magnético induzido  $B$  é gerado tal que:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (8)$$

onde  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  representam a permeabilidade magnética no vácuo e a permissividade elétrica do vácuo, respectivamente.

**Figura 37** – Representação de um campo elétrico e do um campo magnético perpendicular induzido, para uma onda eletromagnética que passa em certa região do espaço vazio.



Fonte: Halliday e Resnick (2012).

Aplicando-se a Equação 8 para as condições de propagação da onda eletromagnética representada na Figura 37, tem-se:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = -(B + dB)h + Bh = -hdB \quad (9)$$

Como o fluxo  $\Phi_E$  que passa pelo retângulo é:

$$\Phi_E = (E)(hdx) \quad (10)$$

E derivando-se a Equação 10 em relação ao tempo, tem-se que:

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = h dx \frac{dE}{dt} \quad (11)$$

Então, substituindo as Equações 11 e 9 na Equação 8, e usando-se a notação de derivada parcial, obtêm-se:

$$-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (12)$$

Considerando-se que são ondas eletromagnéticas planas, com  $E_m$  e  $B_m$  sendo as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente, tem-se que:

$$E = E_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (13)$$

$$B = B_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (14)$$

onde  $k$  é o número de onda e  $\omega$  a frequência.

Assim, substituindo-se as Equações 13 e 14 na Equação 12, têm-se:

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 (\omega/k)} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c} \quad (15)$$

Como a razão entre as amplitudes  $E_m$  e  $B_m$  é igual a velocidade da luz no vácuo  $c$ , e relacionado com a Equação 15, obtêm-se:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (16)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, porém para um meio diferente do vácuo, encontra-se que a velocidade da luz  $v_f$  nesse meio é:

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (17)$$

A velocidade  $v_f$  é denominada velocidade de fase da luz, portanto, quando a luz interage com a matéria, muda-se sua velocidade de fase. A razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio é chamado de índice de refração ( $n$ ), ou seja:

$$n = \frac{c}{v_f} \quad (18)$$

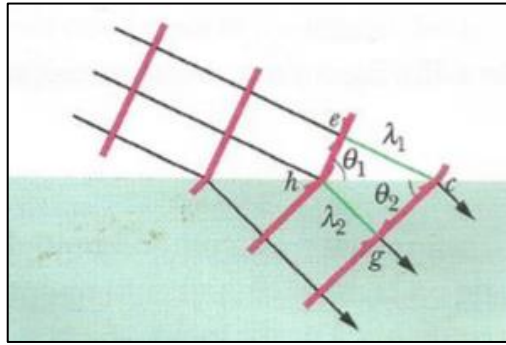
Logo, das Equações 16, 17 e 18, o índice de refração pode ser descrito em termos da permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do meio onde a luz sofre refração:

$$n^2 = \frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0} \quad (19)$$

Para deduzir a lei da refração (conhecida como Lei de Snell) pode se utilizar o princípio de Huygens, que diz: “Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo  $t$ , a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias”. Quando uma onda se aproxima da superfície de separação entre dois meios, alguns pontos da frente de onda se refratam primeiro. Na Figura 38, mostra-se que o ponto  $e$  de uma frente de onda deve percorrer uma distância  $\lambda_1$  (comprimento de onda no meio 1, de incidência) para chegar ao ponto  $c$ , com um tempo  $\lambda_1/v_1$ , em que  $v_1$  é a velocidade do meio no qual a onda incide. Ao mesmo tempo, o ponto  $h$  deve percorrer  $\lambda_2$  (comprimento da onda no meio 2), mas com velocidade diferente, uma vez que o ponto  $h$  já se encontra na superfície de separação dos meios (HALLIDAY E RESNICK, 2012, p. 72 e 73). Como os tempos são iguais, então:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (20)$$

**Figura 38** – Representação de frentes de onda sofrendo refração.



Fonte: Adaptado de Halliday e Resnick (2012).

Utilizando-se dos triângulos  $hce$  e  $hcg$  (Figura 38), têm-se:

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc} \quad (21)$$

e

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{\lambda_2}{hc} \quad (22)$$

A razão entre as Equações 21 e 22 resulta em:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (23)$$

Finalmente, relacionando-se a Equação 23 com a Equação 18, chega-se à Lei de Snell:

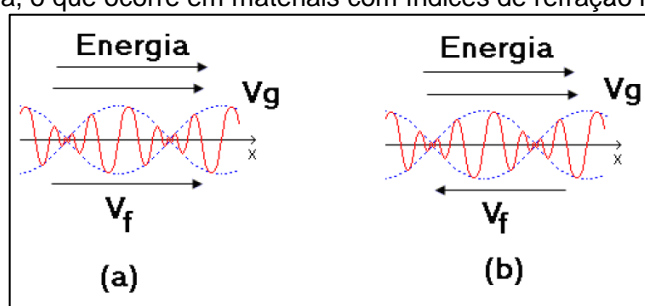
$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (24)$$

A velocidade de fase, de uma onda eletromagnética, não carrega informação, logo ela possui o mesmo comportamento em qualquer posição e tempo. Assim, a velocidade de fase pode ter valor maior do que a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ). A velocidade de grupo é a velocidade da propagação dos pacotes de onda e partes desses pacotes podem se mover com velocidades distintas. A velocidade que transmite informação é a velocidade de frente, que corresponde ao início da perturbação ondulatória, portanto, ela não pode ser maior que a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ). Em um meio onde o índice de refração não depende da frequência, isto é,

não há dispersão, a velocidade de fase é igual a velocidade de grupo (SANTOS, 2011). Por sua vez, em metamateriais, os quais podem apresentar permeabilidade magnética ( $\epsilon$ ) e permissividade elétrica ( $\mu$ ) negativas, a velocidade de fase é negativa, e se propaga em sentido oposto a velocidade de grupo e a energia, como representado na Figura 39. Isto leva a um índice de refração negativo (Equação 18) e a outros fenômenos ópticos inusitados.

Metamateriais, por exemplo, podem ser utilizados para fabricar superlentes planas (PENDRY e SMITH, 2006) ou mesmo “mantos da invisibilidade”, isto é, roupas ou dispositivos capazes de tornar uma pessoa ou um objeto invisível (PENDRY; SCHURIG E SMITH, 2009). De todos os livros didáticos em que a autora tem conhecimento (ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013; BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2013; BONJORNO et al., 2013; GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2013; LUZ; ÁLVARES, 2013; SANT’ANNA et al., 2013; TORRES, et al., 2013; YAMAMOTO; FUKU, 2013) apenas o Sant’anna et al., 2013 fala, a título de curiosidade, sobre materiais com índice de refração negativo e o manto da invisibilidade. Porém, acredita a autora que um tema tão atual e de tão alto impacto tecnológico deveria ser abordado no ensino da óptica geométrica com o objetivo de compreensão de conceitos, do que apenas o de instigar o interesse dos alunos.

**Figura 39** – Em (a) apresenta-se a velocidade de fase ( $v_f$ ) propagando-se no mesmo sentido que as velocidades de grupo ( $v_g$ ) e energia, geralmente previsto para propagações em materiais com índices de refração positivos. Em (b) a velocidade de fase ( $v_f$ ) têm sentido oposto a velocidade de grupo ( $v_g$ ) e a energia, o que ocorre em materiais com índices de refração negativos.



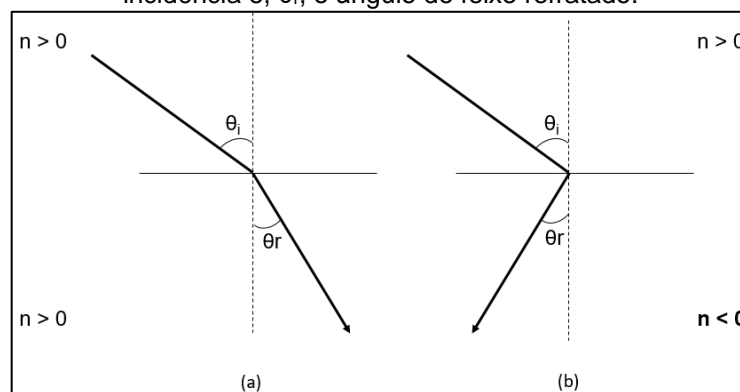
Fonte: Santos (2011).

Veselago (1968), discutindo as características de materiais com valores de permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) negativos, predisse o comportamento diferente da propagação da luz para esses materiais em comparação com aquele em materiais tradicionais ( $\epsilon > 0$  e  $\mu > 0$ ). Chamou esses novos materiais, de índice de refração negativa, de “canhotos”. Como na época não existissem



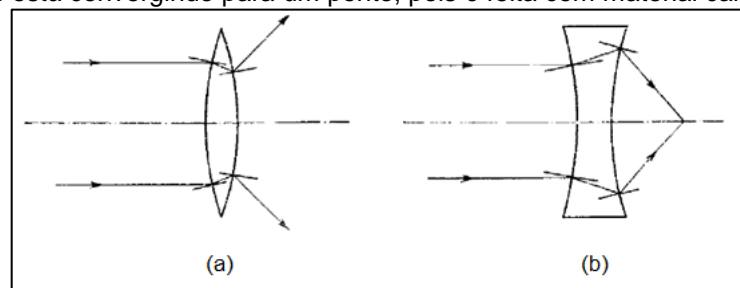
tecnologias para fabricar os materiais canhotos, e não havendo materiais naturais com índice de refração negativo, Veselago apenas propôs quais seriam as principais propriedades desses materiais e quais poderiam ser algumas de suas aplicações. Uma diferença fundamental dos materiais canhotos em relação aos existentes ( $\epsilon > 0$  e  $\mu > 0$ ) seria o desvio da trajetória da luz para o mesmo meio em que chegou o raio incidente (Figura 40). Desta forma, segundo Veselago, lentes delgadas convexas e côncavas, feitas de “canhotos”, provocariam efeitos opostos aos esperados pelas lentes tradicionais. Assim, as lentes convexas seriam divergentes e, as côncavas, convergentes (Figura 41).

**Figura 40** – Diferença da trajetória da luz incidente em meios com índice de refração  $n$  positivo e negativo: em (a) têm-se o raio refratado em um meio com índice de refração positivo, enquanto que em (b) o raio refrata-se em um meio com índice de refração negativo.  $\theta_i$  significa ângulo do feixe de incidência e,  $\theta_r$ , o ângulo do feixe refratado.



Fonte: Da própria autora.

**Figura 41** – Representação, proposta por Veselago (1968), de lentes feitas com materiais canhotos, isto é, cujo índice de refração é negativo. Em (a), têm-se uma lente que geralmente tenderia a convergir os raios, mas como é feita com material de índice de refração negativo, ela os diverge. Da mesma forma, em (b), verifica-se uma lente que normalmente tenderia a divergir os raios incidentes, mas está convergindo para um ponto, pois é feita com material canhoto.

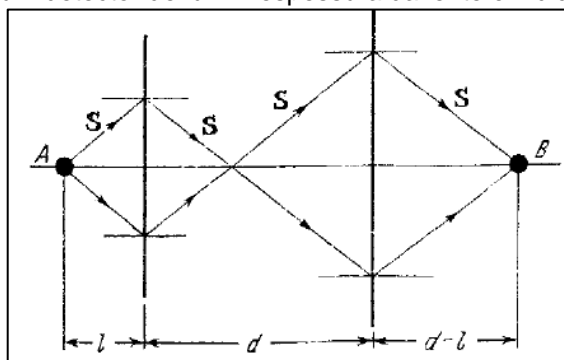


Fonte: Adaptado de Veselago (1968).

Veselago (1968) também propôs a possibilidade da construção de lentes planas com materiais canhotos (Figura 42). Segundo ele, tais lentes focalizariam

imagens com maior nitidez do que as lentes feitas com materiais conhecidos ( $\epsilon > 0$  e  $\mu > 0$ ).

**Figura 42** – Representação esquemática para propagação de luz em lentes planas construídas com materiais canhotos, como proposta por Veselago (1968). O ponto A representa a fonte de luz e, o ponto B, um detector de luz. A espessura da lente é indicada por  $d$ .



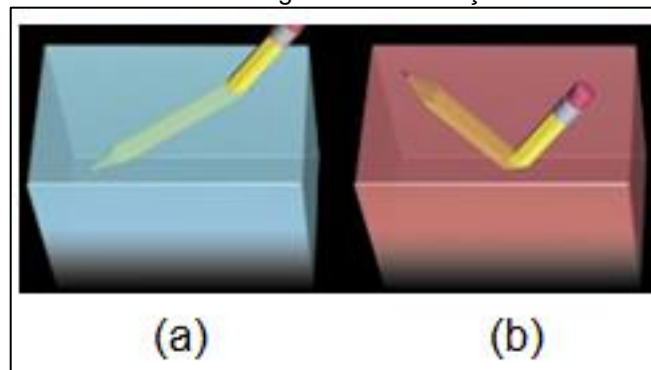
Fonte: Veselago (1968).

Desde a década de 90 já existem materiais produzidos em laboratório que têm índice de refração negativo. Nesta época, John Pendry, em colaboração com cientistas da Marconi Materials Technology, na Inglaterra, conseguiu fabricar estruturas que desviaram a luz da mesma forma prevista por Veselago (1968) para materiais canhotos (PENDRY e SMITH, 2006). Tais estruturas têm sido denominadas como metamateriais e são baseadas em princípios da nanotecnologia. Os metamateriais são fabricados de tal forma que suas unidades são menores do que o comprimento de onda da radiação incidente, tal que a onda eletromagnética não “visualiza” uma unidade de cada vez, mas sim um conjunto delas, e cuja permeabilidade magnética e permissividade elétrica são negativas. Quando uma onda eletromagnética incide em um material com índice de refração positivo seus campos elétrico e magnético induzem movimentos oscilatórios nos elétrons do meio. Em um metamaterial, com índice de refração de negativo, esses movimentos seguem opostos aos campos elétrico e magnético da radiação incidente, e, desta forma, os elétrons tendem a “empurrar” a radiação para trás (Pendry e Smith, 2006).

