

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



O ENSINO DE ÓPTICA GEOMÉTRICA APOIADO POR *MOBILE GAMES*

Gustavo Bordignon Franz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física da Universidade de Brasília, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Prof. Dr. Marcello Ferreira

Brasília – DF
Julho/2019

O ENSINO DE ÓPTICA GEOMÉTRICA APOIADO POR *MOBILE GAMES*

Gustavo Bordignon Franz

Orientador:
Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física da Universidade de Brasília, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Aprovada por:

Prof. Dr. Marcello Ferreira

Prof. Dra. Maria de Fátima da Silva Verdeaux

Prof. Dr. Nelson Studart Filho

Brasília – DF
Julho/2019

S586p Franz, Gustavo Bordignon

O Ensino de Óptica Geométrica apoiado por *mobile games* /
Gustavo Bordignon Franz - Brasília: UnB / IF, 2019.

106p.: il.;30cm.

Orientador: Marcello Ferreira

Dissertação (mestrado) – UnB / Instituto de Física / Programa
de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 104-106.

1. Aprendizagem Significativa. 2. Ensino de Física. 3. Ensino
de Óptica Geométrica. 4. Games no Ensino de Física. 5. Unidades de
Ensino Potencialmente Significativas. I. Ferreira, Marcello. II.
Universidade de Brasília, Instituto de Física, Programa de Pós-
Graduação em Ensino de Física. III. O Ensino de Óptica Geométrica
apoiado por mobile games.

Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com você.

Carl Sagan

Agradecimentos

Aos meus pais, para quem o bem mais valioso é o conhecimento.

À minha companheira Natasha, que sempre me incentivou a continuar a minha formação e atingir os meus objetivos.

Aos meus sogros, pelos conselhos e apoio.

Aos meus animais de estimação, Tesla, Biju, Gauss e Yumi, pelo amor incondicional e puro.

Aos meus colegas de trabalho, especialmente ao professor Sandro, por ouvir minhas lamúrias sobre as dificuldades no mestrado durante os intervalos.

Aos meus estudantes, que abraçaram a ideia de uma atividade diferenciada e contribuíram enormemente para o meu crescimento profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcello Ferreira, pelas broncas, cobranças e elogios.

Ao Prof. Dr. Nelson Studart e à Prof. Dr^a. Maria de Fátima Verdeaux, pelas contribuições na dissertação e pela presença significativa na defesa.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, pelas condições objetivas de realização do Mestrado.

A todos aqueles que, mesmo de maneira indireta, contribuíram para que esta Dissertação fosse concluída.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O ENSINO DE ÓPTICA GEOMÉTRICA APOIADO POR *MOBILE GAMES*

Gustavo Bordignon Franz

Orientador: Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física da Universidade de Brasília, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Este trabalho investigou fundamentos teóricos e estratégias de qualificação do ensino de óptica geométrica no Ensino Médio, com o suporte de um *mobile game* sem finalidades educacionais originárias. Para isso, apoiou-se na construção, aplicação e avaliação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), visando à aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011; AUSUBEL, 1968). Um produto educacional foi elaborado no formato de sequência didática, prevendo-se cinco encontros; em quatro deles, ocorreram avaliações de conhecimentos prévios (subsunçores), para determinar a estrutura cognitiva dos estudantes, além de outras atividades que serviram como indicadores para observar indícios de aprendizagem significativa dos fenômenos ópticos. O *mobile game Glass*, disponível na plataforma *android*, foi utilizado para a construção da UEPS. O produto educacional foi aplicado no segundo semestre de 2018 em uma escola particular de uma Região Administrativa do Distrito Federal. Com base nos resultados obtidos na aplicação, pode-se inferir que mais de 85% dos estudantes que participaram de todos os encontros demonstraram indícios de aprendizagem significativa a partir das estratégias propostas. Além disso, foi observado que os encontros, individualmente, foram planejados de forma a proporcionar situações com problemáticas em níveis crescentes de complexidade, nas quais os estudantes puderam qualificadamente externalizar suas concepções acerca da óptica geométrica e de seus fenômenos.

Palavras-chave: Aprendizagem Significativa. Ensino de Física. Ensino de Óptica Geométrica. Games no Ensino de Física. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

Brasília – DF
Julho/2019

ABSTRACT

GEOMETRICAL OPTICS TEACHING SUPPORTED BY MOBILE GAMES

Gustavo Bordignon Franz

Supervisor: Prof. Dr. Marcello Ferreira

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação Graduação do Instituto de Física da Universidade de Brasília no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

This present work investigated the theoretical bases and strategies of qualification of geometric optics teaching in High School, with the support of a mobile game with no educational purposes. For this, it was based on the construction, application and evaluation of a Potentially Meaningful Teaching Units (PMTU), aiming at meaningful learning (MOREIRA, 2011; AUSUBEL, 1968). An educational product was prepared in a teaching unit format, with five meetings planned; in four of them, previous knowledge assessments (subsumers), to determine the students' cognitive structure, as well as other activities that served as indicators to observe signs of significant learning of the optical phenomena occurred. The mobile game Glass, available on the android platform, was used to build the PMTU. The educational product was applied in the second semester of 2018 in a private school of an Administrative Region of the Federal District. Based on the results obtained in the application, it can be inferred that more than 85% of the students who participated in all the meetings showed signs of meaningful learning from the proposed strategies. In addition, it was observed that the individual meetings were designed to provide problematic situations at increasing levels of complexity, in which students could qualifiedly outsource their conceptions of geometric optics and its phenomena.

Keywords: Meaningful Learning. Teaching Physics. Teaching of Geometric Optics. Games in Physics Teaching. Potentially Meaningful Teaching Units.

Brasília – DF
Julho/2019

Lista de Figuras

Figura 1	6
Figura 2	7
Figura 3	20
Figura 4	23
Figura 5	24
Figura 6	25
Figura 7	25
Figura 8	26
Figura 9	28
Figura 10	28
Figura 11	29
Figura 12	30
Figura 13	32
Figura 14	34
Figura 15	35
Figura 16	39
Figura 17	44
Figura 18	45
Figura 19	47
Figura 20	48
Figura 21	49
Figura 22	50
Figura 23	51
Figura 24	80

Lista de Gráficos

Gráfico 1	53
Gráfico 2	55
Gráfico 3	55
Gráfico 4	57
Gráfico 5.....	58
Gráfico 6.....	60
Gráfico 7.....	61

Sumário

Introdução	1
Capítulo 1: Referencial Teórico	9
1.1. A Teoria da Aprendizagem Significativa.....	9
1.2. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.....	15
Capítulo 2: Conceitos de Óptica Geométrica	19
2.1. A natureza da luz	19
2.2. Velocidade da Luz e Índice de Refração.....	20
2.3. Raios de Luz	22
2.4. Reflexão e Refração.....	23
Capítulo 3: Metodologia	32
3.1. Estrutura do produto educacional	32
3.2. Aplicação do produto educacional	46
Capítulo 4: Resultados e Análise	53
Capítulo 5: Considerações Finais.....	62
Apêndice A: Produto Educacional	64
Referências	105

Introdução

A óptica geométrica é a parte da Física que estuda os fenômenos associados ao comportamento macroscópico da luz. É um tópico estudado desde a Grécia antiga e integra o currículo básico de Física do Ensino Médio.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio - PCNEM a colocam como integrante dos temas que fazem parte dos conteúdos e práticas educativas sugeridas: particularmente, no tema 3 denominado “Som, imagem e informação”, cujas subunidades são: “fontes sonoras, formação e detecção de imagens, gravação e reprodução de sons e imagens, transmissão de sons e imagens” (BRASIL, 2006, p. 57). A Base Nacional Comum Curricular – BNCC (BRASIL, 2018) trata, em sua competência específica 3, voltada para as Ciências da Natureza e suas Tecnologias, da investigação de situações-problema para o desenvolvimento de tecnologias e solução de problemas em escala local, regional e global, podendo integrar a óptica geométrica e a investigação dos fenômenos luminosos com avanços tecnológicos, como a fibra óptica e os metamateriais, por exemplo.

Mesmo com o que é definido pela legislação brasileira acerca do ensino da física, especificamente da óptica geométrica, muito se questiona sobre a relevância em seu ensino e sobre seus limites dentro de uma educação tradicional, em que as mudanças nos livros didáticos se limitam, muitas vezes, a atualizações de imagens e figuras de capa, sem mudança real nos assuntos discutidos. Seria possível discutir fenômenos que não são explicados pela óptica geométrica, como o espalhamento da luz, em uma unidade de ensino sobre óptica geométrica, sem que haja um rompimento com as tradições curriculares? Cabe destacar que esta dissertação não tem como objetivo romper com o tradicionalismo do ensino de física; ela, entretanto, se ocupa da sugestão de um ordenamento didático em óptica geométrica. Entretanto, reflexões acerca de como ensinar física e sobre quais assuntos ensinar são válidas e devem ser constantemente encorajadas. É nesse sentido que se adota, nesta dissertação, uma postura pragmática do ensino da óptica geométrica: uma descrição qualitativa e conceitual de fenômenos ópticos, embasada em teoria psicológica aplicada à aprendizagem, o que, por si só, rompe com um paradigma de ensino.

De acordo com Lopes (2014, p. 2), “sendo ela [óptica geométrica] uma área com inúmeras aplicações a fenômenos cotidianos, somos levados a pensar que deveria ser fácil ensiná-la”. Entretanto, no contexto típico da educação básica brasileira, o ensino da óptica geométrica pode se mostrar um desafio pela falta de recursos para práticas em laboratório, pela falta de tempo ou mesmo de formação dos professores para discussões fenomenológicas, ou até mesmo pelas concepções alternativas dos estudantes sobre os fenômenos relacionados. Lopes (2014) lista razões para que o ensino da óptica geométrica seja tarefa complexa para os professores:

- Ideias pré-existentes sobre a luz e crenças baseadas no dia-a-dia construídas desde a infância, causando conflito com os conceitos que desejam ser transmitidos.
- Problema na compreensão da noção de raio de luz e sua representação gráfica.
- Pouca importância dada no processo de ensino formal ao papel do observador e do campo visual.
- Sistema de ensino convencional que se concentra em aspectos quantitativos.

A respeito da última razão listada acima, Diniz (2016) afirma que o sistema de ensino brasileiro parte de uma abordagem expositiva e, sobretudo, conteudista, fazendo com que à física seja atribuído um conteúdo vasto e que, de modo geral, não tem significado ou sentido para o estudante. Ainda segundo Diniz (2016), o processo de ingresso ao ensino superior público agrava os problemas gerados por essa característica de ensino:

Soma-se a esse quadro a influência do nosso sistema de avaliação para o ingresso nas universidades, o nosso “vestibular”, que atualmente, na maioria das universidades públicas do país, é feito pelo exame nacional do ensino médio (ENEM), que provoca uma verdadeira “corrida” entre as escolas de ensino médio para um bom desempenho frente a esta avaliação, que é realizada ao final de cada ano letivo (DINIZ, 2016, p. 2).