Na Figura 43, mostra-se como a representação de objetos imersos em meios como os de metamateriais seria bem diferente daquela em materiais convencionais de índice de refração positivo. Um lápis, parcialmente imerso em um meio líquido com índice de refração positivo, como fato, pareceria estar quebrado, mas perceber-se-ia nitidamente que a parte imersa está dentro do líquido (Figura 43a). Por outro lado, o mesmo lápis, parcialmente imerso em um material com índice de

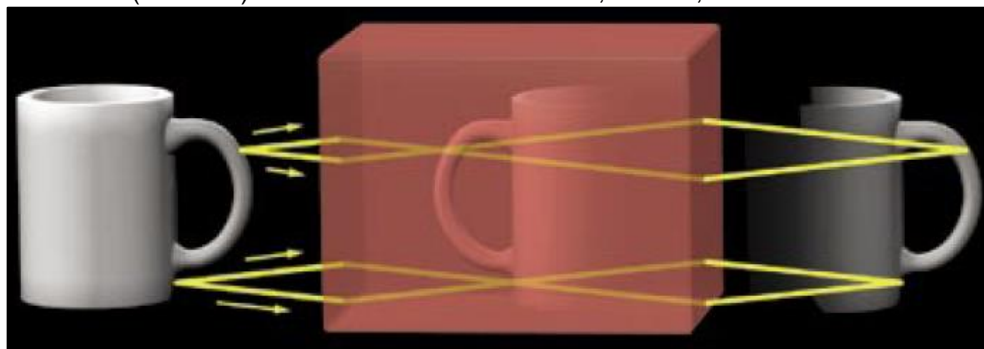
refração negativo, embora também parecesse estar quebrado, seria visualizado como totalmente fora do líquido (Figura 43b), porque a imagem da parte imersa seria formada acima da superfície, para esse específico ângulo de observação. Na Figura 44, mostra-se como são geradas duas imagens (ao invés de uma, como convencionalmente) para a propagação da luz refletida por um objeto e que passa por uma lente plana feita de um metamaterial. Uma imagem, invertida, é gerada dentro da lente e, a outra, do lado de fora da lente.

**Figura 43** – Representação de como se visualizaria um lápis parcialmente imerso em um meio líquido se esse líquido tivesse índice de refração positivo (a) ou índice de refração negativo (b), para o mesmo ângulo de observação.



Fonte: Pendry e Smith (2006).

**Figura 44** – Representação das duas imagens formadas pela luz refletida por uma xícara quando passasse por uma lente plana feita com material com índice de refração negativo. Uma imagem (invertida) se formaria dentro da lente e, a outra, fora da lente.



Fonte: Pendry e Smith (2006).

#### 4.3.3.2 “Experimentando” sobre refração com o software Modellus-X

O *software* Modellus-X permite a inserção de fotos para posteriores análises e desenvolvimento de modelagem matemática. Isso pode facilitar o desenvolvimento de atividades de investigação em salas de informática na escola, contornando, no caso do tema de refração, dificuldades relacionadas às montagens experimentais com materiais de índices de refração diferentes. Desta forma, utilizou-se a foto da Figura 45, na janela de simulação do *software* Modellus-X, para determinar-se a relação entre os ângulos de incidência e de refração de luz atravessando a interface formada por ar e água. A foto foi tirada pela autora que, para essa situação-problema, utilizou a luz de um apontador a laser de cor verde, comumente encontrado em lojas de informática, e um aquário com água.

A versão X do programa Modellus não tem instrumentos para a medida direta de ângulos, mas pode-se usar a ferramenta “vetor” para esse fim. Na versão 2.5, existe a ferramenta “Medir um ângulo”, bem como outras ferramentas úteis para a realização de medidas tais como a “Medir a distância sobre uma curva” e “Medir uma inclinação”. Porém, como comentado anteriormente no Capítulo 4 deste trabalho, a versão 2.5 só funciona no sistema operacional Windows e em versões anteriores ao Windows 8. Percebe-se que, com as novas atualizações do sistema, o programa na versão X melhorou muito em termos de interface visual e de interatividade com o usuário, ganhando na pontuação de critérios para *software* educativo (seção 4.1.2), mas perdendo ferramentas para medições.

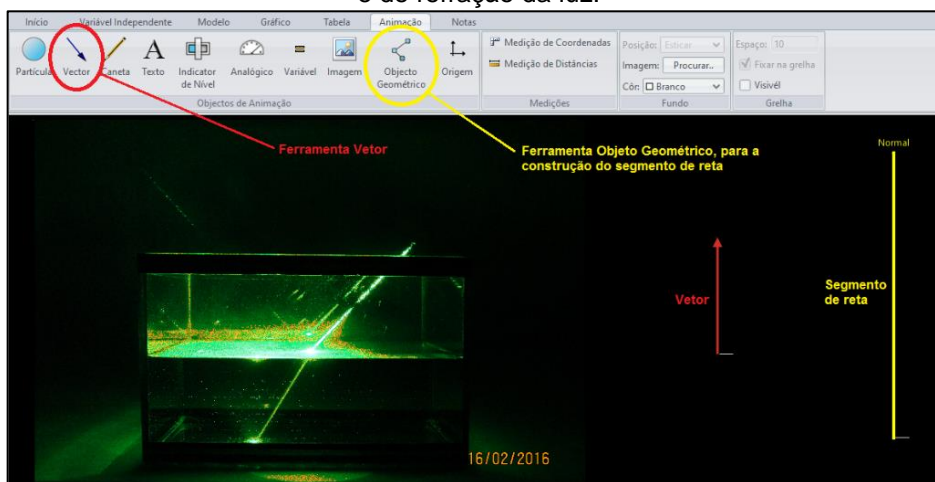
Nas Figuras 46 e 47, apresentam-se as telas de execução do Modellus-X com a imagem da Figura 45 inserida no ambiente de simulação. Na Figura 46, particularmente, indicam-se como são criadas as ferramentas “vetor” e “segmento de reta” e, na Figura 47, mostram-se essas ferramentas dispostas sobre a imagem para a obtenção do ângulo entre a linha horizontal e o vetor. Para a determinação do valor do ângulo de incidência da luz, o ângulo obtido na tela deve ser subtraído de  $90^\circ$ .

**Figura 45** – Foto que representa luz de uma ponteira laser verde imergindo em um aquário com água.



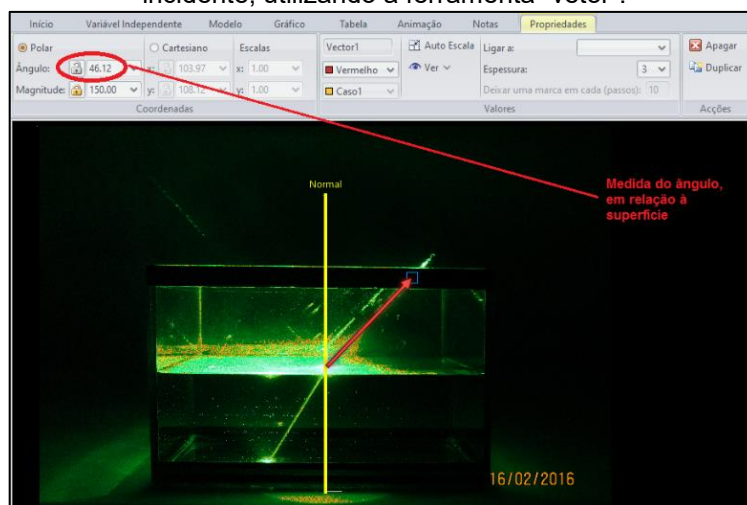
Fonte: da própria autora

**Figura 46** – Tela do *software* Modellus-X, com a imagem da Figura 45 inserida na janela de simulação, mostrando ferramentas que podem ser utilizadas para a medida dos ângulos de incidência e de refração da luz.



Fonte: da própria autora

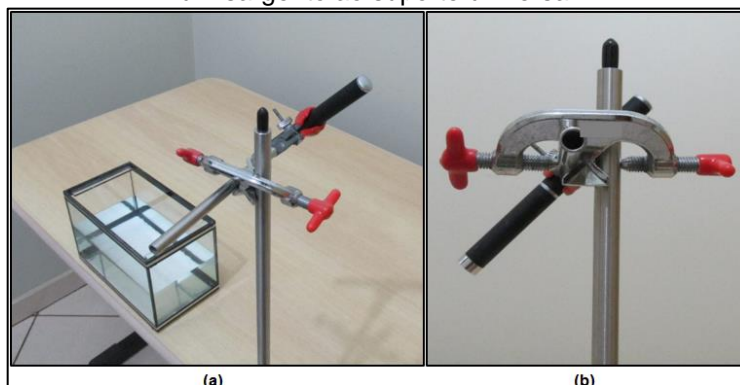
**Figura 47** – Tela do *software* Modellus-X, com a imagem da Figura 45 inserida na janela de simulação, mostrando como se pode obter o valor do ângulo entre a superfície de separação e o raio incidente, utilizando a ferramenta “vetor”.



Fonte: da própria autora

O ângulo do feixe de laser refratado pode ser obtido utilizando-se as mesmas ferramentas descritas anteriormente. A imagem pode ser alterada, apresentando-se variação da incidência até o limite de  $0^\circ$ , ou seja, até o de incidência perpendicular à superfície, para que o aluno, ao observar de que não há desvios nessa situação limite, compreenda que o fenômeno de refração não pode ser caracterizado apenas “por desvio sofrido pela luz”. Pode-se também investigar o fenômeno da refração realizando-se o mesmo experimento com outros meios líquidos refringentes preenchendo o aquário, tais como glicerina ou algum óleo razoavelmente transparente. Nesses casos, o apontador a laser pode ser fixado para gerar imagens em que se mantem o mesmo ângulo de incidência do feixe. Assim, as atividades com os alunos podem ser de comparação entre os ângulos de refração observados para os diferentes meios. Uma forma simples de se fixar o apontador é utilizando um suporte universal e garras (ou sargentos), típicos de montagens experimentais de Química (Figura 48).

**Figura 48** – Exemplo de fixação do apontador a laser, para manter-se constante o ângulo de incidência do feixe de luz no experimento de refração: em (a) têm-se uma visão geral da posição do aquário em relação ao suporte que mantém o apontador; e, em (b), em detalhe, o apontador fixo por um sargento ao suporte universal.



Fonte: da própria autora

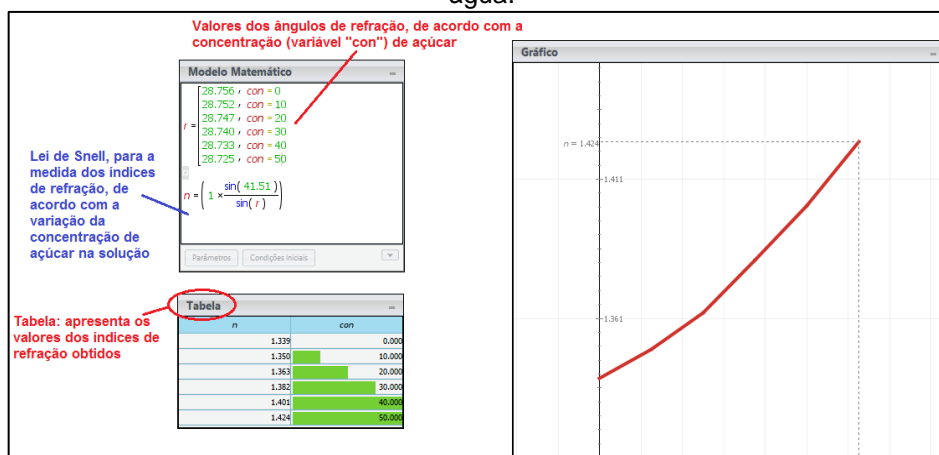
A ideia de aplicação desses experimentos com os estudantes do Ensino Médio é a de estimular a investigação com a modelagem computacional “expressiva” (VEIT E ARAUJO, 2005). Como discutido na seção 3.3 deste trabalho, isso significa atividades em que o estudante constrói seus próprios modelos e depois os analisa para suas próprias conclusões. Com as atividades propostas até o momento para o fenômeno de refração, a efetivação da aprendizagem com essa abordagem resultaria na compreensão de que as características dos materiais, da interface em que a luz incide, determinam a relação entre os ângulos de incidência e o de refração. Na

continuação dessa proposta, como relatado a seguir, desenvolveu-se uma atividade com exigências de uma análise mais elaborada envolvendo efeitos refrativos.

Utilizando-se também um aquário contendo água com um volume constante, pode-se acrescentar, gradualmente, medidas conhecidas de açúcar. Com o apontador a laser, fixado como indicado na Figura 48, mantém-se o ângulo de incidência da luz sobre o líquido no aquário, e tomam-se as imagens do feixe refratado para as diversas concentrações de açúcar. Tais imagens, e as respectivas concentrações de açúcar, podem ser fornecidas aos estudantes, para a investigação da situação-problema, a partir da modelagem matemática da Lei de Snell usando o *software* Modellus.

Entre os possíveis caminhos da investigação realizados pelos alunos, e que devem ser mediados pelo professor, está o em que, posteriormente à determinação do ângulo de refração das soluções de água e açúcar, constrói-se um gráfico da dependência do índice de refração com a concentração de açúcar. Tal gráfico pode ser obtido ao aplicar-se a Lei de Snell, na janela “Modelo Matemático”, para calcular o índice de refração de cada concentração (Figura 49). Neste exemplo, na mesma janela, usa-se a ferramenta “condição”, em que se vincula cada ângulo de refração à concentração de açúcar. Além disso, a variável independente *tempo* é trocada pela variável *concentração de açúcar* e, ao se aplicar o “play”, vê-se a curva sendo gerada no objeto “gráfico” criado. Uma das vantagens de se utilizar o *software* Modellus em situações como essa é que o modelo matemático do fenômeno físico pode ser descrito praticamente com a mesma sintaxe matemática encontrada nos livros didáticos.

**Figura 49** – Tela de execução do *software* Modellus-X em exemplo para a análise dos dados experimentais do índice de refração em função da concentração de açúcar em uma solução com água.