Além das influências decorrentes das políticas públicas educacionais, especialmente as políticas curriculares, bem como aquelas originadas na dificuldade em lidar com concepções conceituais baseadas em senso comum, outro fator que contribui para que o ensino da física na escola se afaste da realidade do estudante é o fato de que estes são nascidos na era digital. Para Prensky (2001, p. 1), “nossos alunos mudaram radicalmente. Os alunos de hoje

não são os mesmos para os quais o nosso sistema educacional foi criado”, isto é, o avanço da tecnologia deve, de alguma maneira, afetar o processo de ensino-aprendizagem dos estudantes. Dessa forma, é necessário que o professor busque alternativas ao ensino tradicional, que integrem como forma de mediação pedagógica as tecnologias digitais da informação e comunicação, que fazem parte do cotidiano do estudante, com o conteúdo a ser discutido em sala de aula.

Um tipo de tecnologia que o professor pode usar ao seu favor para ensinar os nativos digitais, aqueles que nasceram na era digital, são os videogames (PRENSKY, 2001). Os *games* são uma ferramenta de ensino adequada, pois apresentam vários elementos que contribuem para a aprendizagem. Gee (2009) apresenta dezesseis princípios de aprendizagem contidos nos *games*, dentre os quais se destacam três:

- Riscos: a possibilidade do estudante poder falhar diversas vezes no jogo sem que seja punido gravemente. Por exemplo, se um personagem de um jogo pular de um precipício e morrer, sempre haverá outra vida ou outra tentativa, o que, por óbvio, não é válido para a vida real.
- Boa ordenação dos problemas: é a evolução da complexidade dos problemas que surgem ao longo do jogo, sempre indo do mais simples ao mais complexo.
- Desafio e consolidação: sempre há um obstáculo a ser ultrapassado.

Pesquisas específicas na área de ensino de física confirmam a validade do uso de *games* para o ensino de física, como se pode verificar nos trabalhos de Sun et. al. (2015), que utilizaram os *mobile games Cut the Rope e Angry Birds Space* para a aquisição de conceitos sobre pêndulos e movimento circular em estudantes de nível superior; de Ferreira (2017), que investigou e concluiu que o *game Angry Birds Space* pode ser usado para aumentar a motivação dos estudantes e minimizar dificuldades comuns no ensino de conceitos de gravitação; de Costa e Ramos (2015), que investigaram a possibilidade de uso dos *games Screamride e Powerstar Golf* para a aquisição de conceitos acerca do lançamento de projéteis; de Clark et. al (2011), que desenvolveram um *game* para ensinar conceitos de mecânica newtoniana e aplicaram-no em um total de duzentos e oitenta estudantes de escolas de Taiwan e dos Estados Unidos, concluindo que o uso de jogos digitais no ensino de física possuem um grande potencial para aumentar o engajamento dos estudantes durante as aulas de

física; e de Anderson e Barnett (2013), que utilizaram o *game Supercharged!* para ensinar conceitos de eletromagnetismo para noventa e um estudantes de uma escola secundária dos Estados Unidos e concluíram que o uso do game proporcionou, nos estudantes, uma descrição mais elaborada a respeito de campos elétricos e da relação entre a distância e a força de interação entre duas cargas elétricas.

Trabalhos desenvolvidos no âmbito do MNPEF também fornecem resultados que validam o uso de *games* no ensino de física. Riboldi (2016) utilizou um *game* educacional desenvolvido pelo MIT para ensinar conceitos de relatividade restrita para alunos do 1º ano do ensino médio e concluiu que o uso do *game* influenciou diretamente na motivação dos estudantes durante as aulas e na aquisição dos conceitos trabalhados. Um aumento significativo na motivação dos estudantes nas aulas de física com uso de *games* também foi um resultado obtido por Zahaila (2017), que utilizou o *game Portal 2* como uma alternativa ao laboratório de física tradicional na realização de atividades experimentais. Oliveira (2018) desenvolveu um *game* para ensinar conceitos de física de partículas elementares e percebeu, além de um aumento na motivação dos estudantes participantes da pesquisa, que a aprendizagem baseada em jogos digitais está em consonância com as necessidades da nova geração de estudantes nativos digitais. Galvão (2017) utilizou os princípios físicos e a estrutura do *game Angry Birds* para fazer com que seus estudantes desenvolvessem um *game* explorando conceitos de lançamento de projéteis, concluindo que o processo de desenvolvimento de um jogo digital foi fundamental para a eficácia no aprendizado de física.

Dentre perspectivas psicológicas que se ocupam descrever processos cognitivos, a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (1968) corrobora que o fator que mais influencia a aprendizagem é aquilo que o estudante já sabe. Por essa perspectiva, o professor deve conhecer a realidade de seus estudantes, utilizando o seu conhecimento prévio sobre determinado assunto para, a partir disso, ensiná-lo. Se um estudante aprende significativamente, ele deve ser capaz de acessar o conteúdo aprendido, sem necessidade de memorização, para solucionar situações-problema propostas pelo professor e outras situações distintas e com níveis variados de complexidade.

Nesse sentido, os elementos estruturais dos *games*, destacados anteriormente, seriam relacionáveis à proposta ausubeliana de aprendizagem significativa, pois podem proporcionar situações-problema em escala de complexidade gradual para o estudante, assim como possuir elementos de conhecimento prévio e introduzir outros conhecimentos, em uma abordagem geral, que podem integrar tópicos de ensino e discussões educacionais futuras.

Uma maneira de operacionalizar a teoria da aprendizagem significativa é a criação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa - UEPS, proposta por Moreira (2011), em que é sugerida uma estrutura didática teoricamente orientada à aprendizagem significativa. Primeiramente deve se escolher o tema a ser trabalhado, identificando tudo o que é necessário para a sua compreensão. Após a escolha do tema, situações que levem o estudante a externalizar seu conhecimento prévio devem ser elaboradas, pois esse é o ponto de partida para a discussão de novos tópicos de ensino dentro da perspectiva da teoria da aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1968). Situações-problema iniciais são sugeridas em nível introdutório. Em sequência, o conteúdo a ser ensinado é apresentado e discutido e são apresentadas novas situações-problema, em um nível maior de complexidade, e novas discussões são realizadas, com o objetivo de diferenciar os conceitos introduzidos pela nova informação daqueles que o estudante já conhecia previamente. Concluindo a UEPS, são realizadas atividades em uma perspectiva integradora, objetivando a integração dos novos conhecimentos com os conhecimentos prévios dos estudantes. A avaliação da UEPS é realizada ao longo do processo de ensino-aprendizagem, mas Moreira (2011) também sugere que sejam realizadas avaliações ao final, de tal maneira que o professor possa registrar tudo o que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa.

Um *mobile game* foi escolhido¹ como ferramenta de ensino neste trabalho, com o intuito de facilitar e fornecer condições para que a sequência didática desenvolvida possa ser replicada por outros professores. Atualmente no Brasil, existem mais *smartphones* do que brasileiros (MEIRELLES, 2018), são cerca de 235 milhões de aparelhos; portanto, a é maior a viabilidade de um professor

¹ O *game* escolhido chama-se *Glass*. O *game* será detalhado nas próximas páginas

poder utilizar um *game* desenvolvido em plataforma móvel do que outro desenvolvido especificamente para computador.

Studart (2015, p. 9) destaca que “uma das maneiras de usar os *games* para fins educacionais é, de início, identificar aqueles disponíveis no mercado que satisfazem aos objetivos de ensino e aprendizagem”. Esse foi um dos critérios utilizados para a escolha do *game* que integra a UEPS desenvolvida neste trabalho. Buscou-se um *game* que pudesse ser utilizado para ensinar óptica.

Na internet, existe uma infinidade deles articulando raios, *lasers*, arco-íris e outros fenômenos explicados pela óptica; entretanto, um bom número possuía erros conceituais graves em sua concepção. Por exemplo, um *game* não respeitava o princípio da independência dos raios de luz (Figura 1); outros não davam o destaque necessário para os fenômenos ópticos para a resolução de problemas. Outro aspecto interessante no uso de um *game* para o ensino de óptica geométrica é que não existem muitos relatos na literatura sobre a utilização de *games* em tópicos que não integrem a mecânica newtoniana, como relatam Mohanty e Cantu (2011, p. 578): “Nós achamos que os *games* comerciais atuais têm um uso limitado a outros tópicos que não a mecânica newtoniana”.



Figura 1: Tela do game para android Ray Trace. É possível ver que o princípio da independência dos raios de luz não é respeitado.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O *mobile game* escolhido para ensinar óptica geométrica chama-se “Glass” e foi desenvolvido por cube3rd² para a plataforma *Android*. É um jogo do tipo *puzzle*³, em que o jogador tem que desviar a trajetória de raios de luz provenientes de uma fonte utilizando refletores planos, lentes convergentes e divergentes, primas e divisores de raios até um receptor, como pode ser observar na figura 2. O jogo possui oitenta e um níveis espalhados em nove mundos diferentes, em que cada mundo possui um fenômeno ou instrumento óptico diferente do anterior.

Com base no que foi discutido anteriormente, esta Dissertação tem como objetivo geral investigar fundamentos teóricos e estratégias de qualificação do ensino de óptica geométrica no ensino médio, com o suporte de *mobile games* em uma unidade de ensino potencialmente significativa. Subsidiariamente, os objetivos específicos são: (a) pesquisar, em perspectiva teórica e aplicada, potencialidades de um *mobile game*, não concebido com finalidades educacionais, no ensino de conceitos básicos da óptica geométrica; (b) desenvolver, aplicar e avaliar uma proposição educacional, caracterizada por uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, disponibilizando-a a professores de física no ensino médio; e (c) investigar e analisar qualitativamente evidências de aprendizagem significativa de conceitos básicos de óptica geométrica nos estudantes participantes da pesquisa.

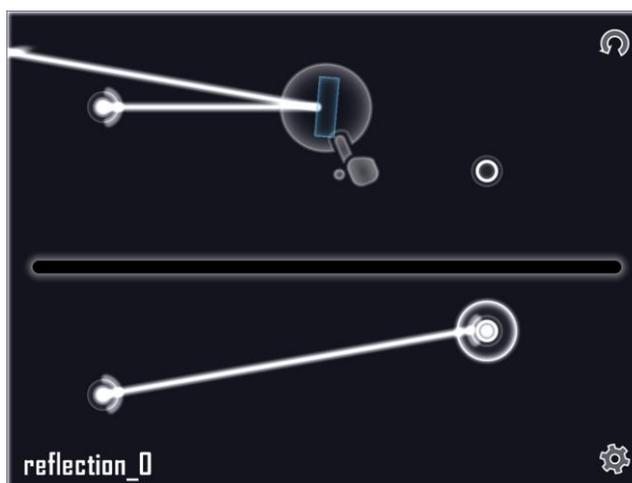


Figura 2: tela do *game Glass*
Fonte: Web⁴

² Site do desenvolvedor disponível em: <<http://cube3rd.blogspot.com/>> Acesso em: 15 abr. 2019

³ Consiste em um tipo de *game* em que o jogador deve resolver um quebra-cabeças.

⁴ Disponível em: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cube3rd.glass>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

Além da seção introdutória, esta dissertação é composta por um capítulo que apresenta o referencial teórico adotado para o ensino da óptica geométrica, incluindo o referencial metodológico para a construção da sequência didática. Também há um capítulo em que são discutidos aspectos conceituais e a formulação matemática da óptica geométrica, outro em que é feita uma descrição da sequência didática produzida, bem como sua aplicação, assim como uma apresentação e discussão dos resultados obtidos, um capítulo para as considerações finais e o produto educacional, no apêndice A.

Capítulo 1

Referencial Teórico

1.1. A Teoria da Aprendizagem Significativa

A teoria da aprendizagem significativa, desenvolvida por David Ausubel, se enquadra como cognitivista, pois acredita o processo de aprendizagem como sendo resultado da interação e da organização do material instrucional na estrutura cognitiva do indivíduo (MOREIRA, 1999).

A teoria da aprendizagem significativa começa a partir de dois aspectos comuns àqueles que frequentam a sala de aula. O primeiro aspecto é assumir que o principal fator influenciador da aprendizagem de algo é a quantidade, clareza e organização do que já é conhecido pelo estudante. Esse conhecimento consiste em fatos, conceitos, proposições e teorias que estão à disposição do estudante a qualquer momento, formando a estrutura cognitiva. O segundo aspecto é a natureza do material disponível a ser ensinado. Esse material deve se relacionar com a estrutura cognitiva do estudante de maneira substantiva, isto é, sem que o significado de um conceito se altere caso as palavras utilizadas para defini-lo alterem. A relação entre o material e a estrutura cognitiva também deve ser não-arbitrária, isto é, o estudante não pode memorizar conceitos e proposições de maneira aleatória e sem relevância, sem que haja sentido e significado no que está aprendendo. O material que possui essas qualidades é chamado de potencialmente significativo (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

Um exemplo de material que tenha como objetivo proporcionar a aprendizagem significativa é a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa que foi produzida nesta dissertação. No segundo encontro da UEPS, como ficará detalhado ao longo de sua descrição, os estudantes devem resolver fases do *game Glass*, em grupos colaborativos, e explicar quais dispositivos são utilizados para alterar a trajetória da luz e como funcionam, além de mostrar quais conceitos de óptica geométrica são contemplados nas fases do *game*. Após esta etapa inicial, os estudantes apresentam suas conclusões ao professor e é feita uma discussão sobre as leis da refração da luz. Em sequência à discussão, uma imagem de uma fase do *game* onde é possível observar três raios passando por uma lente divergente é projetada no quadro e os estudantes devem, baseado na discussão anterior, descobrir qual é o material da lente.

Na produção de uma sequência didática que tenha como objetivo proporcionar a aprendizagem significativa de algum conceito, os dois aspectos devem ser levados em consideração. Dessa maneira, devem ser utilizadas estratégias que possibilitem a determinação dos conhecimentos presentes na estrutura cognitiva dos estudantes que se relacionem com o assunto a ser ensinado. É possível visualizar um exemplo de avaliação de conhecimentos prévios nas atividades iniciais do primeiro encontro do produto educacional produzido neste trabalho. Os estudantes devem produzir, após contemplação da obra do artista Rashad Alakbarov, um descritivo da obra, como se fosse uma ficha técnica, informando como é feita a sua montagem, materiais que a constituem, influência do tipo de fonte de luz, assim como uma representação gráfica da obra. De acordo com o que foi escrito pelos estudantes, o professor pode avaliar se certos conhecimentos integravam a sua estrutura cognitiva – aquilo a que Ausubel denominou de subsunçores.

Ausubel e Robinson (1969) também destacam que, além dos dois aspectos anteriormente citados, a aprendizagem significativa depende da vontade do estudante de relacionar o material com os conhecimentos preestabelecidos em sua estrutura cognitiva, isto é, o estudante deve possuir uma predisposição para o aprendizado. Segundo Moreira e Masini (1982, p. 14):

[...] independentemente de quão potencialmente significativo seja o material a ser aprendido, se a intenção do aprendiz é, simplesmente, a de memorizá-lo arbitrariamente e literalmente, tanto o processo de aprendizagem como seu produto serão mecânicos ou sem significado. (Reciprocamente, independente de quão predisposto para aprender estiver o indivíduo, nem o processo nem o produto serão significativos se o material não for potencialmente significativo).

Um desafio para professores e estudantes do ensino básico é justamente se afastar de um ensino que priorize a memorização literal de conceitos e proposições, pois tal ensino não possui significado, não é significativo. Uma maneira de se afastar da memorização excessiva e sem significado é a mudança no papel do professor em sala de aula. É necessário um deslocamento da posição daquele que impõe o conhecimento para outra, como um indivíduo que também compõe um relacionamento entre sua estrutura cognitiva prévia e o material potencialmente significativo, alterando os significados.

O ensino pode ser interpretado como uma troca de significados, sobre determinado conhecimento, entre professor e aluno até que compartilhem significados comuns. São esses significados compartilhados que permitem a passagem da estrutura conceitual da

matéria de ensino para a estrutura cognitiva do aluno sem o caráter de imposição (MOREIRA, 1983, p. 60).

O objetivo da aprendizagem significativa é, portanto, criar significados comuns na estrutura cognitiva, baseando-se na relação entre as experiências passadas e o material potencialmente significativo, fazendo com que o estudante possua a capacidade de formular soluções de mesma natureza ou categoria em situações distintas. Mas, o que é significado? Ausubel (1968) argumenta que é o produto do processo de aprendizagem significativa, sendo todos os recursos, lembranças e referências que são ativados na estrutura cognitiva do indivíduo quando ele é exposto a um determinado símbolo, grupo de símbolos ou expressões.

Por exemplo, a sequência didática desenvolvida neste trabalho de pesquisa não prioriza a memorização do conceito de refração da luz apenas como sendo uma proposição imposta, do tipo “A passagem da luz por uma superfície (ou interface) que separa dois meios diferentes é chamada de refração” (HALLIDAY et. al, 2016, p. 60), que não gera qualquer tipo de significado ou relação com o cotidiano do estudante. O importante é que os estudantes compreendam o fenômeno da refração da luz, em que tipos de situações ele poderia acontecer e como identificar a sua ocorrência. Para além disso, que saibam identificá-lo num quadro de variação contextual e formular explicações a toda a sua cadeia de correlações físicas, como em diversas situações que serão apresentadas na sequência didática, na obra do artista Rashad Alakbarov e na obra da fotógrafa Suzanne Saroff, no primeiro encontro, a refração da luz em lentes nas fases do *game* no segundo encontro e nas experiências do terceiro encontro.

No processo de aprendizagem significativa, o estudante é exposto a novas informações, potencialmente significativas, que interagem com uma estrutura de conhecimento específica, denominada subsunçor. O subsunçor é um conceito que possui algum vínculo relacional com o conteúdo a ser ensinado e é integrante da estrutura cognitiva do estudante, servindo de apoio para a criação de novos significados (MOREIRA, 1983). Por exemplo, para se ensinar o conceito de refração da luz, alguns exemplos de subsunçores necessários para a sua compreensão são os conceitos de meio e raio de luz, além de princípios da propagação da luz. Desta maneira, a determinação dos conhecimentos prévios do estudante se torna fundamental para a aprendizagem significativa,

devendo ocorrer, preferencialmente, ao longo de todo o processo de instrucional e não apenas na etapa inicial de uma sequência didática.

A estrutura cognitiva não permanece inalterada ao longo do processo de aprendizagem; ela interage com as novas informações, integrando-as e se alterando em decorrência das interações. Segundo Moreira (1983, p. 20):

Entretanto, a experiência cognitiva não se restringe à influência direta dos conceitos já aprendidos significativamente sobre componentes da nova aprendizagem, mas abrange também modificações significativas em atributos relevantes da estrutura cognitiva pela influência do novo material. Há, pois, um processo de interação através do qual conceitos mais relevantes e inclusivos interagem com o novo material servindo de ancoradouro, incorporando-o e assimilando-o, porém, ao mesmo tempo, modificando-se em função dessa ancoragem.

É interessante destacar que, no processo de ancoragem de novas informações por meio do uso de subsunçores, estes não precisam necessariamente ser obtidos por meio de aprendizagem significativa. Portanto, é possível aprender significativamente algum conteúdo utilizando conceitos que foram memorizados pelos estudantes (AUSUBEL, 1968). A isso Moreira (1983) nomeou aprendizagem mecânica.

Como destacado anteriormente, a teoria da aprendizagem significativa pressupõe estruturas já disponíveis na estrutura cognitiva dos estudantes, os denominados subsunçores, para se relacionar com o material potencialmente significativo. Entretanto, existem situações em que os estudantes não apresentam os subsunçores necessários ou desejados para o aprendizado de certo conteúdo. Nesse caso, Ausubel (1968) argumenta que é possível introduzir os subsunçores aos estudantes por meio de um material introdutório, relevante, claro e estável, chamado de organizador prévio.

O organizador prévio é, então, um material introdutório, em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade do que o conhecimento que se pretende acessar, com capacidade de melhoria da organização das ideias, além de preparo e fortalecimento da estrutura cognitiva dos estudantes. O seu uso é baseado, principalmente, em: a) a importância de se ter ideias relevantes e apropriadas já estabelecidas na estrutura cognitiva dos estudantes, para tornar potencialmente significativas e para proporcionar um apoio estável ao novo conhecimento; b) utilizar um material mais geral e inclusivo do que subsunçores é mais vantajoso, devido a maior estabilidade, poder de explicação e capacidade de integração à estrutura cognitiva; e c) o fato de que tentam identificar aspectos

relevantes para o ensino na estrutura cognitiva e explicitar a sua relação com o material instrucional.

Como Ausubel (1968, p. 148) destaca, “A principal função do organizador prévio é fazer a conexão entre o que o aprendiz já sabe e o que precisa saber antes de aprender com sucesso a tarefa em questão⁵.”, isto é, os organizadores prévios se provam uma estratégia válida para a garantia de que os subsunçores adequados estarão presentes na estrutura cognitiva dos estudantes, pois são desenvolvidos e utilizados com o intuito de introduzir o estudante ao assunto que será ensinado. Segundo Moreira (1983, p. 30), “organizadores prévios são úteis para facilitar a aprendizagem na medida em que funcionam como pontes cognitivas”.