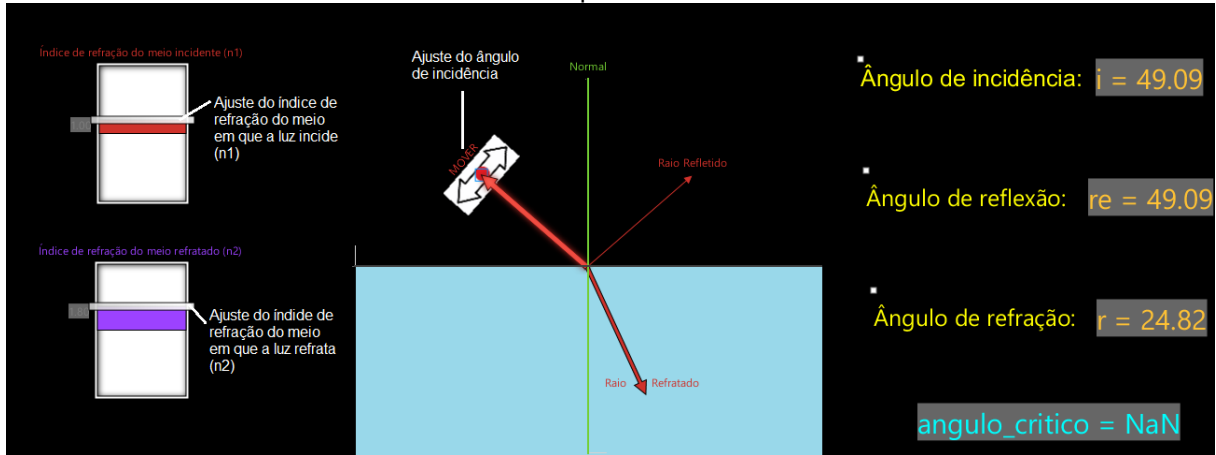
Fonte: da própria autora

Vale ressaltar que os resultados, obtidos numa tomada e análise de dados realizada pela autora usando os procedimentos descritos acima, mostraram valores de índice de refração em função da concentração de açúcar razoavelmente próximos aos encontrados na literatura. Espera-se um índice de refração de 1,3330 para a água à temperatura de 20°C (REFRACTOMETER, 2016), enquanto se obteve um índice de refração de 1,339. Para a solução de água e açúcar com concentração de 50%, a referência indica um índice de refração de 1,4201, enquanto que no experimento foi obtido o valor de 1,424. Assim, considerando-se prováveis desvios sistemáticos de medida, como por exemplo oriundos de uma ineficiente dissolução do açúcar devido à pouca agitação da solução ou mesmo de variações da temperatura ambiente, pode-se concluir que a investigação nas condições experimentais propostas é exequível e que permite resultados confiáveis.

Ainda, para uma melhor significação ao aprendizado da Lei de Snell, foi construído um simulador com o software Modellus-X, para ser utilizado de forma exploratória pelo aprendiz. Lembrando, como discutido na seção 3.3, que na simulação computacional exploratória o usuário pode analisar os resultados de uma simulação de fenômeno a partir de um modelo proposto por terceiros, podendo inserir arbitrariamente ou de forma limitada valores para as variáveis, ou mesmo alterar parâmetros e modelo matemático (VEIT e ARAÚJO, 2005). No simulador, utilizou-se o modelo de raios de luz para a investigação quantitativa das variações dos parâmetros no fenômeno de refração, tais como o índice de refração dos meios incidente e refratado e o ângulo de incidência. A simulação apresenta os valores do ângulo de incidência, reflexão, refração e crítico, obtidos pela variação dos índices de refração (meio incidente e refratado) e do ângulo do raio de luz incidente. Embora o aprendizado do conceito de ângulo crítico não seja foco deste conjunto de atividades, o aprendiz pode explorar as condições em que esse ângulo acontece, favorecendo subsunçores para a compreensão do fenômeno de reflexão interna total, particularmente tratada no grupo de atividades 3 (Tabela 7). O diferencial deste simulador é que ele prevê a ocorrência de índice de refração negativo. Na Figura 50, apresenta-se exemplo de simulação construída na qual um raio de luz incide em um meio com índice de refração positivo e, na Figura 51, simula-se o caso de um raio incidindo em um meio cujo índice de refração é negativo.

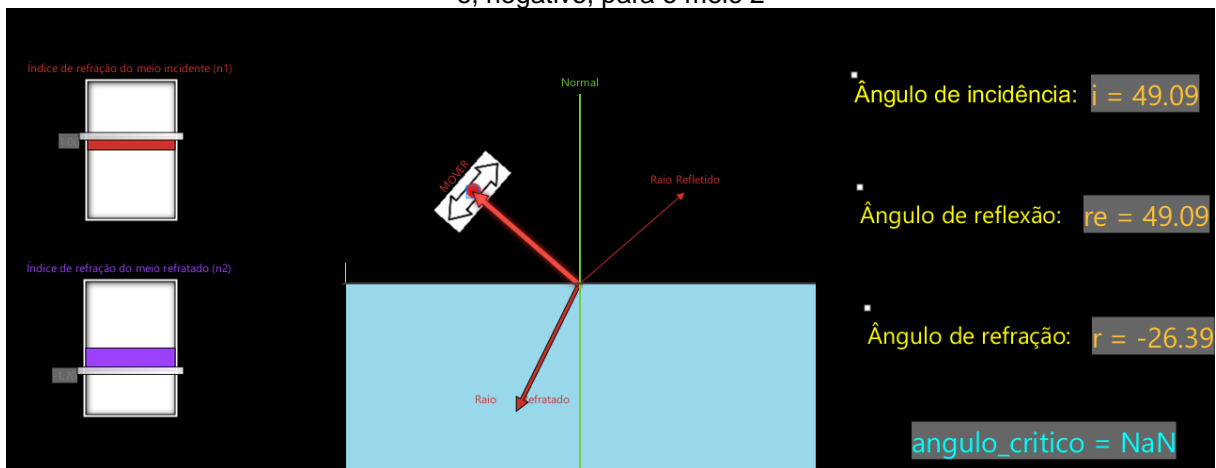


**Figura 50** – Exemplo da tela do simulador desenvolvido no *software* Modellus-X, para atividades de simulação computacional exploratória sobre refração em meios com índice de refração variando de positivo à negativo. Quando o usuário determina os parâmetros “índice de refração” e “ângulo de incidência”, a simulação apresenta os valores equivalentes para os ângulos de reflexão, refração e ângulo crítico. Os índices de refração utilizados nesta simulação foram de valores positivos para o meio 1 e para o meio 2.



Fonte: da própria autora

**Figura 51** - Mesmo da Figura 50, porém para a escolha de índice de refração positivo para o meio 1 e, negativo, para o meio 2



Fonte: da própria autora

#### *4.3.4 Desenvolvendo as atividades sobre “Reflexão Interna Total”*

Segundo os estudos realizados por Singh e Butler (1990), discutidos no Capítulo 2 deste trabalho, e a experiência profissional da autora, os alunos não consideram que o fenômeno de reflexão interna total possa ocorrer. Assim, as atividades, propostas neste grupo intitulado “Reflexão Interna Total”, envolvem a investigação de condições para a ocorrência de reflexão interna total, a partir de experimentação e simulação com modelagem matemática.

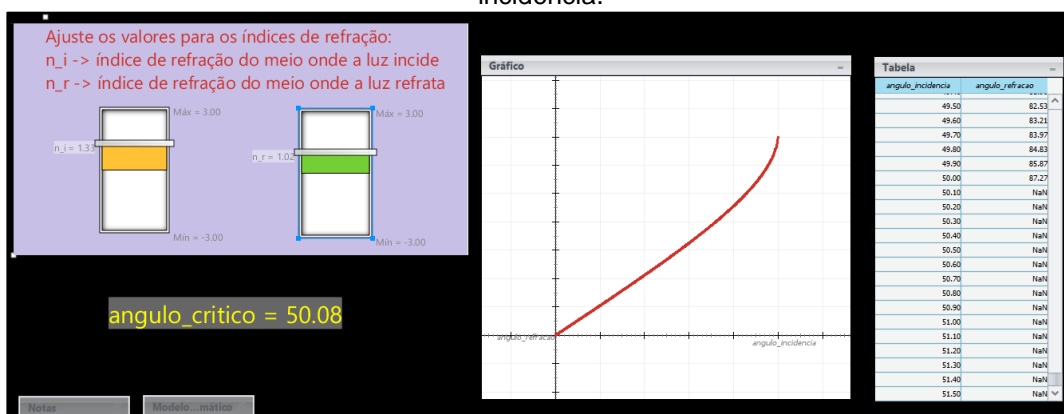
Propõe-se novamente um experimento com água em um aquário, em que o aprendiz possa investigar a possibilidade da reflexão interna total, quando luz, no caso proveniente do apontador a laser, incide da água para o ar. Isso pode ser realizado com o apontador posicionado de fora, mas próximo, da base do aquário. Assim, luz, oriunda do apontador, incide primeiramente do ar para a água e, posteriormente, da água para o ar (Figura 52). Para acompanhar as atividades de investigação de condições para reflexão total, desenvolveu-se mais um simulador no Modellus-X de uso exploratório pelos alunos. Nele, é gerada a curva de variação do ângulo de refração em função do ângulo de incidência e indicado (se houver) o ângulo crítico de reflexão para luz que incide na interface entre dois meios, a partir da escolha dos índices de refração desses meios pelo usuário (Figura 53). Assim que o “play” é disparado, o simulador varia automaticamente o ângulo de incidência, entre 0 e 90°, e calcula o valor do ângulo crítico. Com os resultados obtidos nesse simulador e também combinados com os que podem ser encontrados com o simulador da seção 4.3.3.2, o estudante pode escolher os ângulos de incidência adequados aos experimentos de reflexão total no aquário com água e/ou mesmo desenvolver diversas investigações de forma autônoma para diferentes situações-problemas reais.

**Figura 52** – Experimento para a investigação da reflexão interna total, usando um aquário contendo água. Incide-se a luz de um apontador a laser posicionado fora mas próximo à base do aquário. Variando-se o ângulo de incidência na interface água/ar, pode-se verificar: em (a) o caso em que há reflexão de parte da luz na água e há luz em parte transmitida (refratada) no ar; e, em (b), o caso em que há a reflexão da luz na água, mas não há luz transmitida no ar, caracterizando-se a situação de reflexão interna total.



Fonte: da própria autora.

**Figura 53** – Simulador desenvolvido com o software Modellus-X, para a análise do ângulo crítico. Variando-se os valores dos índices de incidência e de refração da luz, têm-se o valor do ângulo crítico, assim como a análise gráfica da variação do ângulo de refração em função do ângulo de incidência.



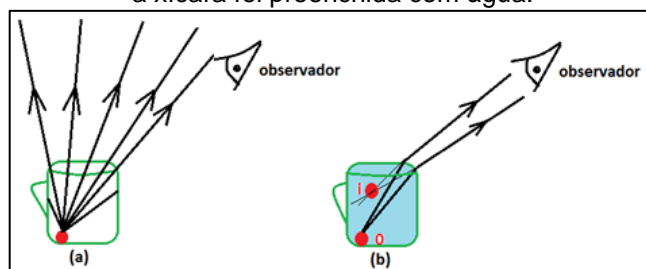
Fonte: da própria autora.

#### 4.3.5 Desenvolvendo as atividades sobre “Imagem Aparente”

Como discutido no Capítulo 2, deste trabalho, há concepções alternativas sobre a formação de imagens e o fenômeno de refração. Para evitar ou desconstruir tais concepções, foi pensado um conjunto de atividades, aqui intitulado de “Imagem Aparente”, com um experimento simples e de análise qualitativa dos resultados e com simuladores desenvolvidos no Modellus-X. O experimento baseia-se na verificação de imagens formadas por dioptros planos. É um experimento bem conhecido, e versões dele podem ser encontradas em livros paradidáticos, como no caso do livro de Peruzzo, 2012.

Para o experimento precisa-se de um recipiente, de cor sólida, isto é, não pode ser transparente, e um objeto pequeno. Nos testes realizados pela autora, foram utilizadas uma xícara (recipiente) e uma moeda (objeto). A xícara foi colocada em uma mesa plana, apenas com a moeda dentro dela, e, em seguida, foi pedido para um observador afastar-se da xícara até não conseguir mais visualizar a moeda, posicionando-se assim, na iminência de enxergar a moeda. Foi adicionada água na xícara, tomando-se o cuidado para não tirar a moeda do lugar. Com a adição da água, o observador relatou que conseguiu ver novamente a moeda. Nas Figuras 54a e 54b, representam-se as situações antes e após a adição de água à xícara, respectivamente. Na Figura 54a, mostra-se que no local onde o observador encontra-se não chega luz refletida da moeda, portanto o observador não a visualiza. Na Figura 54b, mostra-se que o efeito de refração da passagem pela interface água/ar possibilita a chegada da luz refletida pela moeda ao olho do observador, formando-se a imagem aparente da moeda (i).

**Figura 54** – Esquemas representativos do experimento da moeda em uma xícara. Em (a), o observador está posicionado na distância limite em que deixa de ver a moeda na xícara sem água. Em (b), o observador, na mesma posição de (a) passa a ver a imagem formada da moeda (i), porque a xícara foi preenchida com água.

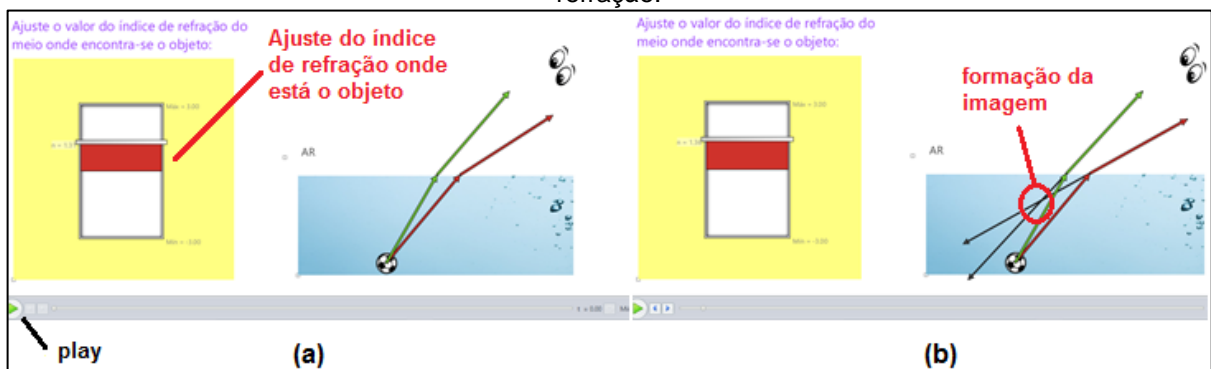


**Fonte:** da própria autora.

Para auxiliar as discussões na análise qualitativa dos resultados do experimento apresentado acima, desenvolveu-se um simulador (de caráter exploratório) no Modellus-X em que se pode verificar a posição em se forma a imagem de uma bola que está dentro de uma piscina com líquido, do ponto de vista de um observador fora da piscina. O usuário pode variar o valor do índice de refração do líquido, entre -3 e 3 e automaticamente ver o que ocorre com o feixe de luz refletido pela bola (Figura 55a). Nesse simulador, foram utilizados vetores para a representação dos raios, porque esta ferramenta do Modellus permite o controle dos ângulos na modelagem matemática da simulação. Neste caso, a variável tempo foi vinculada à magnitude dos vetores que mostram a posição da formação da imagem,

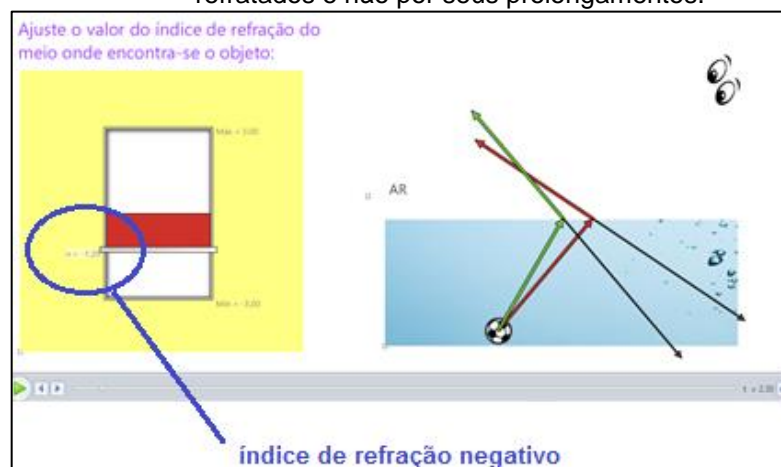
tal que ao disparar-se o “play”, a simulação mostra os prolongamentos dos “raios” (vetores) sendo traçados no decorrer do tempo. A posição da imagem é o ponto em que os prolongamentos dos raios se cruzam, e se localizará dentro do líquido se o índice de refração for escolhido entre os valores positivos (Figura 55b). Quando considerado também índices de refração negativos para o meio onde está o objeto (Figura 56), a imagem forma-se no cruzamento dos raios refratados e não de seus prolongamentos. Assim, para o observador, o objeto parecer estar acima da superfície do líquido.

**Figura 55** – Simulador desenvolvido no *software* Modellus-X para a verificação da posição da imagem aparente, que deve se formar quando um objeto se encontra imerso em um meio com índice de refração diferente do índice de refração onde está o observador ( $n_r$ ). Em (a) tem-se a tela inicial, em que o índice de refração onde está o objeto deve ser escolhido no indicador de nível. Em (b), tem-se a tela do simulador após apertar-se o “play”, em que se vê onde se cruzam os prolongamentos dos raios que chegam aos olhos do observador, no caso da escolha de valores positivos de índice de refração.



Fonte: da própria autora.

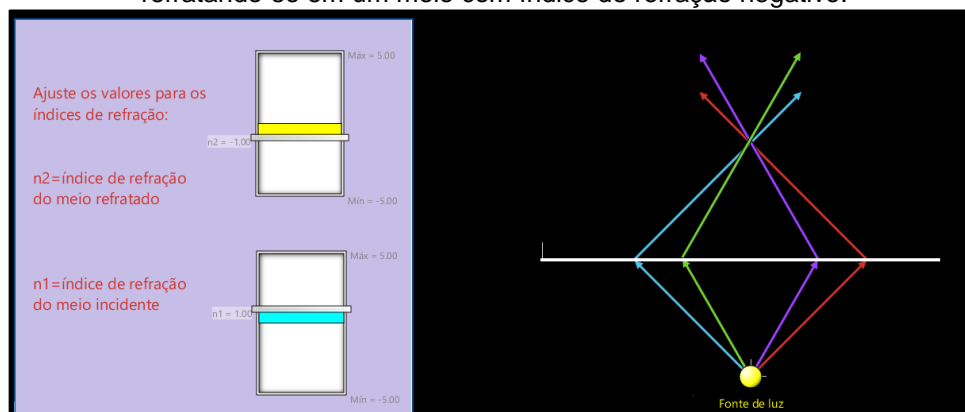
**Figura 56** – O mesmo que a Figura 55, porém para o caso em que é escolhido índice de refração negativo para o líquido. A posição da imagem se dá no cruzamento dos raios refratados e não por seus prolongamentos.



Fonte: da própria autora.

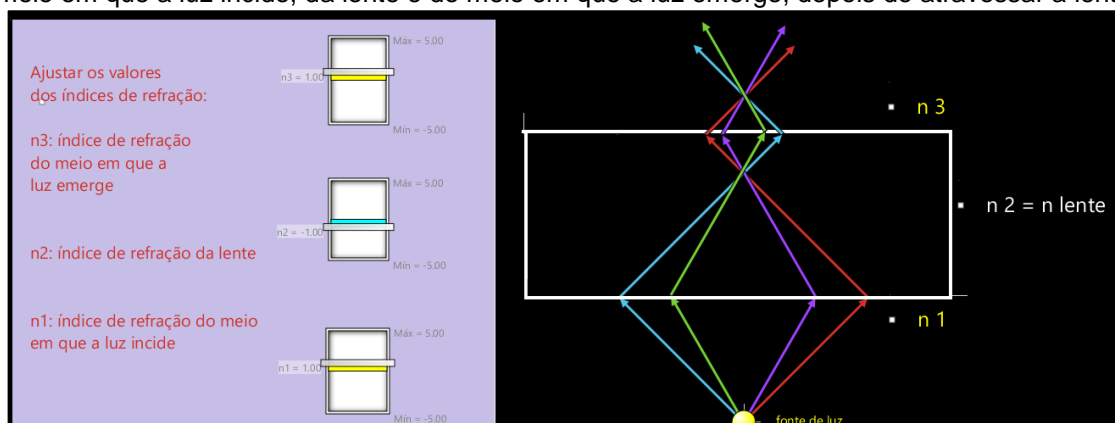
Outros dois simuladores foram desenvolvidos no Modellus-X para favorecer a compreensão da formação de imagens por lentes, particularmente as lentes com materiais de índice de refração negativo. Em um deles, o de dioptra plano, apresenta-se uma fonte de luz puntiforme e os indicadores de nível que permitem se variar o índice de refração, tanto do meio em que a luz incide, quanto do meio no qual a luz refrata, entre os valores -5 e 5 (Figura 57). No outro simulador (Figura 58), o que representa uma superlente plana prevista por Veselago (1968), pode-se verificar o que ocorre quando a luz atravessa uma lente com índice de refração negativo, variando-se os índices de refração do meio em que a luz incide, da lente e do meio em que a luz refrata. Desta forma, o aluno poderá ver a diferença entre uma lente feita com índice de refração positivo e negativo.

**Figura 57** – Exemplo de tela do simulador de dioptra plano desenvolvido no *software* Modellus-X, em que se mostra a luz de uma fonte puntiforme saindo de um meio cujo índice de refração é positivo e refratando-se em um meio com índice de refração negativo.



**Fonte:** da própria autora.

**Figura 58** – Exemplo de tela do simulador desenvolvido no *software* Modellus-X, em que se mostra a luz de uma fonte puntiforme saindo de um meio com índice de refração positivo em seguida incidindo em uma lente com índice de refração negativa. A simulação permite variar os índices de refração do meio em que a luz incide, da lente e do meio em que a luz emerge, depois de atravessar a lente.



**Fonte:** da própria autora.

## Capítulo 5

### Considerações Finais

O presente trabalho propôs quatro conjuntos de atividades envolvendo simulações com modelagem matemática dos fenômenos físicos e experimentação, com o objetivo de aumentar o interesse do aluno pelos conteúdos de óptica geométrica, como também de proporcionar melhorias no processo de ensino/aprendizagem.

Entre as simulações propostas, houve algumas que foram indicadas para serem utilizadas de forma expressiva, na qual o aluno desenvolveria a investigação e analisaria os resultados obtidos de forma autônoma (embora mediada pelo professor), e outras foram construídas e indicadas para serem usadas de forma exploratória. Mas acredita-se que tais atividades possam contribuir para que professores escolham as que melhor se adaptam à sua necessidade, dependendo do tema a ser estudado e do tempo disponível para a aula.

A autora aplicou o questionário diagnóstico (Apêndice 1), bem como algumas atividades apresentadas no capítulo de desenvolvimento do produto, em uma escola particular que leciona, localizada na cidade de Araraquara no interior de São Paulo. Essas atividades foram realizadas durante o segundo semestre no ano de 2015, com uma turma pequena de apenas 14 estudantes voluntários, todos do segundo ano do Ensino Médio, e que já haviam estudado óptica geométrica da forma tradicional, sem experimentos e/ou simulações. Inicialmente, foi apresentado o Modellus-X para os alunos, mostrando-se as etapas de *download*, instalação, execução e principais funções desse *software*. Utilizou-se exemplos da construção de simulações relacionadas à modelagem de problemas em mecânica, com gráficos de velocidade uniforme, uniformemente variado e uso de vetores. Ou seja, considerou-se importante apresentar as principais funções do *software*, porém com exemplos em temas diferentes dos de óptica geométrica, já que esse último seria desenvolvido em simulações a serem construídas pelos próprios alunos.

As atividades de capacitação do uso do *software* Modellus-X, discutidas acima, ocuparam uma aula de 50 minutos. Utilizou-se a sala de informática da escola, cujo número de máquinas possibilita um computador por estudante mesmo para turmas regulares. Contudo, como os alunos foram orientados antecipadamente que

realizariam tarefas de *download* do *software* e de prática das principais funções do Modellus X em casa, desde o início eles preferiram levar seus computadores pessoais na escola para a realização das atividades, ao invés de utilizarem os computadores da sala de informática. Então, depois da capacitação, todas as atividades seguintes foram realizadas em sala de aula convencional, com os estudantes utilizando seus próprios computadores.

O experimento para o estudo da refração e a verificação da variação do ângulo dos raios refratados, discutido na seção 4.3.3.2, foi realizada em grupos. Enquanto um aluno disparava o laser, incidindo o feixe de luz na superfície de água do aquário, um outro estudante tirava a foto do experimento (Figura 59). Como a sala de aula não era muito escura, foi necessário o uso de talco disperso no ar para melhor visualização do raio incidente. Cada aluno tirou sua própria foto para o desenvolvimento das atividades no Modellus-X. Para a realização da coleta de dados foram necessários 50 minutos (uma hora-aula). Posteriormente, os alunos analisaram as fotos para a obtenção dos ângulos incidente e refratado, assim como realizaram o cálculo do índice de refração a partir da Lei de Snell, utilizando o Modellus-X. Para essa parte da aplicação de atividades (Figura 60) foram necessários mais 50 minutos (uma hora-aula). Para a realização de todas as atividades foram necessárias três semanas, totalizando 6 horas-aula (300 minutos), incluindo as atividades de análise das simulações com meios com índice de refração positivo e negativo (discutidas nas seções 4.3.4 e 4.3.5). Vale ressaltar que todas as atividades foram desenvolvidas pelos próprios estudantes, enquanto a função da autora foi a de mediar as atividades propostas.



**Figura 59** – Alunos realizando o experimento do aquário (discutido na seção 4.3.3.2), em que se coleta por fotografias quais são os ângulos incidente e refratado para posterior análise investigativa com o *software* Modellus-X.



**Fonte:** da própria autora

**Figura 60** – Alunos utilizando o *software* Modellus-X para a determinação dos ângulos de incidência, refração e índice de refração da água.



**Fonte:** da própria autora

Desde a primeira vez que foram propostas aos alunos atividades diferentes das que eles estavam acostumados nas aulas, verificou-se o interesse e a vontade de realizá-las, principalmente porque elas envolviam a construção de simulações. Contudo, no início, os alunos ficaram preocupados com o cumprimento do conteúdo programático de Física de sua grade curricular, pois o mesmo teve que ser interrompido para a aplicação das atividades. Achavam que a interrupção poderia comprometer o andamento da disciplina, visto que já haviam estudado óptica geométrica. Ao exporem essa preocupação, a autora os tranquilizou explicando que haviam algumas folgas na programação do conteúdo e, portanto, essas atividades extraordinárias não prejudicariam o tempo a ser dedicado aos outros temas a serem trabalhados, como realmente não prejudicou. Daí a autora pode perceber que, durante

a aplicação das atividades, os alunos acabaram bem surpresos com os resultados da aprendizagem, como se estivessem estudando o assunto pela primeira vez. Assim, além do inicial, em nenhum outro momento os alunos reclamaram ou se preocuparam mais com a interrupção do conteúdo programático. Durante as aulas, compenetraram-se nos trabalhos desenvolvidos, e muitos trouxeram nas aulas seguintes, simulações melhoradas em casa.

Os alunos não foram avaliados quanto o aprendizado do conteúdo de óptica geométrica após as atividades, mas a autora pode perceber uma maior automotivação aos estudos, não só dos conceitos desenvolvidos, mas dos de Física em geral, porque, na sequência de aplicação do conteúdo programático, os estudantes pesquisaram experimentos, simulações e tentaram utilizar o Modellus-X para o desenvolvimento de simulações nos novos temas. Por terem mostrado orgulhosos suas simulações aos professores de outras disciplinas, pode-se afirmar também que esses alunos tiveram sua autoestima aumentada ao aprenderem de forma ativa. Eis alguns depoimentos dos alunos após o término das atividades desenvolvidas, que foram manuscritos sem a identificação dos nomes:

Aluno X: “Eu achei o programa Modellus muito interessante e útil, ele nos faz observar o que está atrás das contas de física. Isso faz o aluno prestar mais atenção e também se divertir ao mesmo tempo, com isso o aprendizado é mais rápido. Com as diversas ferramentas que possui no programa nós podemos realizar diversos cálculos que em uma aula normal seria complicado...”.

Aluno Y: “Acredito que o Modellus fornece novas experiências que realmente contribuem para o desenvolvimento e aprendizado do aluno que o usa. O uso do Modellus proporciona um tipo de aula diferente da tradicional e isso contribui para que os alunos se sintam interessados ao invés de assistir ao professor, fazer por si mesmo, estimulando seu próprio aprendizado”.

Aluno W: “A minha experiência com o Modellus-X foi satisfatória, pois enxerguei nele uma alternativa pedagógica para a melhor compreensão e visualização de conceitos físicos e matemáticos que geralmente só são apresentados em forma de teoria e sem grandes analogias e recursos interativos. Quando o Modellus- X foi apresentado a mim em sala de aula, me impressionei, pois nele enxerguei uma nova possibilidade de ensino de física, tornando menos focado em teoria e mais didático e

interativo com os alunos. Utilizando as ferramentas presentes no Modellus X o ensino pode-se tornar mais agradável e menos maçante”.

Assim, espera-se que este trabalho e o produto educacional desenvolvido motivem e auxiliem outros professores de ensino básico, os quais, como a autora, queiram sempre a motivação e o interesse observados nas declarações acima quando se trata de estudantes falando das aulas de Física.

## Referências

ALGODOO. Disponível em: < <http://www.algodoo.com/>>. Acesso em: jul. 2015.

ALMEIDA, V.O.; ABS, C. e SOAVE, P. A. Concepções Alternativas em Óptica. **Textos de Apoio ao Professor de Física**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 74, 2007. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/tapf/v18n2\\_Almeida\\_Cruz\\_Soave.pdf](http://www.if.ufrgs.br/tapf/v18n2_Almeida_Cruz_Soave.pdf)>. Acesso em: jul. 2015.

ARTUSO, A. R., WRUBLEWSKI, M. 1. ed. Curitiba: Positivo, 2013. 320 p.