No quarto e no quinto encontro do produto educacional elaborado neste trabalho, o *game Glass* desempenhou um papel de organizador prévio, pois apoiou a introdução dos estudantes aos fenômenos luminosos de maneira geral e em maior nível de abstração. Outros exemplos de organizadores prévios podem ser encontrados em Moreira (1983).

Dois processos relacionados entre si surgem durante a aprendizagem significativa: a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa (MOREIRA, 1983).

Segundo Ausubel (1968), a diferenciação progressiva acontece quando ideias mais gerais e inclusivas de determinada área do conhecimento são apresentadas primeiro aos estudantes e, então, detalhadas e diferenciadas progressivamente ao longo do processo de ensino-aprendizagem. Essa ordem de exposição ao conteúdo a ser ensinado a partir de ideias gerais para específicas é presumivelmente similar à sequência natural de aprendizagem da estrutura cognitiva de um indivíduo quando este é exposto a algo desconhecido. De acordo com Moreira e Masini (1982, p. 21), a afirmação de Ausubel se baseia em duas hipóteses:

- (a) é mais fácil para o ser humano captar aspectos diferenciados de um todo mais inclusivo previamente aprendido, do que chegar ao todo a partir de suas partes diferenciadas; (b) a organização do conteúdo de uma certa disciplina, na mente de um indivíduo, é uma estrutura hierárquica na qual as ideias mais inclusivas estão no topo da estrutura

⁵ “*the principal function of the organizer is to bridge the gap between what the learner already knows and what he needs to know before he can successfully learn the task at hand*” (tradução livre a partir do original).

e, progressivamente, incorporam proposições, conceitos e fatos menos inclusivos e mais diferenciados.

Portanto, todo o material didático deveria ser organizado em conformidade com a diferenciação progressiva, partindo de ideias mais gerais e inclusivas para tópicos mais específicos, já que esta seria a sequência natural, por assim dizer, de aprendizagem humana. Entretanto, a maioria dos livros didáticos não são organizados desta maneira, segregando o material em diversos capítulos, seções e tópicos de acordo com a sua relação, sem preocupações com o nível de abstração, generalidade e inclusividade que possuem entre si. Essa prática poderia fazer com que um material potencialmente significativo fosse aprendido exclusivamente de maneira mecânica, sem criar significados, causando dificuldade e pouco sucesso na aprendizagem (AUSUBEL, 1968).

Um exemplo em que a diferenciação progressiva é considerada no planejamento do material didático pode ser encontrado no produto educacional elaborado e desenvolvido neste trabalho. Ao utilizar o *game Glass* nas atividades, os estudantes são expostos a uma variedade de fenômenos ópticos, não apenas aqueles que irão aprender em uma aula específica, criando uma visão geral do que é a óptica geométrica e quais fenômenos estão relacionados. A partir dessa visão geral, cada encontro se concentra em fenômenos ligados à refração da luz, como o funcionamento de uma fibra óptica, a formação de um arco-íris e as lentes que são utilizadas para corrigir defeitos na visão, diferenciando-os ao longo das aulas e relacionando cada fenômeno e em que parte do *game* poderia ser visualizado.

Durante o processo de diferenciação progressiva, relações entre as novas informações e a estrutura cognitiva do estudante podem modificar ideias já estabelecidas previamente, causando uma reorganização da estrutura cognitiva. Quando isso acontece, ocorre a reconciliação integrativa (MOREIRA, 1983). A maioria dos livros didáticos não é organizada de forma a proporcionar a reconciliação integrativa, pois assuntos relacionados entre si são organizados em tópicos separados e independentes, não evidenciando a sua relação. Neste caso, a tarefa de discriminar e perceber a relação entre os tópicos recai sobre os estudantes, causando confusão e dificuldade na retenção do que foi aprendido, encorajando a aprendizagem mecânica exclusivamente (AUSUBEL, 1968).

Moreira (1983, p. 50) resume os conceitos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa:

A diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa são processos relacionados que ocorrem à medida que a aprendizagem significativa acontece. [...] a ocorrência da assimilação (subsunção) conduz à diferenciação progressiva do conceito ou proposição subsunçor. [...] à medida que novas informações são adquiridas, elementos já existentes na estrutura cognitiva podem ser percebidos como relacionados e ser reorganizados e adquirir novos significados. Este rearranjo de elementos existentes na estrutura cognitiva é conhecido como reconciliação integrativa.

Tendo em vista a complexidade da teoria da aprendizagem significativa, somada à falta de informações procedimentais sobre como construir um material potencialmente significativo por parte de Ausubel, construir uma sequência didática que proporcione a aprendizagem significativa é um desafio. Uma maneira de realizar esta tarefa com uma chance maior de sucesso é seguir a estrutura sugerida por Moreira (2011) para a produção de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS).

1.2. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas

Uma unidade de ensino potencialmente significativa (UEPS), tal como proposta por Moreira (2011), é uma sequência didática⁶ que se propõe a proporcionar indícios da aprendizagem significativa. Sua fundamentação teórica dá-se principalmente na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (1968), contando com elementos presentes em outras contribuições teóricas nos campos do desenvolvimento e da cognição, como as de Vygotsky (1987), Novak (1977), Gowin (1981), Vergnaud (1990), Moreira (2005) e Johnson-Laird (1983).

Moreira (2011) apresenta oito aspectos sequenciais que uma UEPS deve conter.

O primeiro passo é “definir o tópico a ser abordado, identificando seus aspectos declarativos e procedimentais tais como aceitos no contexto da matéria de ensino na qual se insere esse tópico (MOREIRA, 2011, p. 45)”. Ausubel (1968), Moreira (1983), Novak et. al (1996) reconhecem que o primeiro passo para a formulação de qualquer material potencialmente significativo é a definição, clara e precisa, do tópico a ser ensinado. É apenas com a visão geral do que será ensinado que o professor pode definir quais subsunçores serão

⁶ “[...] conjunto de atividades escolares organizadas, de maneira sistemática, em torno de um gênero textual oral ou escrito” (DOLZ et. al, 2004, p. 97).

utilizados e traçar as estratégias necessárias. Uma boa instrução não sobrevive sem o conhecimento global do que se precisa ensinar, para além do planejamento específico de ensino de cada tópico/conhecimento.

Após a definição rigorosa e eficiente do que será ensinado, da estrutura do conhecimento para ensino, o professor deve criar situações para investigar quais subsunçores estão presentes na estrutura cognitiva dos estudantes (MOREIRA, 2011). Este é o segundo passo para se criar uma UEPS, e um dos mais fundamentais, pois todo o processo da aprendizagem significativa depende da determinação dos conhecimentos prévios dos estudantes. Ausubel (1968, p. iv), no prefácio de sua obra, torna isso claro quando diz que o aspecto principal de sua teoria é o que o estudante já sabe:

Se eu tivesse que reduzir toda a psicologia educacional em apenas um princípio, eu diria isto: O fator mais importante influenciador do aprendizado é o que o aprendiz já sabe. Verifique isso e o ensine de acordo⁷.

É por isso que, como destacado anteriormente, no produto educacional desenvolvido neste trabalho, os conhecimentos prévios dos estudantes não são apenas mensurados no momento inicial da sequência de ensino, mas ao longo de todo o processo.

O terceiro aspecto metodológico para a criação de uma UEPS é a proposição de situações-problema em nível introdutório, podendo envolver o tópico que será ensinado, mas ainda sem tratá-lo na íntegra. Essas situações iniciais darão sentido a novos conhecimentos, uma vez que os estudantes devem percebê-las como problemas, e podem ser introduzidas por meio de vídeos, simulações computacionais, demonstrações ou até mesmo problemas clássicos da matéria de ensino (MOREIRA, 2011).

Na UEPS desenvolvida nesta dissertação, um exemplo de uma situação-problema inicial é a proposta na primeira atividade do terceiro encontro, em que os estudantes devem resolver uma fase do *game Glass* do mundo *Dispersion*, que possui, além de espelhos planos, prismas que decompõem a luz. É a partir da decomposição da luz no prisma que os estudantes conseguem solucionar a fase do *game*. Desta maneira, é proposta uma situação-problema – qual seja,

⁷ “If I had to reduce all of educational psychology to just one principle, I would say this: The most important single factor influencing learning is what the learner already knows. Ascertain this and teach him accordingly.”(Tradução livre a partir do original).

solucionar a fase do *game* – que envolve o conteúdo a ser ensinado de maneira geral e inclusiva, porém, sem antecipar a solução na íntegra.

Dando sequência aos passos que compõem uma UEPS, Moreira (2011) propõe que, após as situações-problema iniciais, o professor deve apresentar o conhecimento a ser aprendido, considerando a diferenciação progressiva. O professor deve tomar um cuidado especial nesta parte da UEPS, pois deve apresentar o conhecimento de uma maneira que evite a memorização de conceitos que não implicam a criação de significados, isto é, a aprendizagem meramente mecânica. O conhecimento deve ser apresentado de tal forma que estimule o estudante a expressar para os colegas as suas concepções e que sejam o sujeito principal do processo de ensino-aprendizagem.

O quinto passo descrito por Moreira (2011) sugere a retomada de aspectos mais gerais do conteúdo a ser ensinado, propondo novas situações-problema, em maior nível de complexidade e abstração, com o intuito de promover a reconciliação integrativa.

Retomando o exemplo do terceiro encontro da UEPS produzida neste trabalho, o quarto e quinto passos podem ser vistos nas atividades seguintes à primeira, nas quais o professor discute com os estudantes o fenômeno da dispersão da luz, apresenta uma demonstração que envolve a ocorrência desse fenômeno em uma bacia de água que contém um espelho no fundo e solicita que os estudantes representem como se daria a configuração dos raios de luz na situação da demonstração. Dessa maneira, aspectos mais gerais e estruturantes da dispersão da luz são apresentados para os estudantes, assim como uma situação-problema com um nível maior de complexidade.

No sexto aspecto metodológico, Moreira (2011) indica que, para a conclusão da UEPS, o processo de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa deve acontecer novamente, em um nível maior de complexidade, com nova apresentação de aspectos relevantes do conteúdo ensinado e novas situações-problema. Isso pode ser exemplificado observando a primeira e a última atividade da segunda aula do terceiro encontro do produto educacional. Naquelas atividades, o professor retoma uma discussão inicial do encontro, sobre a formação de um arco-íris, solicita que os estudantes representem graficamente os raios de luz que atingem uma gota de água no ar e, em seguida, os questiona acerca da coloração do céu durante o dia, apresentando uma

demonstração em que uma lanterna é posicionada em frente a um recipiente transparente contendo uma solução de água com algumas gotas de leite e é ligada. Pode-se observar da experiência que a luz, ao atravessar o recipiente, possui uma cor azulada. Se um anteparo for colocado atrás do recipiente, uma luz mais avermelhada pode ser observada. Após essas atividades, o professor discute com os estudantes o fenômeno do espalhamento da luz e propõe uma última situação-problema, em que eles devem formular teorias para explicar a mudança da cor do céu ao longo do dia.