BOAS, N. V.; DOCA, R.H.; BISCUOLA, G.J. **Física 2**: termologia, ondulatória, óptica. São Paulo: Saraiva, 2013. 464 p.

BONJORNO, J. R. et al. **Física**: Termologia, óptica, ondulatória. 2. ed. São Paulo: FTD, 2013. 96 p.

BRASIL. Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica / Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Diretoria de Currículos e Educação Integral. Brasília: MEC, SEB, DICEI, 2013. 562p. Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com\\_docman&view=download&alias=15547-diretrizes-curriculares-nacionais-2013-pdf-1&Itemid=30192](http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=15547-diretrizes-curriculares-nacionais-2013-pdf-1&Itemid=30192)>. Acesso em jul. 2016.

BRASIL. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB). Disponível em: < <http://portal.mec.gov.br/component/content/article?id=12907:legislacoes>>. Acesso em: jul. 2016.

BRIGHTEST FLASHLIGHT FREE. Disponível em: < <https://play.google.com/store/apps/details?id=goldenshorestechnologies.brightestflashlight.free> >. Acesso em: jul. 2016.

Conceitos Fundamentais – Grandezas Luminosas. 2010. Disponível em: <[http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq\\_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material\\_de\\_Apoio/03\\_-\\_la\\_Conceito\\_Fundamentais\\_\(grandezas\\_Luminosas\).pdf](http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material_de_Apoio/03_-_la_Conceito_Fundamentais_(grandezas_Luminosas).pdf)>. Acesso em: jul. 2016.

DANTAS, C. R. S. **As TIC e a teoria da aprendizagem significativa: uma proposta de intervenção no ensino de Física**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011.

EASY JAVA SIMULATIONS. Disponível em: < <http://fem.um.es/Ejs/>>. Acesso em: jul. 2015.

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

GALILI, I.; LAVRIK, V. Flux concept in learning about light: A critique of the presente situation. **Science Education**, v. 82, n.5, p. 591-613, 1998.

GEOGEBRA. Disponível em: < <https://www.geogebra.org/>>. Acesso em: jul. 2015.

GIRCOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O Ensino da óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.18, n.1, p. 26-40, abr. 2001.

GUIMARÃES, O., PIQUEIRA, J. R., CARRON, W. **Física 2**. 1. ed. São Paulo: Ática, 2013. 424 p.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 406 p.

HARRES, J. B. S. Um teste para detectar concepções alternativas sobre tópicos introdutórios de Óptica Geométrica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.10, n. 3, p. 220-234, dez. 1993.

HECHT, E. **Óptica**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2012.790 p.

HEIDEMANN, L. A. et al. Ciclos de modelagem: uma proposta para integrar atividades baseadas em simulações computacionais e atividades experimentais no ensino de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. Especial 2: p. 965-1007, out. 2012.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 11. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 744 p.

KEAWKHONG, K.; MAZZOLINI, A.; EMARAT, N.; ARAYATHANITKUL, K. Thai high-school students' misconceptions about and models of light refraction through a planar surface. **PhysicsEducation**, v.45, n.1, p.97-107, Jan 2010.

LUZ, A. M. R.; ÁLVARES. B. A. **Física Contexto & Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Scipione, 2013. 400p.

MANUAL DO OUROLUX. Disponível em: <<http://www.ourolux.com.br/app/manual/>>. Acesso em jul. 2016.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n.2, p. 77-86, Junho 2002.

MODELLUS. Versão X. Disponível em: < <http://modellus.co/index.php?lang=pt>>. Acesso em: jul. 2015.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa crítica**. Instituto de Física, UFRGS, 2000. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/apsigcritport.pdf>>. Acesso em: nov. 2015.

MOREIRA, M. A. Monografia nº 10. **Série Enfoques Teóricos**. Porto Alegre, Instituto de Física-UFRGS. 1995.

MOREIRA, M. A., GRECA, I.M. A mudança conceitual: análise crítica e propostas à luz da teoria da aprendizagem significativa. **Ciência e Educação**, Bauru, v.9, n.2, p. 301-315, 2003. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/amudancaconceitual.pdf>>. Acesso em: jul. 2016.

NESBIT, J.; BELFER, K. e LEACOCK, T. Learning object review instrument (lori). Version 1.5. Disponível em: <<http://www.transplantedgoose.net/gradstudies/educ892/LORI1.5.pdf> >. Acesso em: 19 jan. 2016.

OLIVERIA, K; SARAIVA, M. F. **Astronomia e Astrofísica**. 3.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2013. 780 p.

PENDRY, J. B.; SMITH, D. R. Superlens. **Scientific American**. July 2006.

PENDRY, J. B.; SMITH, D. R.; SCHURIG, D. Controlling Electromagnetic Fields. **Science**. June 2009.

PERRY, S. Introdução à programação Java, Parte 1: Fundamentos da linguagem Java. IBM. 2016. Disponível em: <<https://www.ibm.com/developerworks/br/java/tutorials/j-introtojava1/j-introtojava1-pdf.pdf>>. Acesso em: jul. 2016.

PERUZZO, J. Termodinâmica, Ondulatória e Óptica. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012. 365 p.

PhET interactive Simulations. University of Colorado. Disponível em: <[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/](https://phet.colorado.edu/pt_BR/)>. Acesso em: jul. 2015.

SALVETTI, A. R. **A História da luz**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2008. 205 p.

SANT'ANNA, B. et al. **Conexões com a Física**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2013. 144 p.

SANTOS, W. S. **Refração, as velocidades da luz e metamateriais**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em ensino de Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Proposta curricular do Estado de São Paulo/ Coord. Maria Inês Fini. São Paulo: SEE, 2012. Disponível em: <<http://www.educacao.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/780.pdf>>. Acesso: jul.2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.educacao.sp.gov.br/>>. Acesso em: jul. 2016.

SCRATCH. Disponível em:< <https://scratch.mit.edu/>>. Acesso em: jul. 2015.

SINGH, A.; BUTLER, P. H. Refraction: conceptions and knowledge structure. **International Journal of Science Education**, v.12, n.4, p. 429-442, 1990.

Refractometer. Disponível em: < <http://www.refractometer.pl/refraction-datasheet-basic> >. Acesso em: jul 2016.

TEODORO, S. R. **A história da ciência e as concepções alternativas de estudantes como subsídios para o planejamento de um curso sobre atração gravitacional**. 2000. 276 f. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência - Área de Concentração: Ensino de Ciências) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2000.

TIRONI, C. R., et al. A Aprendizagem Significativa no Ensino de Física Moderna e Contemporânea. **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – IX ENPEC**. Águas de Lindóia, São Paulo, Nov. 2013. Disponível em:< <http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/resumos/R0986-1.pdf>>. Acesso em: jul. 2016.

TOGINHO FILHO, D.O.; LAURETO, E. **Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral**. Departamento de Física. Universidade Estadual de Londrina, Agosto 2009. Disponível em <<http://www.uel.br/pessoal/inocente/pages/arquivos/2FIS010%20-%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20GERAL%20II/09-Fotometria.pdf>>. Acesso: jul 2016.

TORRES, C. M. A. et al. **Física: ciência e tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2013. 272 p.

VALENTE, J. A. **O Computador na Sociedade do Conhecimento**. Campinas, SP: UNICAMP/NIED, 1999, 156 p.

VARGO, J. et. Al. **International Journal of Computers and Applications**. vol. 25, n. 3, 2003. Disponível em: <<http://www.sfu.ca/~jcnesbit/articles/VargoNesbit2003.pdf> >. Acesso em: jul. 2016.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. D. Modelagem no Ensino / Aprendizagem de Física e os Novos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, p. 87-96, Junho, 2002.

VEIT, E. A.; TEIXEIRA, R. M. R. **Introdução ao Modellus**. Departamento de Física - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1999. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/135346/000285794.pdf?sequence=1> >. Acesso em: jul. 2016.

VEIT, E. A.; ARAUJO, I. S. Modelagem Computacional no Ensino de Física. **XXIII Encontro de Físicos do Norte e Nordeste**. 2005. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/producao/modelagem\\_computacional\\_Maceio.pdf](http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/producao/modelagem_computacional_Maceio.pdf)>. Acesso em: nov. 2015.

VIEIRA, L.P.; LARA, V.O.M. e AMARAL, D. F. **Demonstração da lei do inverso do quadrado com o auxílio de tablet/smartphone**. V. 36, n.3, 2014. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v36n3/17.pdf> >. Acesso em: jul. 2016.

VESELAGO, V. G. The electrodynamic of substances with simultaneously negative of values  $\epsilon$  and  $\mu$ . **Academy of Scienses**. July 1968.

YAMAMOTO, K; FUKE, L. F. **Física para o ensino médio 2**. São Paulo: Saraiva, 2013. 432 p.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Ótica e Física Moderna**. São Paulo: Addison Wesley, 2009. 419 p.



## Apêndice A

### **Questionário diagnóstico, para a investigação de concepções alternativas dos alunos sobre os principais conceitos em óptica geométrica**

Este questionário diagnóstico é um subproduto do trabalho de mestrado intitulado “Do positivo ao negativo: utilizando ferramentas computacionais e experimentação para a simulação de (meta)materiais refrativos”, de Carina de Freitas Velloso Nozela, defendido em agosto de 2016, no curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física, do PPG PROFIS-São Carlos, da Universidade Federal de São Carlos, sob orientação da Profa. Dra. Ducinei Garcia.

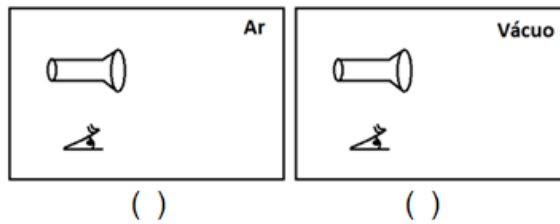
Refere-se à um questionário diagnóstico sobre conceitos em óptica geométrica, desde a natureza da luz e suas formas de propagação até conceitos sobre refração, tanto em meios com índices de refração positivo quanto negativos. É indicado para professores verificarem as concepções alternativas de seus alunos.

Nas duas primeiras questões, as figuras foram retiradas do trabalho realizado por Almeida, Abs e Soave (2007), na primeira a intenção é verificar se os alunos consideram a reflexão da luz por partículas suspensas no ar, enquanto que, na segunda averigua-se o entendimento do aluno sobre a correta representação de raios de luz, já que confundem a ideia de “propagação retilínea da luz” com a de “raios paralelos”. Na terceira questão a figura utilizada foi retirada e adaptada ao português da proposta de Galili e Lavrik (1998), para verificar o conhecimento do aluno sobre o conceito de fluxo de luz e intensidade luminosa.

Nas questões 4 e 5 do questionário diagnóstico investigam-se os conhecimentos dos alunos sobre o fenômeno da refração. Particularmente na questão 4, verifica-se o que os alunos sabem sobre o conceito da refração. Enquanto que na questão 5, pretende-se averiguar se o aprendiz determina a posição da imagem aparente do objeto (peixe), levando-se em consideração o ângulo de observação. Na questão 6, aborda-se o índice de refração negativo, para saber se o aluno sabe ou já ouviu falar alguma coisa a respeito deste assunto.

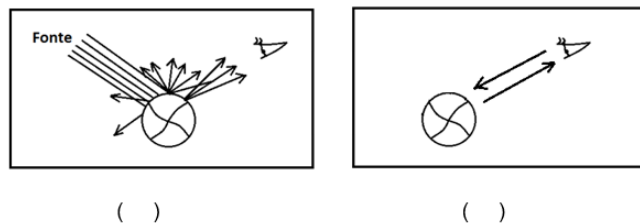
## Questionário

**Questão 1:** As figuras abaixo representam uma lanterna ligada em uma sala fechada contendo ar e outra no vácuo. Em qual (ou quais) da(s) situação(ões) o observador conseguirá perceber a luz?



Justifique a escolha: \_\_\_\_\_

**Questão 2:** Ao se ver uma bola qual é a melhor representação do fenômeno de reflexão?



Justifique a escolha: \_\_\_\_\_

**Questão 3:** Qual das lâmpadas abaixo, da figura ao lado, proporciona melhor iluminação para a leitura do livro?

( ) lâmpada fixa no teto ( ) lâmpada em cima da mesa

Justifique a escolha: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**Questão 4:** A figura abaixo representa a foto de um copo de vidro com um lápis imerso em água. Por que o lápis parece estar quebrado?



Justifique sua resposta: \_\_\_\_\_

**Questão 5:** A figura abaixo representa a posição real de um peixe num aquário. Esquematize, com representação de feixes de luz, a formação da imagem do peixe vista pelo observador.



Justifique sua resposta: \_\_\_\_\_

**Questão 6:** Se o peixe da questão anterior estivesse imerso em um suposto líquido com índice de refração negativo. Onde estaria a imagem vista pelo observador?



Justifique sua resposta: \_\_\_\_\_

## Apêndice B

### Tabela de avaliação de plataformas/softwarees

Esta tabela de avaliação é um subproduto do trabalho de mestrado intitulado “Do positivo ao negativo: utilizando ferramentas computacionais e experimentação para a simulação de (meta)materiais refrativos”, de Carina de Freitas Velloso Nozela, defendido em agosto de 2016, no curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física, do PPG PROFIS-São Carlos, da Universidade Federal de São Carlos, sob orientação da Profa. Dra. Ducinei Garcia.

Refere-se à uma tabela de avaliação, para ser utilizada por professores, com a intenção de verificar qual plataforma educacional ou *software*, melhor se adequem aos seus objetivos. Esta tabela é uma adaptação, com a intenção de complementar o teste proposto pelo LORI (*Learning Object Review Instrument*) que está disponível em: <http://www.transplantedgoose.net/gradstudies/educ892/LORI1.5.pdf>.

Com este subproduto não se tem a intenção de diagnosticar qual o melhor *software* educacional, mas sim uma forma de avaliar, qual o *software* que terá melhor desempenho diante dos objetivos que o professor pretende trabalhar. Desta forma o professor poderá utilizar a tabela todas as vezes que decidir realizar atividades diferentes com *softwares*/plataformas.

**Tabela da avaliação de plataformas/software** – Escreva os nomes das plataformas/software e indique 1 para o valor mínimo do grau de qualidade atribuído e, 3, para o máximo.