Os sétimo e oitavo passos sugeridos por Moreira (2011) dizem respeito à determinação da aprendizagem significativa dos estudantes. É destacado que a avaliação ocorre durante as aulas, procurando sempre por evidências de aprendizagem significativa, como, por exemplo, a representação gráfica correta das situações propostas nos encontros da UEPS produzida e a aplicação do que foi discutido em situações distintas, enfatizando que ela tem caráter progressivo e, por isso, sua avaliação não deve se concentrar em comportamentos finais. Também é sugerido que esse processo seja feito a partir de uma avaliação somativa⁸, no final da UEPS, composta de questões que busquem evidenciar a capacidade de transferência do conhecimento por parte dos estudantes.

Na planificação da UEPS para o ensino de óptica geométrica, cada encontro possui uma seção de avaliação, nas quais são determinados os indicadores de aprendizagem significativa esperados para cada atividade realizada. Uma avaliação somativa foi realizada ao final da UEPS, em caráter global, constituindo o quinto encontro.

⁸ “é aquela que busca avaliar o alcance de determinados objetivos de aprendizagem ao final de uma fase de aprendizagem; é usualmente baseada em provas de final de unidade, em exames finais” (MOREIRA, 2011, p. 59).

Capítulo 2

Conceitos de Óptica Geométrica

Este capítulo tem como função discutir aspectos teóricos da óptica geométrica em um nível que forneça subsídios para a compreensão do objeto de estudo do produto educacional construído nesta Dissertação.

2.1. A natureza da luz

Antes do início do século XIX, a natureza da luz foi objeto de interesse de diversos cientistas. Desde os gregos, que não faziam distinção entre luz e visão (KNIGHT, 2016), passando pelos experimentos de Newton, que acreditava que a luz era composta de partículas, até os de Hooke e Huygens, que sugeriam que a luz era uma onda, a discussão sobre a natureza da luz servia como referência em todas as descobertas e revoluções no estudo da óptica. Mas, foram as contribuições de Thomas Young e seus experimentos de interferência com a luz que consubstanciaram a teoria ondulatória. No final do século XIX, Maxwell e Hertz provaram, então, que a luz se comportava como uma onda eletromagnética (BORN; WOLF, 1980).

No início do século XX, alguns fenômenos relacionados à natureza da luz ainda não podiam ser explicados. Por exemplo, o efeito fotoelétrico, descoberto em um experimento feito por Hertz, acontecia quando a luz incidia sobre uma superfície metálica e, ocasionalmente, elétrons eram ejetados. Os resultados deste experimento mostravam que a energia cinética dos elétrons ejetados era independente da intensidade da luz. Esse fenômeno foi apenas explicado por Einstein em 1905, utilizando o conceito de quantização desenvolvido por Max Planck. O modelo da quantização assume que a energia de uma onda de luz pode ser interpretada como um conjunto descontínuo de partículas, chamadas de fótons. Por causa do progresso no estudo da natureza da luz no século XX, chega-se à conclusão de que a luz não é *stricto sensu* onda ou partícula. A luz apresenta uma natureza dual, comportando-se como onda em algumas situações e como partícula em outras. O que define o comportamento da luz como onda ou partícula é o tamanho dos obstáculos ou aberturas em que a luz atravessa. Se atravessa por uma abertura com tamanho menor do que 0,1 mm de largura, apresenta comportamento ondulatório. Se a abertura possui um tamanho maior do que 0,1 mm, se comporta como partícula (KNIGHT, 2016).

Por exemplo, sabe-se que um comportamento associado às ondas é o fenômeno da difração, o espalhamento da onda em todas as direções ao passar através de uma fenda. Em um primeiro momento, pode-se pensar que a luz, sendo um jato contínuo de partículas, não pode apresentar este comportamento, conforme ilustra a figura 3. Entretanto, Thomas Young mostrou, em 1801, que a luz poderia sofrer não apenas difração, mas também interferência, não havendo dúvida de que a luz é uma onda. No caso do efeito fotoelétrico, a teoria ondulatória previa que a energia dos elétrons deveria depender da intensidade da luz emitida, porém, não era isso que os resultados experimentais mostravam. Apenas considerando a luz como um jato discreto (descontínuo) de partículas seria possível explicar tais resultados. Então, a luz pode sofrer interferência e efeito fotoelétrico, não se limitando a um modelo, mas comportando-os ao mesmo tempo (KNIGHT, 2016; SERWAY; JEWETT, 2004).

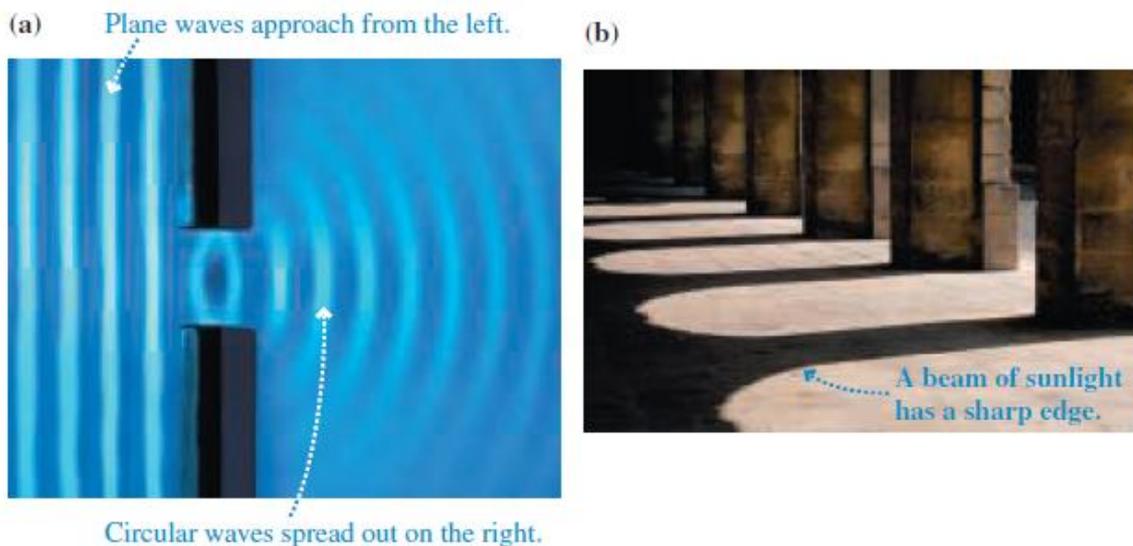


Figura 3: (a) difração de uma onda se propagando na água. (b) a luz não sofre difração ao passar pelos arcos. Os raios de luz estão bem definidos.
 Fonte: Knight (2016, p. 931)

2.2. Velocidade da Luz e Índice de Refração

Segundo Griffiths (2011, p. 227), as equações de Maxwell que sumarizam o comportamento de campos eletromagnéticos são dadas por

$$(i) \quad \nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon} \rho \qquad (iii) \quad \nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad , \qquad (1)$$

$$(ii) \quad \nabla \cdot B = 0 \qquad (iv) \quad \nabla \times B - \mu\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \mu J$$

onde B é o vetor indução magnética, E é o vetor campo elétrico, ε e μ são constantes que dependem do meio de propagação do campo elétrico e magnético, J é a densidade de correntes elétricas e ρ é a densidade de cargas elétricas e ∇ é um operador vetorial definido por $\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$ e pode atuar em uma função escalar como gradiente e em uma função vetorial como divergente, através do produto escalar, e como rotacional, através do produto vetorial.

Em um espaço livre, onde $\rho = J = 0$ as equações de Maxwell assumem a seguinte forma

$$(i) \quad \nabla \cdot E = 0 \qquad (iii) \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \qquad (2)$$

$$(ii) \quad \nabla \cdot B = 0 \qquad (iv) \quad \nabla \times B = \mu\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

Podemos separar as equações acima, encontrando uma que contenha apenas o vetor campo elétrico e outra que contenha apenas o vetor indução magnética. Para isso, devemos aplicar o rotacional na relação (iii):

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times E) &= \nabla \times \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right) \\ \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E &= -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) \\ \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E &= -\mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \end{aligned} \qquad (3)$$

Aplicando o rotacional na relação (iv):

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times B) &= \nabla \times \left(\mu\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \\ \nabla(\nabla \cdot B) - \nabla^2 B &= \mu\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times E) \\ \nabla(\nabla \cdot B) - \nabla^2 B &= \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \end{aligned} \qquad (4)$$

Como $\nabla \cdot E = \nabla \cdot B = 0$, (3) e (4) tornam-se

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \nabla^2 B = \mu\epsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (5)$$

As duas equações contidas em (5) são equações padrões do movimento de ondas e sugerem que as ondas eletromagnéticas se propagam com velocidade

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (6)$$

Substituindo os valores das constantes na equação (6), obtém-se o valor da velocidade da luz. Baseado neste resultado que Maxwell desenvolveu a sua teoria eletromagnética da luz.

De acordo com Born e Wolf (1980, p. 11), a luz, ao passar de um meio para outro, sofre uma mudança na sua direção de propagação e na sua velocidade. O índice de refração absoluto “n” de um meio é a razão da velocidade da luz no vácuo e da velocidade da luz no meio e é utilizado para medir o quão refringente um meio pode ser:

$$n = \frac{c}{v} \quad (7)$$

Se dois meios, 1 e 2, possuem índices de refração diferentes, a razão entre eles fornece o índice de refração relativo entre esses dois meios:

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (8)$$

Comparando (7) e (6), temos a formula de Maxwell:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (9)$$

2.3. Raios de Luz

Uma maneira conveniente de representar a propagação da luz é por meio de raios. Sendo a luz uma onda tridimensional, sua propagação a partir de uma fonte possui um formato esférico. Em situações de fronteira, distante da fonte, as frentes de onda assumem um formato próximo a um plano retilíneo. Por isso, neste tipo de situação, usa-se a representação por meio de raios perpendiculares aos planos. Segundo Hecht (2017, p. 107), a representação da luz em forma de raios vem da antiguidade. Um raio é definido como uma linha desenhada no espaço correspondente à direção do fluxo de radiação luminosa, como pode se observar na Figura 4.