<b>Simulador/Software</b> →									
<b>Características Principais e seus Atributos</b> ↓									
<b>1.Recursos</b>	1.1 Construção de gráficos								
	1.2 Construção de tabelas								
	1.3 Objetos disponíveis para a construção das simulações								
	1.4 Inserção de imagens e vídeos								
	1.5 Ferramentas para medições em imagens inseridas na tela								
	1.6 Controle da variável								
<b>2.Interatividade</b>	2.1 Simulações com parâmetros físicos								
	2.2 Simulações a partir da própria modelagem matemática								
<b>3.Interface Visual</b>	3.1 Amigável ao usuário								
	3.2 Simulações 2 D								
	3.3 Simulações 3 D								
	3.4 Dispensa conhecimentos sobre linguagem de programação								
	3.5 Funciona nos atuais sistemas operacionais: Windows 8 e 10, Linux, Mac Os								
	3.6 Funciona em dispositivos móveis								
	3.7 Comandos em português								
<b>Total</b>									

## **Apêndice C**

**Tutorial para o pacote de simulações: “Do positivo ao negativo: utilizando ferramentas computacionais e experimentação para simulações de (meta)materiais refrativos”**

**DO POSITIVO AO NEGATIVO: UTILIZANDO FERRAMENTAS  
COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE  
(META)MATERIAIS REFRACTIVOS**

**UM TUTORIAL AO APLICADOR**

**Carina de Freitas Velloso Nozela**

**São Carlos - 2016**

## DO POSITIVO AO NEGATIVO: UTILIZANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE (META)MATERIAIS REFRAATIVOS - UM TUTORIAL AO APLICADOR

Caro(a) colega,

Este tutorial é um subproduto do trabalho de mestrado intitulado “Do positivo ao negativo: utilizando ferramentas computacionais e experimentação para a simulação de (meta)materiais refrativos”, de Carina de Freitas Velloso Nozela, defendido em agosto de 2016, no curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física, do PPG PROFIS-São Carlos, da Universidade Federal de São Carlos, sob orientação da Profa. Dra. Ducinei Garcia.

Trata-se de um conjunto de orientações e sugestões destinadas aos professores interessados em aplicar as ferramentas e objetos educacionais desenvolvidos no trabalho de mestrado, para motivar e favorecer a aprendizagem durante as aulas de óptica geométrica, principalmente a relacionada ao fenômeno de refração da luz.

Ao longo do tutorial, para cada conjunto de propostas de aplicação, serão indicados os endereços na rede *internet* para o acesso aos objetos educacionais virtuais criados pela autora, assim como os links para os softwares e plataformas de outras referências.

O objetivo deste tutorial é o de auxiliar professores de Física na preparação e prática das atividades em salas de aulas, usando modelagem matemática, simulações e experimentos, para o aprendizado dos alunos em conceitos de refração de luz. Os conjuntos de atividades preocupam-se em desconstruir as principais concepções alternativas comuns ao fenômeno de refração. Baseado nessas concepções, os objetivos principais das quatro propostas de atividades são sugeridos segundo a organização detalhada na Tabela 1.



**Tabela 1** – Atividades propostas para a motivação e o favorecimento da aprendizagem de conceitos do fenômeno de refração, com o uso de diferentes ferramentas educacionais como recursos computacionais, TIC, simulações com modelagem matemática e experimentação.

Título das Atividades		Ferramentas utilizadas	Objetivos Principais
1	Fenômenos Separados	- Experimentos envolvendo refração, reflexão e absorção, ocorrendo simultaneamente, assim como o conceito de intensidade luminosa; - Simulação no software Modellus-X, para a verificação do gráfico de intensidade luminosa versus distância da fonte de luz.	Mostrar que os fenômenos da refração, reflexão, transmissão e absorção da luz ocorrem simultaneamente
2	O Fenômeno da Refração	- Experimentos sobre refração; - Modelagem no software Modellus-X, utilizando fotos do experimento e simulações para a verificação dos ângulos incidentes e refratados, dependendo dos índices de refração.	Entender que a trajetória da luz depende do ângulo incidente e do índice de refração do meio em que será refratado.
3	Reflexão Interna Total	- Experimento verificando qualitativamente o ângulo crítico, de um laser incidindo em uma interface água/ar; - Simulações no software Modellus-X, para a determinação do ângulo crítico dependendo da variação dos índices de refração.	Mostrar que a reflexão interna pode ocorrer, dependendo do ângulo incidente e do meio em que será refratado.
4	Imagem Aparente	- Experimento simples para a verificação qualitativa de uma imagem aparente formada mediante um objeto imerso em água; - Simulação no software Modellus-X, para a verificação da possível posição de uma imagem aparente, de acordo com a variação do índice de refração do meio em que está o objeto.	Entender como se forma a imagem aparente de um objeto imerso em meio diferente. Verificar que a imagem aparente depende do índice de refração do meio no qual encontra-se o objeto, e também, da posição do observador.

As orientações e sugestões de cada conjunto de atividades, apresentadas a seguir, não tiveram a intenção de esgotar as possibilidades metodológicas de uso das ferramentas desenvolvidas no trabalho de mestrado. Dessa forma, este trabalho está protegido sob a licença “Atribuição-NãoComercial-Compartilha Igual CC BY-NC-AS” do Creative Commons BR (acessível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), a qual permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

A autora

## 1- Fenômenos Separados

Nesta seção propõe-se experimentos para investigar os fenômenos da refração, reflexão e absorção ocorrendo simultaneamente, além de se evidenciar conceitos sobre fluxo de luz e intensidade luminosa, mediante experimentos e o uso do *software* Modellus-X. Divide-se em duas partes:

- Experimento para a verificação da lei do inverso do quadrado da distância para a intensidade luminosa, com coleta de dados usando aplicativos gratuitos em *smartphones* ou *tablets*, e análise de dados com simulação no *software* Modellus-X;
- Experimento para a verificação dos fenômenos de refração, reflexão e absorção de luz, ocorrendo simultaneamente, com coleta de dados usando aplicativos gratuitos em *smartphones* ou *tablets*.

### **a) Experimento para a verificação da lei do inverso do quadrado da distância para a intensidade luminosa, com o uso de *smartphones* ou *tablets***

Para esta atividade são necessários: dois *smartphones* ou *tablets*, em que devem estar instalados os aplicativos que os façam funcionar como luxímetro e fonte de luz branca (lanterna), e uma régua.

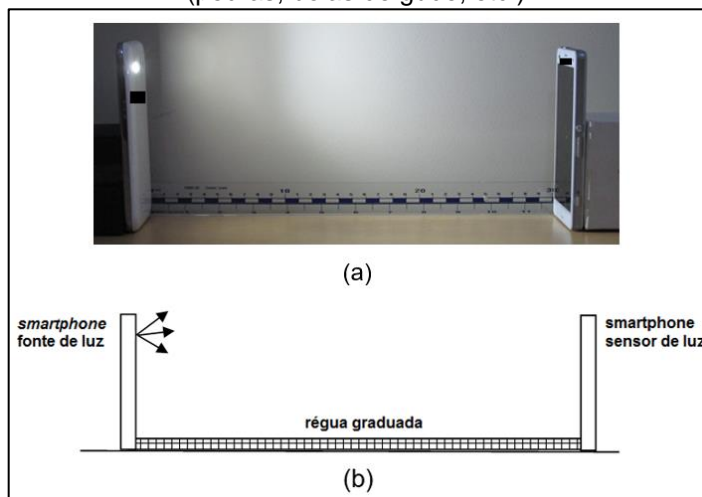
Existem vários aplicativos de luxímetro para dispositivos móveis, de plataforma *Android*, que são gratuitos e estão disponíveis para *download*. Indica-se o aplicativo *Ourolux* (disponível em: [https://play.google.com/store/apps/details?id=br.luximetro&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=br.luximetro&hl=pt_BR)), se o *tablet* ou *smartphone*, a ser utilizado no experimento, tiver a função “sensor de luz” na câmera fotográfica. Caso contrário, indica-se o *Light Meter Tools - Trial* (disponível em: [https://play.google.com/store/apps/details?id=camera.sunnysixteen.standalone&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=camera.sunnysixteen.standalone&hl=pt_BR)), que funcionará também sem essa função. O aplicativo *Ourolux* tem um manual de utilização que pode ser obtido em: <http://www.ourolux.com.br/app/manual/>.

Como comentado, um dos *smartphones* será utilizado como fonte de luz branca (lanterna). Para isto, é necessário ter um aplicativo como, por exemplo, o *Brightest Flashlight* *Free* (disponível em: [https://play.google.com/store/apps/details?id=goldenshoretechnologies.brightestflashlight.free&feature=search\\_result](https://play.google.com/store/apps/details?id=goldenshoretechnologies.brightestflashlight.free&feature=search_result)), para a plataforma *Android*.

Os dois dispositivos móveis devem ser dispostos em uma superfície plana, um com a lanterna em frente ao sensor de luz do outro, com a régua fixada entre eles para a medida das distâncias, como exemplificado na Figura 1. Primeiramente, deve-se fixar o dispositivo, usado como fonte de luz, em uma posição, e variar-se a distância do dispositivo-luxímetro, anotando a distância relativa e o respectivo valor de intensidade luminosa. Acredita-se que esta atividade propicie aprendizagem mais efetiva se realizada de forma exploratória, tal que o aluno verifique por si mesmo o que acontece quando se aumenta ou diminui a distância entre sensor e fonte luminosa. Como avaliação diagnóstica prévia, o professor pode perguntar aos seus alunos quais as possíveis razões para a variação da intensidade luminosa em relação à distância. Dessa forma, o professor poderá ter uma ideia das concepções alternativas dos seus alunos. Ainda, as respostas poderão subsidiar ideias âncoras para a proposição de outras atividades.

O *software* de modelagem matemática para a simulação de fenômenos naturais Modellus-X (disponível em: <http://modellus.co/index.php?lang=pt>) pode ser utilizado para se traçar a curva de intensidade luminosa (lux) em relação à distância (metros) entre fonte e sensor de luz, com os dados coletados durante o experimento. O Modellus-X é fácil de ser manipulado e, nesta atividade, indica-se que esse *software* seja usado de forma expressiva pelos estudantes, isto é, de tal forma que possam construir suas próprias simulações. Contudo, caso seja de interesse, há um exemplo de modelagem e simulação dos resultados do experimento em *Intensidade\_Luminosa*, disponível em: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s).

**Figura 1.** Foto (a) e diagrama esquemático (b) da montagem para a medida de intensidade luminosa em função da distância à fonte de luz, utilizando dois dispositivos móveis (no caso, *smartphones*). Um dos dois *smartphones*, o da esquerda, está alinhado verticalmente e fixado no ponto de referência horizontal “zero”, e é utilizado como fonte de luz. O *smartphone* da direita também está alinhado verticalmente e é utilizado como sensor para a medida da intensidade luminosa, enquanto se varia sua distância em relação à fonte de luz. A régua é utilizada para a medida do deslocamento e, com esses dados, a distância em relação a origem é determinada. Detalhe: como neste exemplo, a régua pode ser disposta, sobre uma mesa, ao longo de uma parede, para se garantir o alinhamento horizontal do *smartphone*-sensor, durante o deslocamento; e os *smartphones* podem ser mantidos alinhados na vertical com o apoio de pequenas caixas de papelão, com “pesos” em seu interior (pedras, bolas de gude, etc.).



Fonte: da própria autora

Vale ressaltar que a curva esperada para a relação entre intensidade luminosa e distância entre sensor e fonte de luz, é \*\*\*:

$$I = I_{ref} \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

onde  $I_{ref}$  é a intensidade luminosa de referência, que corresponde ao menor valor de intensidade luminosa medido no experimento.

Pode-se incentivar os alunos a realizarem a coleta de dados numa tabela organizada, em que as condições experimentais consideradas relevantes (iluminação ambiente, distância máxima do sensor à fonte, etc.) são descritas na legenda, e os valores da

---

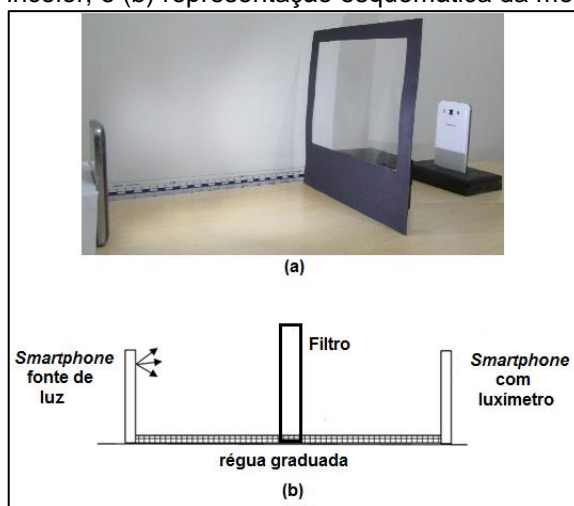
\*\*\* Como referência bibliográfica para o tema, recomenda-se, por exemplo, HECHT, E. **Óptica**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2012.790 p.

intensidade luminosa e da distância são dispostos em colunas, com as respectivas unidades pertinentes.

### **b) Experimento para a verificação dos fenômenos de refração, reflexão e absorção ocorrendo simultaneamente**

Para esta atividade experimental/investigativa novamente serão utilizados os dispositivos móveis (*tablet* ou *smartphone*) e os aplicativos luxímetro e lanterna. Também serão necessários filtros de luz incolor e coloridos (recomenda-se o vermelho, o verde e o azul), que podem ser feitos com papel celofane. Inicialmente, os dois dispositivos móveis e a régua são dispostos como no caso do experimento anterior (Figura 1). Daí, realiza-se a medida da intensidade luminosa sem o filtro de luz (papel celofane), como referência. Em seguida, coloca-se o filtro de luz (que pode estar em uma estrutura de papel cartão), um de cada vez, a uma distância conhecida e constante da fonte de luz, para a coleta da medida da intensidade luminosa. A Figura 2 mostra uma foto e um esquema de exemplo da montagem experimental com o filtro.

**Figura 2.** Experimento para a verificação da refração, absorção e reflexão, a partir de medidas de intensidade luminosa através de filtro feito com papel celofane: (a) foto da montagem com o filtro feito com papel celofane incolor; e (b) representação esquemática da montagem experimental



Fonte: da própria autora

Ao medir-se a intensidade luminosa que passa pelo filtro incolor perceber-se-á que não há mudanças significativas, enquanto que, ao se inserir um filtro colorido,

perceber-se-á sua redução. Assim, com a análise de resultados, por exemplo, dispostos em tabela, o estudante poderá facilmente perceber a mudança de valores na intensidade luminosa com e sem os filtros de luz, devido às diferentes condições de absorção e reflexão.

Sugere-se que o professor trabalhe apenas como mediador da investigação, aproveitando o momento para uma discussão sobre os conceitos básicos de refração, absorção e reflexão. Contudo, é importante incentivar algumas situações de coleta de dados. Por exemplo, para uma compreensão do efeito de reflexão, pode-se colocar o luxímetro à frente do filtro (ou seja, entre a fonte e o filtro, sem alinhamento com a fonte para não tapar o feixe de luz), para, em seguida, medir-se parte da intensidade luminosa refletida. Depois, mantendo-se a posição do luxímetro, retira-se o filtro e toma-se nova medida. A partir da comparação da intensidade medida com e sem o filtro, o estudante poderá verificar que a intensidade luminosa é maior com o filtro devido à reflexão que ocorre simultaneamente aos fenômenos de refração e absorção. Essa atividade com os filtros poderá auxiliar também a aprendizagem das cores e do sistema RGB (do inglês Red, Green e Blue, que em português significa vermelho, verde e azul, respectivamente).

## **2- O fenômeno da refração**

Nesta seção propõe-se atividades de investigação do fenômeno da refração a partir da análise da trajetória da luz em função do ângulo de incidência e do índice de refração do meio em que será refratada. São atividades experimentais com coleta e análise de dados, além de atividades com modelagem matemática e construção de simulações usando o *software* Modellus-X.

A trajetória da luz, refratada em meio líquido, deve ser observada em diferentes ângulos de incidência em relação à normal da superfície ar/meio (incluindo a incidência normal). Como fonte de luz, recomenda-se uma ponteira *laser*, dessas obtidas em papelaria e/ou lojas de informática. Uma haste ao lado de um aquário (em

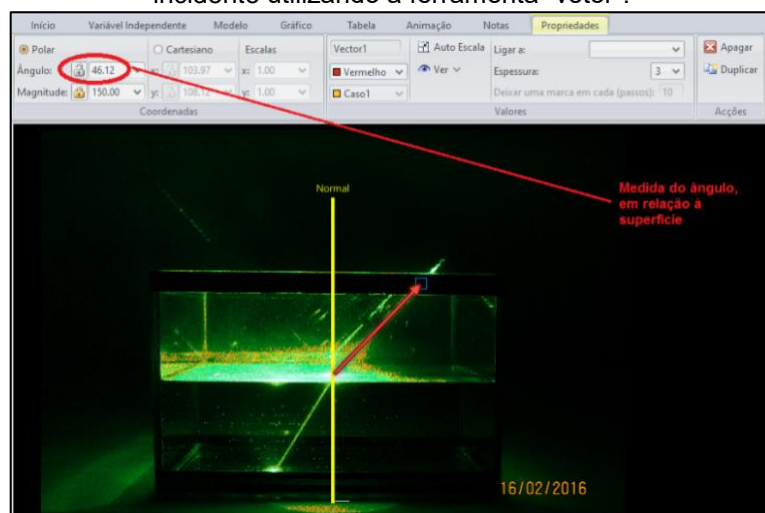
arranjo detalhado mais adiante) pode ser utilizada para fixar a ponteira, no ângulo desejado, tal que o feixe incida na superfície ar/água, como exemplificado na fotografia da Figura 3. O experimento pode ser realizado em grupos, e a ideia é que os alunos tirem fotos adequadas à posterior análise de dados no *software* Modellus-X. Com a foto transferida para a área de simulação do Modellus-X, os valores dos ângulos de incidência e de refração podem ser obtidos, orientando os alunos a usarem a ferramenta “Vetor”. É interessante que os estudantes explorem a atividade de forma expressiva, construindo suas próprias soluções, porém, a título de exemplo, disponibiliza-se uma simulação da solução do problema (tela de Figura 4) no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Medidas\_Angulos*.

**Figura 3** – Foto que representa luz de uma ponteira laser verde imergindo em um aquário com água.



Fonte: da própria autora

**Figura 4** – Tela do *software* Modellus-X, com foto da Figura 3 inserida na janela de simulação, mostrando exemplo de como se obter o valor do ângulo entre a superfície de separação e o raio incidente utilizando a ferramenta “vetor”.



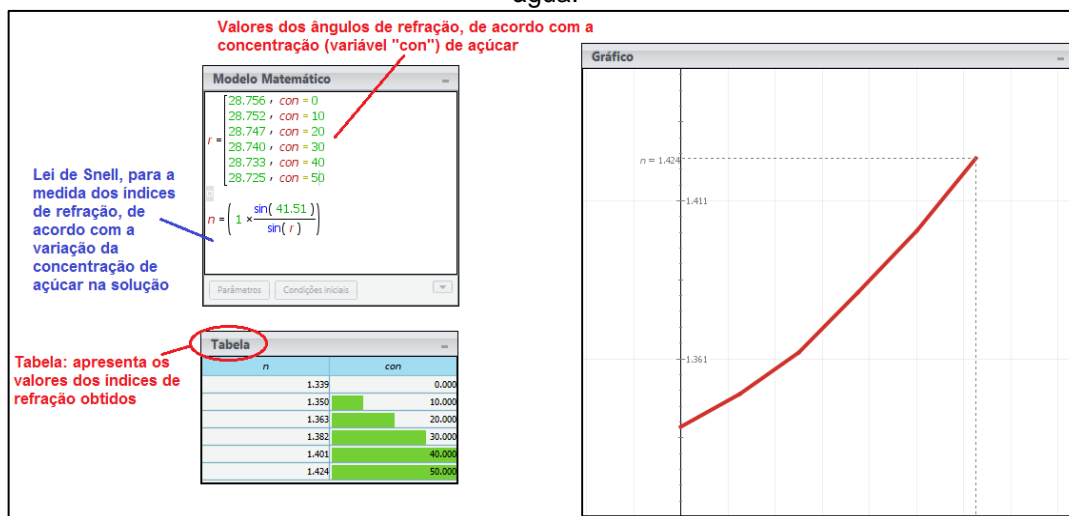
Fonte: da própria autora

A realização dessas atividades pode auxiliar os alunos na compreensão de que nem sempre a trajetória do feixe de luz é desviada ao sofrer refração (caso da incidência normal à superfície de separação entre os dois meios), desconstruindo eventual concepção alternativa. A relação entre ângulo de incidência e de refração pode ser explorada também com outros meios líquidos transparentes/translúcidos no aquário, como glicerina e óleo. Desta forma, o aluno verificará que o que se observa em fenômenos de refração depende também de características da interface e do meio. Tais ideias poderão servir como âncoras para a discussão do que é o índice de refração e para as relações envolvidas na Lei de Snell. A partir daí, o índice de refração do meio líquido pode ser determinado com os dados coletados no experimento, utilizando inclusive ferramentas de cálculo, de tabelas e de representação gráfica do Modellus X.

Em atividade análoga a anterior, contudo envolvendo maior elaboração e interdisciplinaridade com a Química, pode-se solicitar aos estudantes, por exemplo, a variação do índice de refração de soluções de água com açúcar. No caso, para um (ou mais) ângulo(s) de incidência, o ângulo de refração deve ser determinado para diferentes níveis de solubilidade de açúcar na água, segundo o procedimento descrito anteriormente. Em seguida, pode-se calcular os índices de refração das diversas concentrações de açúcar, bem como representar-se o gráfico do índice de refração em relação à concentração de açúcar na solução na janela do Modellus-X (Figura 5). Essa simulação encontra-se no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Solucao\_Acucar\_Agua*.



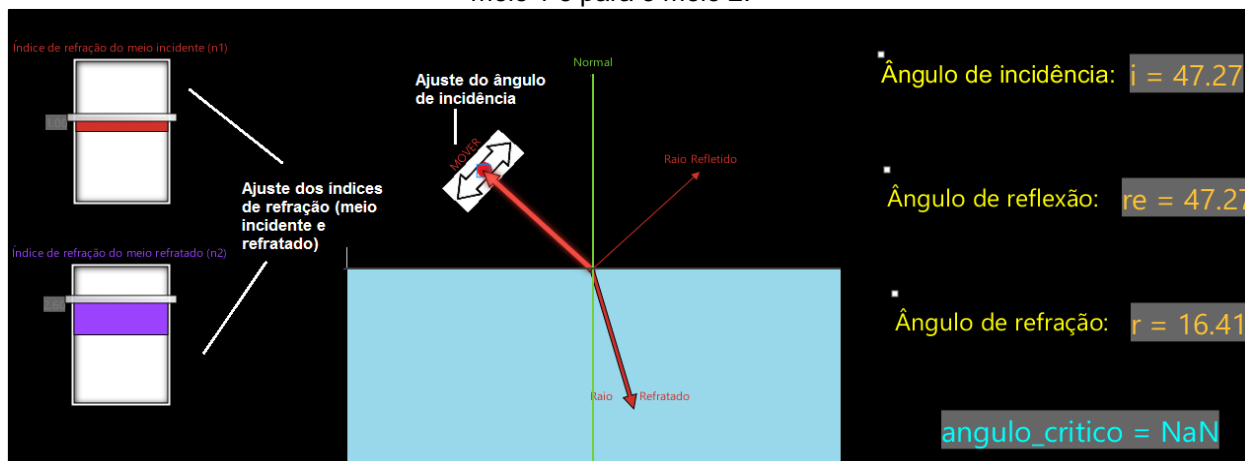
**Figura 5** – Tela de execução do *software* Modellus-X com exemplo de análise dos dados experimentais do índice de refração em função da concentração de açúcar em uma solução com água.



Fonte: da própria autora

Ainda com o *software* Modellus-X, outras simulações mais elaboradas podem ser trabalhadas com os estudantes, para se discutir e aprofundar conceitos sobre refração. A autora construiu um simulador, que pode ser utilizado pelos alunos para uma análise exploratória do fenômeno de refração e reflexão em situações cujos índices de refração podem ser alterados (Figura 6). Uma característica deste simulador é que ele prevê meios com índice de refração negativo. Também calcula valores do ângulo crítico para análise de como se dá a condição de reflexão interna total. Esse simulador encontra-se no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Refraçao*.

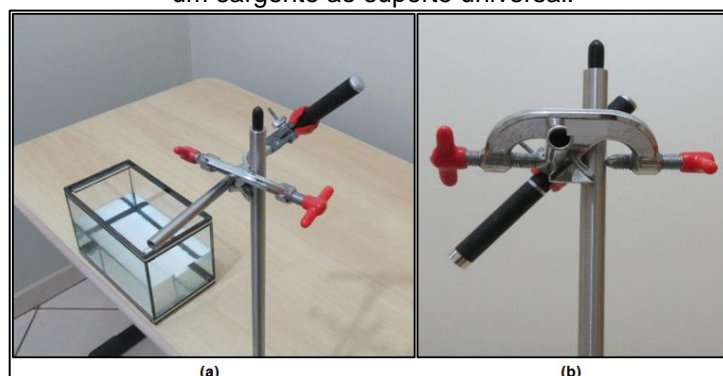
**Figura 6** – Exemplo da tela do simulador desenvolvido no *software* Modellus-X, para atividades de simulação computacional exploratória sobre refração em meios com índice de refração variando de positivo à negativo. Quando o usuário determina os parâmetros “índice de refração” e “ângulo de incidência”, a simulação apresenta os valores equivalentes para os ângulos de reflexão, refração e ângulo crítico. Os índices de refração utilizados nesta simulação foram de valores positivos para o meio 1 e para o meio 2.



Fonte: da própria autora

Detalhe: para manter o ângulo da ponteira laser constante, na coleta de dados dos experimentos discutidos acima, pode-se utilizar garras e um suporte universal, como apresento na Figura 7.

**Figura 7** – Exemplo de fixação do apontador a laser, para manter-se constante o ângulo de incidência do feixe de luz no experimento de refração: em (a) têm-se uma visão geral da posição do aquário em relação ao suporte que mantém o apontador; e, em (b), em detalhe, o apontador fixo por um sargento ao suporte universal.

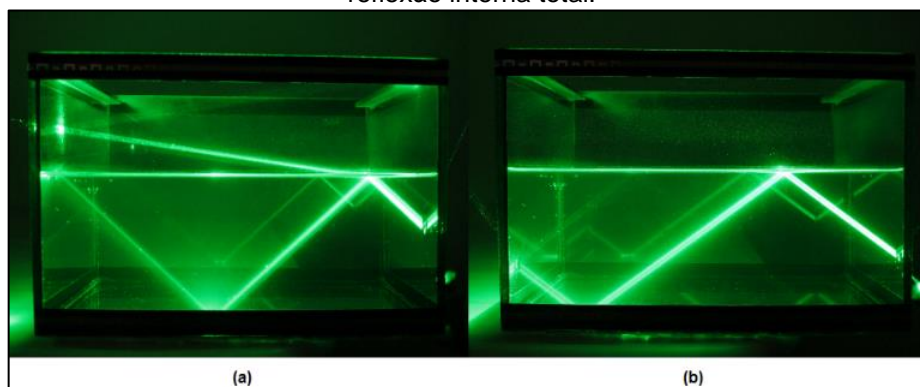


Fonte: da própria autora

### 3- Reflexão Interna Total

Nesta seção propõe-se experimento e simulação desenvolvida no software Modellus-X para explorar o fenômeno de reflexão interna total. Os procedimentos são análogos ao da seção 2 deste tutorial, em que se analisa a trajetória de um feixe de luz (da ponteira laser) ao atravessar a interface de meios diferentes, incidindo em diferentes ângulos. Contudo, desta vez, a incidência se dá na superfície da água com o ar, com o feixe incidente no meio água (Figura 8). Para uma melhor visualização do feixe de luz, pode-se colocar algumas gotas de leite diluídas na água.

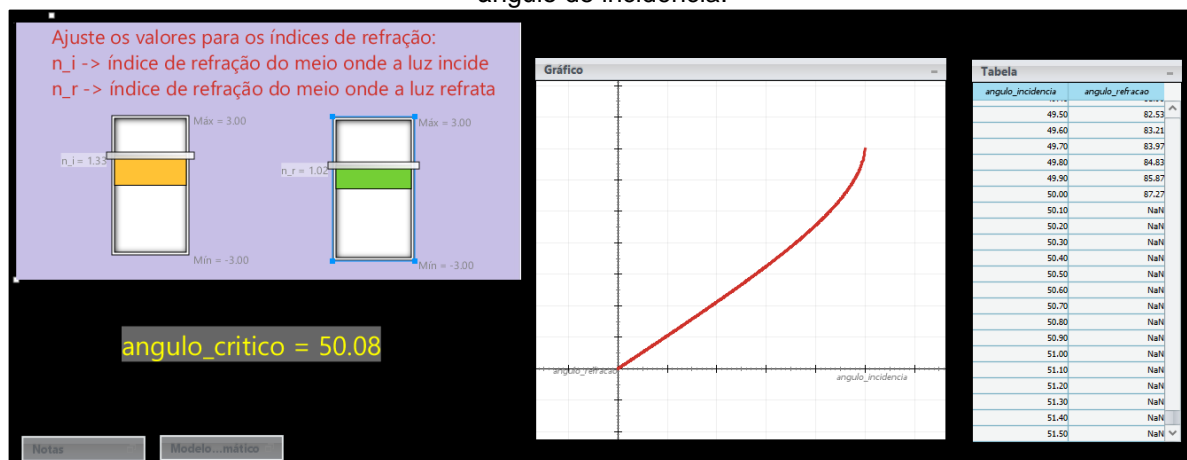
**Figura 8** – Experimento para a investigação da reflexão interna total, usando um aquário contendo água. Incide-se o feixe de luz de uma ponteira laser posicionada fora mas próxima à base do aquário. Variando-se o ângulo de incidência na interface água/ar, pode-se verificar: em (a) o caso em que há reflexão de parte da luz na água e há luz em parte transmitida (refratada) no ar; e, em (b), o caso em que há a reflexão da luz na água, mas não há luz transmitida no ar, caracterizando-se a situação de reflexão interna total.