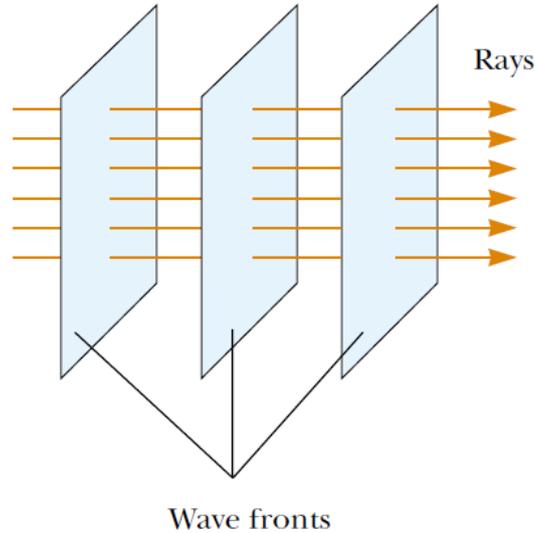


Figura 4: Raios de luz perpendiculares às frentes de onda
 Fonte: Serway e Jewett (2004, p. 1097)

2.4. Reflexão e Refração

Ainda de acordo com Born e Wolf (1980, p. 37), quando uma onda eletromagnética plana incide sobre a superfície entre dois meios distintos, ela se separa em duas ondas: uma que é transmitida ao longo do segundo meio e outra que é refletida de volta para o primeiro meio.

Suponha que uma onda plana se propaga em uma direção no espaço especificada pelo vetor unitário $\mathbf{s}^{(i)}$. Ao incidir sobre a superfície entre dois meios, ela é transmitida na direção com vetor unitário $\mathbf{s}^{(t)}$ no segundo meio e refletida na direção do vetor unitário $\mathbf{s}^{(r)}$. Na interface entre os dois meios, a variação do tempo dos campos secundários, de reflexão e transmissão, é igual à variação do tempo no campo primário de incidência. Equacionando os argumentos das funções de onda para um ponto \mathbf{r} , na interface entre os meios, $z = 0$, tem-se que:

$$t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(i)}}{v_1} = t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(r)}}{v_1} = t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(t)}}{v_2} \quad (6)$$

Sendo que v_1 e v_2 são as velocidades de propagação da onda nos dois meios. Já que $\mathbf{r} \equiv x, y, 0$ podemos reescrever (6) em termos das coordenadas “x” e “y” na interface entre os meios:

$$\frac{s_x^{(i)}}{v_1} = \frac{s_x^{(r)}}{v_1} = \frac{s_x^{(t)}}{v_2} \quad e \quad \frac{s_y^{(i)}}{v_1} = \frac{s_y^{(r)}}{v_1} = \frac{s_y^{(t)}}{v_2} \quad (7)$$

As relações acima demonstram que as ondas transmitida e refletida se encontram no mesmo plano da onda incidente, como pode ser observado na figura 5.

Tendo um plano xz como plano de incidência e adotando θ_i , θ_r e θ_t como os respectivos ângulos que $s^{(i)}$, $s^{(r)}$ e $s^{(t)}$ fazem com o plano z, temos que

$$\begin{aligned} s_x^{(i)} &= \sin \theta_i, & s_y^{(i)} &= 0, & s_z^{(i)} &= \sin \theta_i \\ s_x^{(r)} &= \sin \theta_r, & s_y^{(r)} &= 0, & s_z^{(r)} &= \sin \theta_r \\ s_x^{(t)} &= \sin \theta_t, & s_y^{(t)} &= 0, & s_z^{(t)} &= \sin \theta_t \end{aligned} \quad (8)$$

Utilizando as relações em x de (7) e substituindo em (8), temos que

$$\frac{\sin \theta_i}{v_1} = \frac{\sin \theta_r}{v_1} = \frac{\sin \theta_t}{v_2} \quad (9)$$

Uma vez que, observando a figura 5, $\sin \theta_r = \sin \theta_i$ e $\cos \theta_r = -\cos \theta_i$ temos que

$$\theta_r = \pi - \theta_i \quad (10)$$

Este resultado, juntamente com a relação (7), constituem a lei da reflexão.

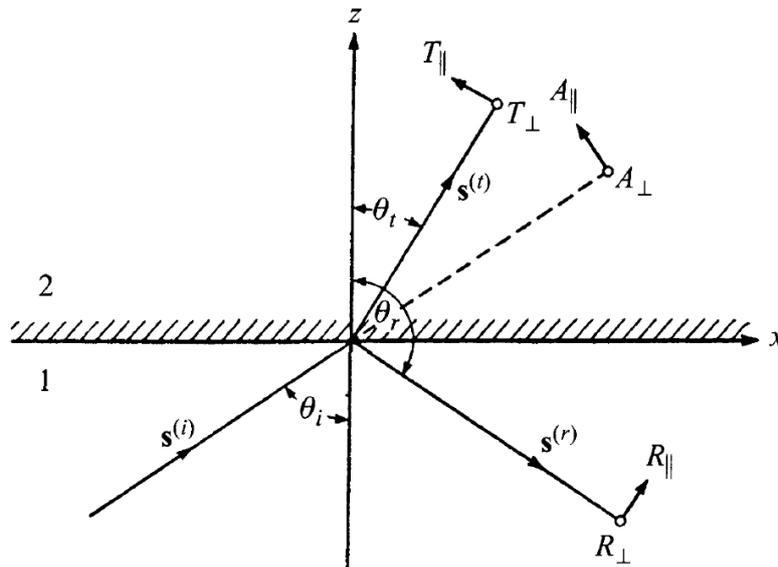


Figura 5: Refração e reflexão de uma onda plana.
Fonte: Born e Wolf (1980, p. 38)

Segundo Hecht (2017, p. 107), a lei da reflexão já era conhecida pelos gregos e pode ser deduzida ao observar a luz sendo refletida pela superfície de um espelho. Se a organização atômica de um material possui irregularidades menores do que o comprimento de onda de uma luz incidente no material, os raios de luz são refletidos com a mesma fase. Neste caso, a reflexão é especular

(Figura 6a). Por outro lado, se as irregularidades na superfície do material são da ordem do comprimento de onda da luz incidente, os raios de luz refletidos serão refletidos em todas as direções, causando a reflexão difusa (Figura 6b). Vale a pena ressaltar que a reflexão difusa e a especular são extremos, a reflexão da luz na maioria dos objetos é algo entre estes tipos de reflexão.

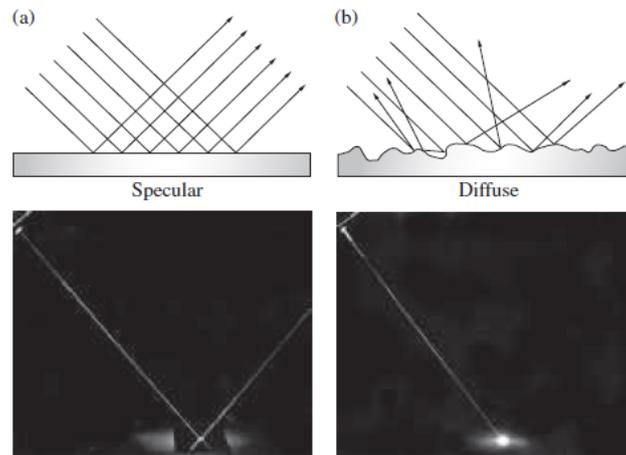


Figura 6: (a) reflexão especular e (b) reflexão difusa.
 Fonte: Hecht (2017, p. 108)

Suponha agora que uma onda plana se propagando em um meio “i” incida na interface entre os meios “i” e “t”, como é possível observar na Figura 7.

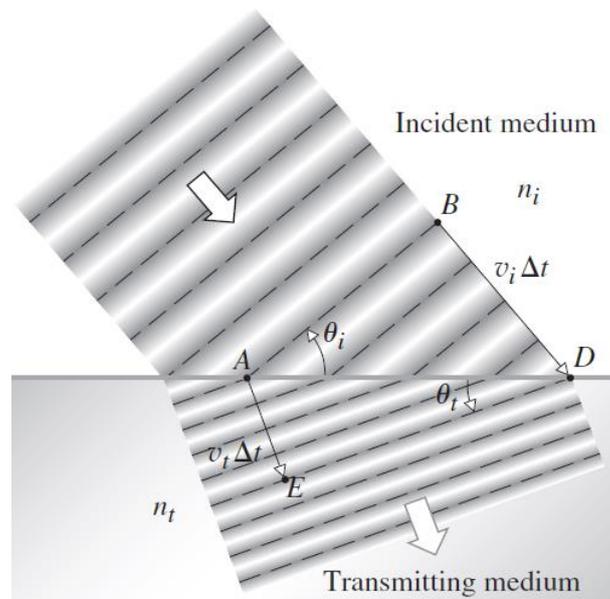


Figura 7: Esquema da refração de uma onda plana.
 Fonte: Hecht (2017, p. 108)

Sendo Δt o intervalo de tempo que uma extremidade da onda leva para ir do ponto B para o ponto D com velocidade v_i , a outra extremidade já se encontra no ponto E, onde possui velocidade v_t , os triângulos ABD e AED compartilham a mesma hipotenusa \overline{AD} . Tem-se, então

$$\sin \theta_i = \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} \text{ e } \sin \theta_t = \frac{\overline{AE}}{\overline{AD}} \quad (11)$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\overline{BD}} = \frac{\sin \theta_t}{\overline{AE}} \quad (12)$$

Mas $\overline{BD} = v_i \Delta t$ e $\overline{AE} = v_t \Delta t$, então

$$\frac{\sin \theta_i}{v_i} = \frac{\sin \theta_t}{v_t} \quad (13)$$

Multiplicando os dois lados da relação acima pela velocidade da luz “c”, podemos estabelecer uma relação entre os senos dos ângulos e os respectivos índices de refração dos dois meios:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (14)$$

A expressão (14), juntamente com (7), constituem a lei da refração. (14) é conhecida como lei de Snell-Descartes.

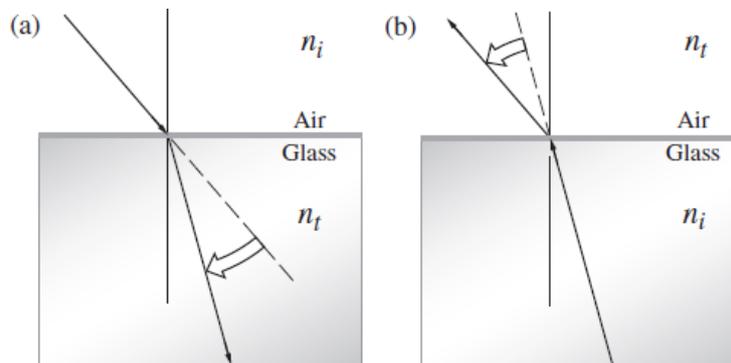


Figura 8: (a) meio i com índice de refração menor do que o meio t e (b) meio i com índice de refração maior do que o meio t.

Fonte: Hecht (2017, p. 110)

Quando $n_i < n_t$, o raio de luz refratado tem um ângulo, em relação a uma reta normal à interface entre os dois meios, menor do que o raio incidente. O oposto também acontece, quando $n_i > n_t$, o raio refratado possui um ângulo maior em relação à normal do que o raio incidente, como pode ser observado na Figura 8 (HECHT, 2017).

3.4.1. Reflexão Interna Total

Quando a luz passa para um meio com índice de refração menor do que o que contém os raios incidentes, o ângulo de refração é maior do que o ângulo de incidência. Se o ângulo de incidência for aumentando gradualmente, chegará um momento em que o ângulo de refração será de noventa graus e, para ângulos de incidência maiores, a luz não será mais transmitida para outro meio, sendo refletida totalmente.

De acordo com Knight (2016, p. 969), quando o ângulo de refração é de noventa graus, o ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico e pode ser deduzido a partir de (14), fazendo $\theta_t = 90^\circ$. O ângulo crítico é dado por

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_t}{n_i} \right) \quad (15)$$

A reflexão interna total possui diversas aplicações em tecnologia, desde binóculos até fibra óptica, que é utilizada em comunicações e na medicina (KNIGHT, 2016).

3.4.2. Dispersão da luz

De acordo com Serway e Jewett (2004, p. 1109), uma propriedade importante do índice de refração de um meio é que o seu valor varia de acordo com o comprimento de onda da luz. Quanto maior o comprimento de onda, menor o índice de refração; assim, por exemplo, uma luz de cor violeta sofre uma refração mais acentuada do que uma luz vermelha. Esse desvio da luz de acordo com a sua cor é conhecido como dispersão, pois um raio de luz branca se dispersa em todas as cores ao refratar. O fenômeno da dispersão da luz foi descrito por Newton e pode ser observado na natureza por meio de uma de suas manifestações mais poéticas: o arco-íris (Figura 9). Quando a luz solar incide em uma gotícula de água, ela dispersa e reflete internamente na gota, passando da água para o ar em uma segunda refração. Essa segunda refração é mais acentuada e separa mais os raios de cores diferentes, formando o arco-íris. Um modelo para explicar o arco-íris foi feito por René Descartes, que considerou a luz do sol adentrando uma gota esférica de água, sendo refratada duas vezes (HUGGINS, 1999).



Figura 9: *Arco-íris e sua reflexão em um lago.*
Fonte: Web⁹

3.4.3. Lentes Esféricas

Segundo Knight (2016, p. 972), uma lente é um objeto construído com material transparente que utiliza a refração da luz em superfícies curvas para formar uma imagem a partir de raios divergentes.

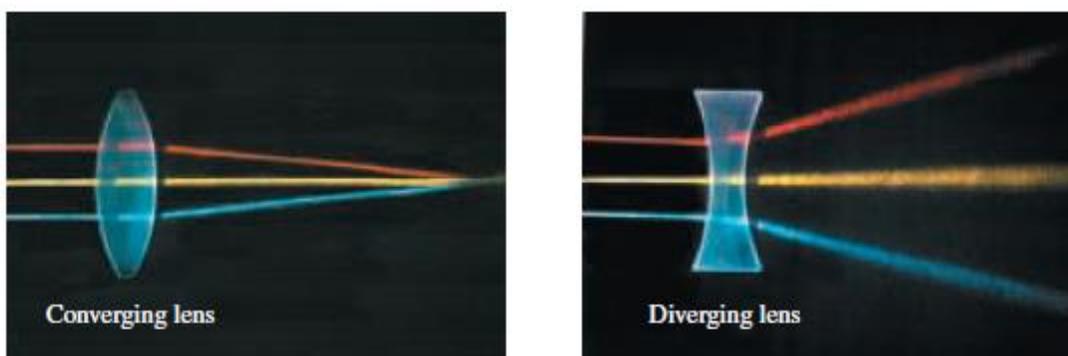


Figura 10: Dois tipos de lentes esféricas.
Fonte: Knight (2016)

Na figura 10, estão representados dois tipos de lentes muito comuns. Na lente da esquerda, chamada de lente convergente, os raios de luz paralelos se

⁹ Rainbow and Rainbow Reflection over a large lake. Disponível em: <<https://www.goodfreephotos.com/other-landscapes/rainbow-and-rainbow-reflection-over-a-large-lake.jpg.php>>. Acesso em: 27 jun. 2019.

encontram em um certo ponto após atravessarem a lente. Este ponto é conhecido como ponto focal e a distância entre o ponto focal e a lente é a distância focal. Na lente da direita, chamada de lente divergente, os raios de luz, inicialmente paralelos, afastam-se do eixo óptico da lente. O raio de luz que incide sobre o centro da lente não muda de direção ao refratar.

As lentes esféricas podem ser classificadas como lentes de bordas grossas e de bordas finas, como pode se observar na figura 11.

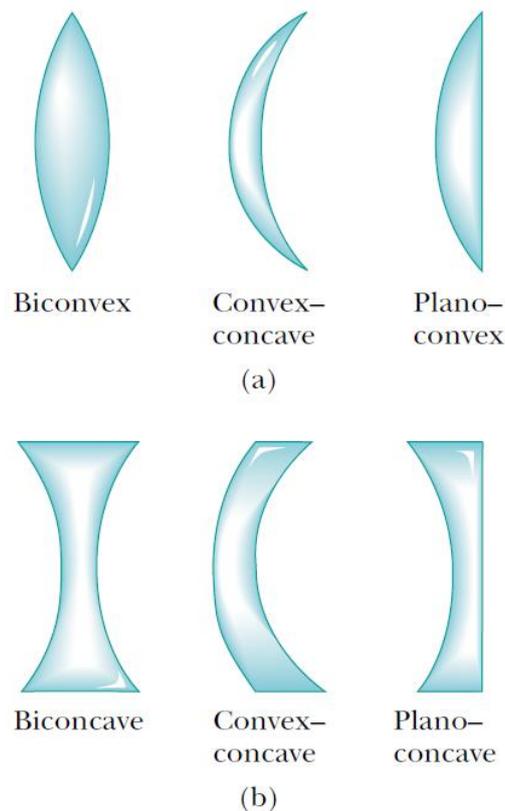


Figura 11: Tipos de lentes esféricas. Bordas finas (a), da esquerda para a direita: Biconvexa, côncavo-convexa e plano-convexa. Bordas grossas (b), da esquerda para a direita: Bicôncava, convexo-côncava e plano-côncava.

Fonte: Serway e Jewett (2004, p. 1145)

Tanto as lentes de bordas grossas como as de bordas finas podem ser convergentes ou divergentes. O que define a natureza da convergência ou divergência de tais lentes é o seu índice de refração em relação ao do meio em que está inserido. Se o índice de refração relativo entre lente e meio é maior do que 1, ou seja, se a lente possui maior índice de refração do que o meio, as lentes de bordas finas são convergentes e as de bordas grossas divergentes. No caso contrário, em que o índice de refração do meio é maior do que o da lente,

as lentes de bordas finas são divergentes e as de bordas grossas são convergentes.

Na prática, a maioria das lentes possui uma espessura muito pequena, quase desprezível, é por isso que, no estudo da formação de imagem em lentes esféricas, é comum considerar que as lentes são delgadas, ou seja, que possuem espessura desprezível. O estudo analítico das lentes delgadas é conhecido como óptica gaussiana.

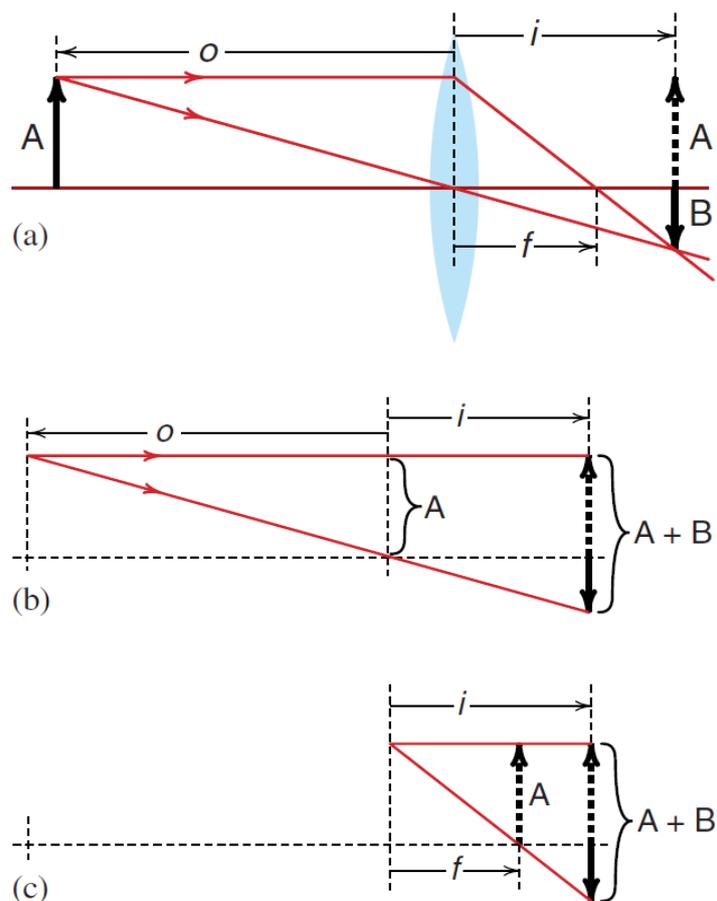


Figura 12: formação da imagem em uma lente delgada convergente.
 Fonte: Huggins (1999, p. 25)

A figura 12 mostra, esquematicamente, a formação da imagem em uma lente convergente, em que “o” é a distância do objeto de altura A até a lente, “i” é a distância entre a lente e a imagem de altura B e “f” é a distância focal da lente (figura 12a). Observando a figura 12b, é possível estabelecer uma relação de semelhança entre o triângulo de maior base (i+o) e altura (A+B) e outro de menor base (o) e menor altura (A):

$$\frac{A}{o} = \frac{A+B}{(o+i)} \rightarrow \frac{(A+B)}{A} + \frac{(o+i)}{o} \quad (16)$$

Na figura 12c, outro triângulo é formado, podendo também ser estabelecida uma relação de proporcionalidade entre os lados do maior e do menor triângulo:

$$\frac{A}{f} = \frac{A+B}{i} \rightarrow \frac{(A+B)}{A} + \frac{i}{f} \quad (17)$$

Combinando (16) e (17) e dividindo o resultado por i , temos que

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \quad (18)$$

A equação (18) é a equação das lentes delgadas, também conhecida como equação de Gauss (HUGGINS, 1999).

3.5. Espalhamento da luz

Segundo Hecht (2017, p. 96), os processos de transmissão, reflexão e refração da luz são apenas manifestações macroscópicas do espalhamento da luz que ocorre em um nível submicroscópico. O espalhamento da luz consiste na absorção e reemissão da luz por elétrons que se encontram nos átomos e moléculas que constituem os materiais.