Fonte: da própria autora.

No simulador desenvolvido no *software* Modellus-X, para o estudo da reflexão interna total (Figura 9), o ângulo de incidência e os índices de refração dos meios podem ser variados, e o valor do ângulo limite é calculado a partir dessas opções. Gráfico e tabela, obtidos com a simulação, mostram a variação do ângulo de refração em relação à variação do ângulo de incidência. Esse simulador encontra-se no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Angulo\_Limite*.

**Figura 9** – Simulador desenvolvido com o *software* Modellus-X, para a análise do ângulo limite para a reflexão interna total. Variando-se os valores dos índices de incidência e de refração da luz, têm-se o valor do ângulo crítico, assim como a análise gráfica da variação do ângulo de refração em função do ângulo de incidência.



Fonte: da própria autora.

Em outro simulador, apresentado na seção anterior (Figura 6), pode-se variar os ângulos de incidência, assim como os índices de refração dos meios, obtendo-se os possíveis valores para os ângulos críticos.

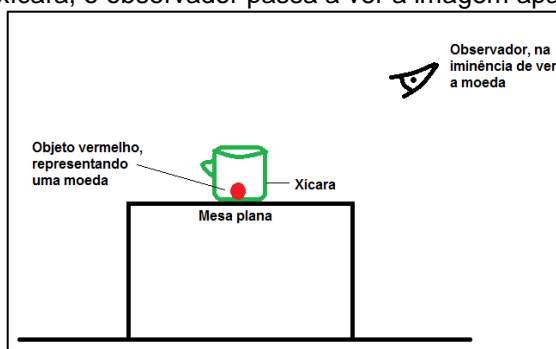
#### 4- Imagem Aparente

Nesta seção, sugerem-se atividades para a análise da imagem aparente de um objeto imerso em um meio cujo índice de refração é diferente do meio onde está o observador. Para isso, inicialmente, propõe-se um experimento simples e qualitativo para a visualização da imagem aparente de um objeto imerso em água e, depois, a exploração de simuladores desenvolvidos no *software* Modellus-X, para os estudantes verificarem que a imagem aparente depende do índice de refração do meio no qual encontra-se o objeto, e também, da posição do observador.

Para o experimento precisa-se de um recipiente, de cor sólida, isto é, que não pode ser transparente, e um objeto pequeno que caiba no recipiente. Sugere-se uma xícara de chá ou caneca (recipiente) e uma moeda (objeto). Enquanto a xícara, com a moeda em seu interior, fica em uma mesa plana, pede-se para o observador (um estudante) afastar-se da mesa até não conseguir mais visualizar a moeda, posicionando-se ali,

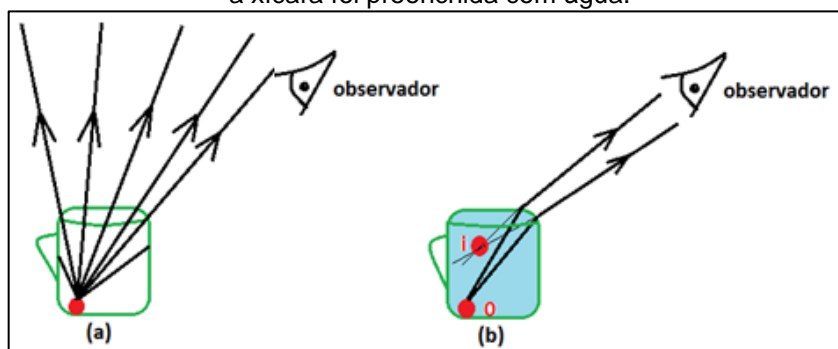
na iminência de enxergar o objeto. Em seguida, o professor ou assistente adiciona água na xícara, tomando cuidado para não tirar a moeda do lugar, em quantidade até o observador conseguir ver novamente a moeda. As Figuras 10 e 11 mostram as representações esquemáticas desse experimento.

**Figura 10** – Representação do experimento para a verificação da imagem aparente formada por uma moeda (objeto) imersa em água. No caso da xícara sem água, apenas com a moeda em seu interior, um observador posiciona-se a uma distância em que fica na iminência de ver a moeda. Ao colocar-se água dentro da xícara, o observador passa a ver a imagem aparente da moeda.



Fonte: da própria autora.

**Figura 11** – Esquemas representativos do experimento da moeda em uma xícara. Em (a), o observador está posicionado na distância limite em que deixa de ver a moeda na xícara sem água. Em (b), o observador, na mesma posição de (a) passa a ver a imagem formada da moeda (i), porque a xícara foi preenchida com água.

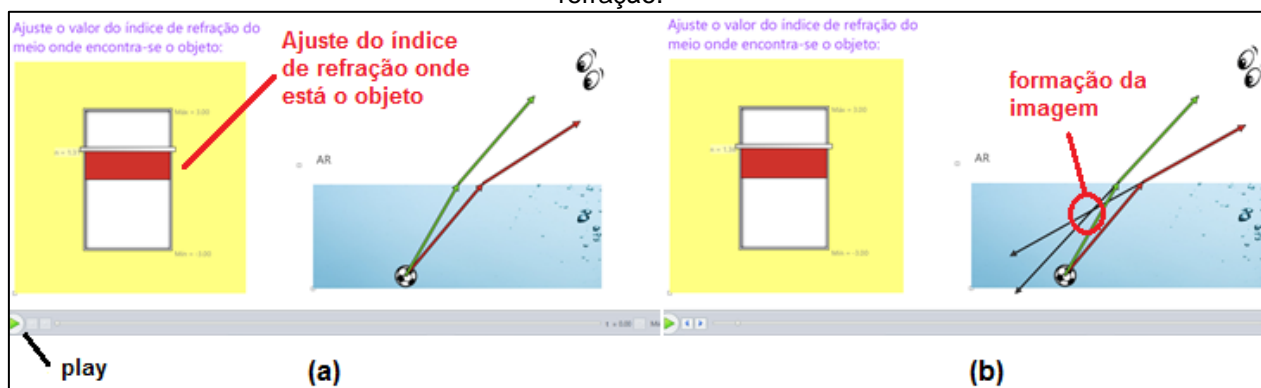


Fonte: da própria autora.

Em analogia ao experimento, discutido acima, no simulador construído com o *software* Modellus-X, é possível explorar-se a posição em que se forma uma imagem aparente, de um objeto imerso em um meio, cujo índice de refração pode-se variar. Inicialmente, ajusta-se o índice de refração onde está o objeto (no caso, uma bola), em seguida aperta-se o “play” e o simulador irá desenhar os prolongamentos dos raios que chegam aos olhos do observador. A imagem deve-se formar onde os prolongamentos

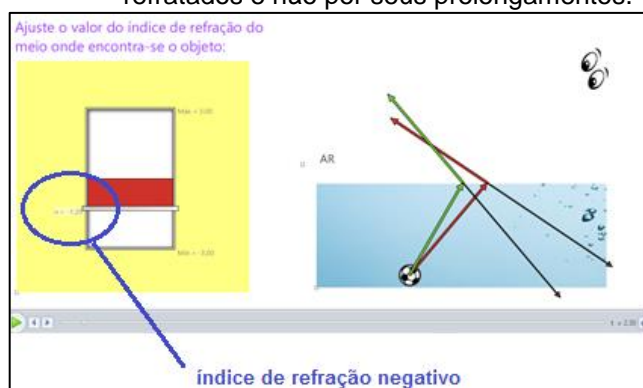
dos raios se cruzam (Figura 12). Para esta simulação, são considerados também índices de refração negativos para o meio onde está o objeto (simulação exemplificada na Figura 13). Nesse caso, a imagem forma-se no cruzamento dos raios refratados e não de seus prolongamentos. Assim, para o observador, o objeto parece estar acima da superfície do líquido. Esse simulador encontra-se disponível no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Imagem\_Aparente*.

**Figura 12** – Simulador desenvolvido no *software* Modellus-X para a verificação da posição da imagem aparente, que deve se formar quando um objeto se encontra imerso em um meio com índice de refração diferente do índice de refração onde está o observador (ar). Em (a) tem-se a tela inicial, em que o índice de refração onde está o objeto deve ser escolhido no indicador de nível. Em (b), tem-se a tela do simulador após apertar-se o “play”, em que se vê onde se cruzam os prolongamentos dos raios que chegam aos olhos do observador, no caso da escolha de valores positivos de índice de refração.



Fonte: da própria autora.

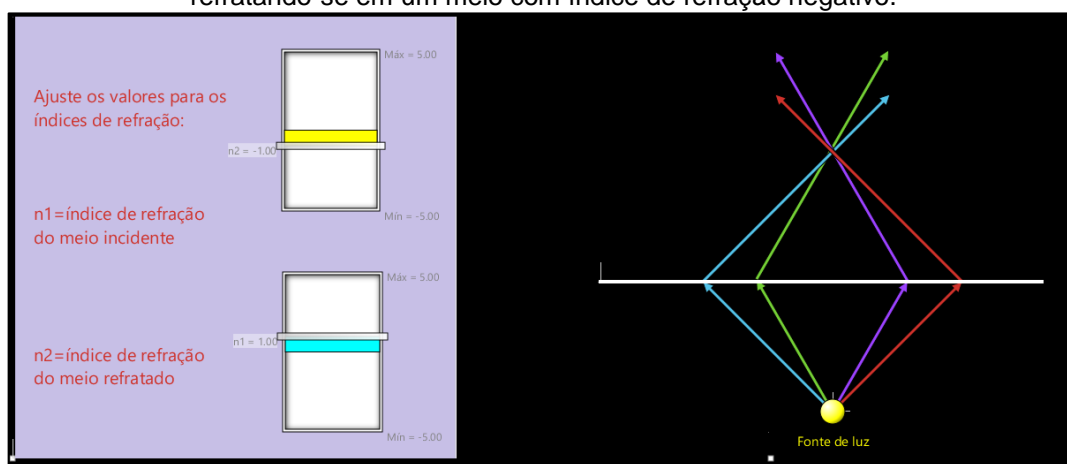
**Figura 13** – O mesmo que a Figura 12, porém para o caso em que é escolhido índice de refração negativo para o líquido. A posição da imagem se dá no cruzamento dos raios refratados e não por seus prolongamentos.



Fonte: da própria autora.

Um outro simulador, também desenvolvido no Modellus X, explora situações que envolvem dioptros planos. Pode-se variar o índice de refração do meio em que a luz incide, assim como do meio no qual a luz refrata, desde valores positivos até negativos (Figura 14). Esse simulador encontra-se disponível no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Dioptro\_Plano*.

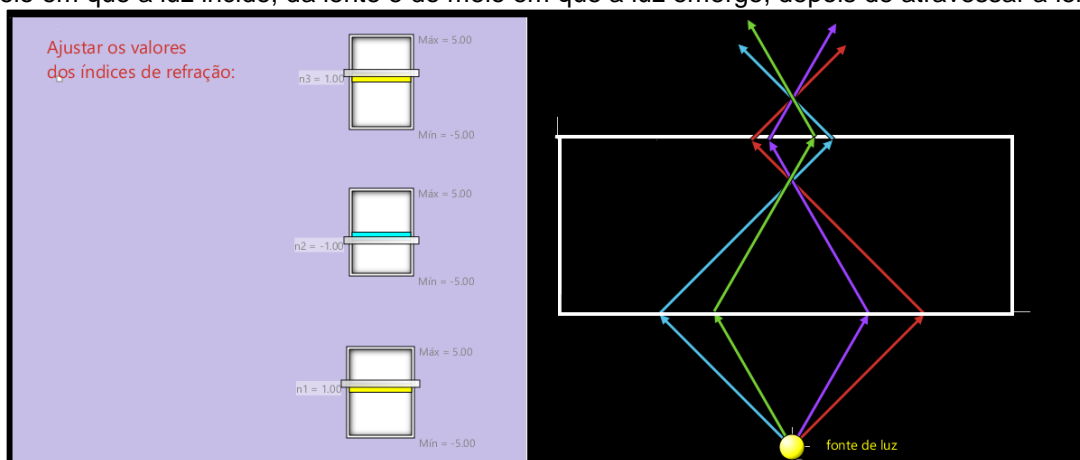
**Figura 14** – Exemplo de tela do simulador de dioptro plano desenvolvido no *software* Modellus-X, em que se mostra a luz de uma fonte puntiforme saindo de um meio cujo índice de refração é positivo e refratando-se em um meio com índice de refração negativo.



**Fonte:** da própria autora.

A Figura 15 apresenta tela de simulador, desenvolvido também no software Modellus-X, para representar uma superlente plana, cujo índice de refração é negativo. Esse simulador encontra-se disponível no link: [https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED\\_UmR1Y0xDN1BBT2s](https://drive.google.com/open?id=0BzOCdF4qvED_UmR1Y0xDN1BBT2s), com o nome *Super\_Lente*.

**Figura 15** – Exemplo de tela do simulador desenvolvido no *software* Modellus-X, em que se mostra a luz de uma fonte puntiforme saindo de um meio com índice de refração positivo em seguida incidindo em uma lente com índice de refração negativa. A simulação permite variar os índices de refração do meio em que a luz incide, da lente e do meio em que a luz emerge, depois de atravessar a lente.



Fonte: da própria autora.

Para uma melhor compreensão e aprofundamento do assunto relacionado aos materiais com índice de refração negativo, indicam-se os seguintes links:

- <[http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/material\\_didatico/2011/refracao\\_negativa/refracao\\_negativa.html](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico/2011/refracao_negativa/refracao_negativa.html)>
- <[http://www.if.ufrj.br/~carlos/artigos/SciAm2011\\_refracao\\_negativa.pdf](http://www.if.ufrj.br/~carlos/artigos/SciAm2011_refracao_negativa.pdf)>
- <[http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/dissertacoes/2011\\_Walter\\_Santos/dissertacao\\_Walter\\_Santos.pdf](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2011_Walter_Santos/dissertacao_Walter_Santos.pdf)>
- <<http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore163.htm>>