Quando a luz viaja em um meio material, como o ar, as moléculas que o compõem se comportam como osciladores, as quais tem suas eletrosferas excitadas por fótons incidentes. As moléculas, então, absorvem o fóton e emitem imediatamente outro fóton com mesma frequência e comprimento de onda. Este processo é chamado de espalhamento elástico. Como as moléculas estão orientadas de maneira arbitrária, os fótons são espalhados em todas as direções (HECHT, 2017).

As amplitudes de vibração dos estados excitados e a amplitude da luz espalhada aumentam de acordo com a frequência, pois todas as moléculas possuem ressonâncias eletrônicas na faixa do ultravioleta. Quanto mais próxima a frequência de oscilação com a de ressonância, maior é a resposta do oscilador. Desta maneira, a luz violeta sofre mais espalhamento, seguida da luz azul, verde, amarela e assim por diante. Assim, um raio de luz que atravessa um gás deve apresentar uma luz majoritariamente vermelha no fim do espectro, enquanto a luz espalhada será na sua maioria azul, já que a luz solar não apresenta muita luz violeta em comparação com a azul (HECHT, 2017).

Capítulo 3

Metodologia

3.1. Estrutura do produto educacional

O produto educacional utilizado para o ensino de refração da luz nesta dissertação foi estruturado na forma de uma UEPS contendo cinco encontros e foi construído na forma de planos de aula (FERREIRA; FILHO, 2019). A seguir, cada encontro será detalhado, explicando-se as atividades desenvolvidas, seus objetivos e a avaliação criada para buscar a presença de subsunçores nas estruturas cognitivas dos estudantes, bem como indícios de aprendizagem significativa.

O primeiro encontro, constituído por duas aulas, tem como objetivo discutir a influência da luz e de seus fenômenos na concepção de obras de arte contemporâneas, assim como refletir, a partir das percepções dos estudantes, o papel do estudo dos efeitos da luz na produção artística contemporânea. A primeira aula inicia-se com a apresentação de duas imagens de uma obra do artista Rashad Alakbarov, que utiliza luz como meio de construção artística, expostas em uma galeria de arte em Londres (Figura 13). As imagens servem como organizadores prévios para o ensino da refração da luz, pois mostram, de maneira geral e inclusiva, duas situações em que a refração da luz é utilizada em contextos artísticos distintos.

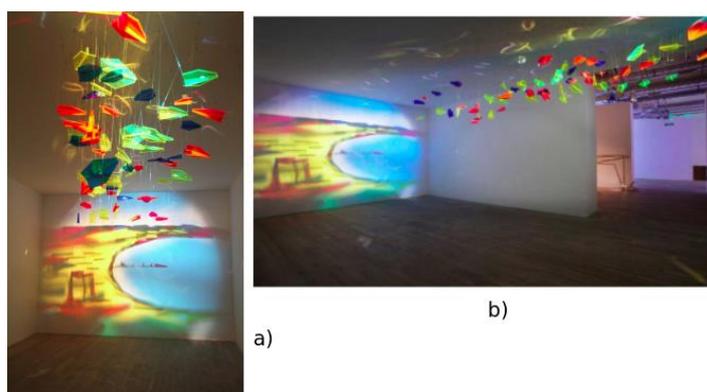


Figura 13: Obra de Rashad Alakbarov. a) vista de frente. b) vista lateral.
Fonte: Web¹⁰

¹⁰ Rashad Alakbarov's Paintings Live in the Shadows of the Objects That Created Them. Disponível em: <https://www.core77.com/posts/21613/Rashad-Alakbarovs-Paintings-Live-in-the-Shadows-of-the-Objects-That-Created-Them>. Acesso em: 25 jan. 2019.

Após observarem as imagens, os estudantes devem se reunir em grupos colaborativos e elaborar, em um prazo de vinte minutos, um descritivo da obra a qual foram expostos, informando os materiais necessários, procedimentos de montagem e desenhando um esquema de formação da imagem. Esta primeira situação-problema inserida pelo professor tem como objetivo investigar a presença de alguns subsunçores na estrutura cognitivas dos estudantes: (I) desvio da luz; (II) princípio da propagação retilínea da luz; (III) interferência do meio material na propagação da luz; (IV) ordem “fonte-objeto-anteparo” na formação de uma imagem; (V) fontes de luz.

Se o descritivo contiver qualquer representação, gráfica ou escrita, da mudança na direção de propagação de raios de luz ao atravessar um objeto, possivelmente os subsunçores (I) e (III) integram a estrutura cognitiva dos estudantes. Indícios da presença do subsunçor (II) podem ser percebidos se houver algum tipo de representação de raios de luz se propagando em trajetória retilínea bem definida, contendo direção e sentido da propagação. Caso o esquema de montagem contenha uma disposição da fonte de luz, objeto e anteparo na representação da formação da pintura, então o subsunçor (IV) é facilmente identificado. Em relação a disposição anteriormente citada, são dois os casos esperados – (a) a ordem é correta e apresenta todos os elementos e (b) a ordem é correta, porém, apenas fonte e objeto são representados. No caso de (b), uma retomada da formação de uma imagem real é necessária no decorrer das próximas aulas. Da mesma maneira, se houver presença de qualquer tipo de fonte de luz primária, lâmpada ou fogo por exemplo, no esquema de formação da imagem, existem fortes indícios de que o subsunçor (V) faz parte da estrutura cognitiva dos estudantes.

Em seguida à entrega dos descritivos ao professor, será apresentada uma nova imagem aos estudantes, fotografias feitas pela fotógrafa Suzanne Saroff, que utiliza copos de água em sua série “Perspectiva”, para criar efeitos de fragmentação de imagens, como pode ser observado na Figura 14. Após breve observação da fotografia, os estudantes, ainda reunidos em grupos colaborativos, são encarregados de responder alguns questionamentos feitos pelo professor, acerca da formação da imagem capturada pela fotógrafa: “O que faz com que a imagem fique distorcida desta forma?”; “Por que as imagens nos copos possuem tamanhos diferentes?”; “Por que, ao passar pela água, a luz se

comporta de maneira diferente?"; "Quais são os meios de propagação da luz presentes nesta imagem?"; "O que a água e o ar, por exemplo, têm de diferentes como meios de propagação da luz?".



Figura 14: Fotografia de Suzanne Saroff.
Fonte: Website da fotógrafa¹¹

Essa atividade tem como objetivo verificar a existência de conexão entre os subsunçores da primeira atividade na estrutura cognitiva. Nas respostas das perguntas "O que faz com que a imagem fique distorcida desta forma?", "Por que as imagens nos copos possuem tamanhos diferentes?" e "Por que, ao passar pela água, a luz se comporta de maneira diferente?", espera-se notar a percepção do desvio da luz como consequência da mudança de meio material, a partir das falas dos estudantes durante a mediação. Espera-se também, a partir das respostas da questão "O que a água e o ar, por exemplo, têm de diferentes como meios de propagação da luz?", a inconexão da velocidade da luz como propriedade distinguível entre os meios; provavelmente a maioria das respostas oscilará em torno da densidade ou estrutura química dos meios materiais. A pergunta "Quais são os meios de propagação da luz presentes nesta imagem?" tem como objetivo expor a clareza com que os meios são identificados a partir de uma imagem. Espera-se que a maioria dos estudantes responda que os únicos meios existentes são o ar e a água, desprezando os recipientes de vidro que contém a água como dispositivos capazes de causar desvio nos raios de luz.

¹¹ Suzanne Saroff – Disponível em: <<https://www.hisuzanne.com/>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

Em sequência, o professor pedirá que, em uma folha separada, cada grupo represente graficamente como a luz se propaga na situação da fotografia. Para facilitar o desenvolvimento dessa atividade, será desenhado esquema da situação e solicitado aos estudantes que nele representem os raios de luz ao passar do ar para a água e ao retornar para o ar, como mostra a Figura 15, a seguir.

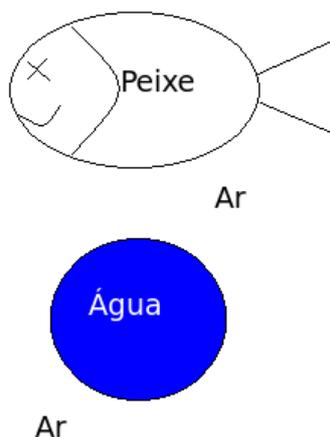


Figura 15: Sugestão de esquema da situação da fotografia.
Fonte: Elaborado pelo Autor

Espera-se que nesta atividade os estudantes realizem dois tipos de representação dos raios de luz:

1. Os raios de luz emergem do peixe e passam do ar para a água sem desvio, ocorrendo apenas na mudança da água para o ar;
2. Os raios de luz emergem do peixe passam do ar para a água e, novamente, da água para ar apresentando desvio nas duas mudanças de meio de material.

No caso de 1, infere-se que a interação da nova informação, proveniente da mediação ocorrida nos questionamentos do professor na atividade anterior e da apresentação da Figura 15, com os subsunçores criou significados na estrutura cognitiva preexistente dos estudantes, porém, ainda são necessárias novas experiências e confronto de ideais para que ocorra a ressignificação do fenômeno da refração da luz. No caso de 2, pode-se inferir que ocorreu a reconciliação integrativa dos subsunçores referentes ao desvio da luz e aos meios materiais, que se recombinaram, causando a compreensão do fenômeno da refração da luz. Ao final da aula, todas as atividades devem ser entregues ao professor.

Na segunda aula do primeiro encontro, é feita uma retomada da situação-problema da primeira aula, com a apresentação do vídeo¹² de uma experiência em que são colocadas duas setas, grafadas em um pequeno pedaço de papel e em frente a um copo, que é então preenchido com água, a partir do que é possível observar a mudança de orientação das setas quando a luz passa pela água. Nesse momento, o professor terá oportunidade de investigar com os alunos hipóteses e discutir como ocorre o desvio dos raios de luz na situação do vídeo, já que, para compor imagens como as das figuras exibidas na primeira aula, o artista se aproveita do fenômeno da refração da luz, algo que acontece também no vídeo.

Em seguida, os estudantes, baseando-se no que foi discutido, devem representar o desvio dos raios de luz nas situações das obras de arte. Esta atividade serve para verificar se houve diferenciação progressiva na forma de representação da refração da luz. Espera-se que, após a discussão do vídeo, ocorra a interação entre as novas informações e os subsunçores, já modificados previamente pelas primeiras discussões. Desta maneira, os estudantes devem representar corretamente o desvio dos raios de luz na mudança de meio de propagação da luz. Um indicador da diferenciação progressiva nesse caso é a comparação entre a produção nesta atividade e na última atividade da primeira aula. Espera-se que haja uma diferença notável entre as duas representações, uma vez que os estudantes são confrontados com novas informações, ancoradas no que foi feito na aula anterior dedicada à formulação de novos significados.

Encerrando a aula, o professor discutirá sobre as causas do desvio sofrido pela luz ao trocar de meio, mostrando o que é a grandeza física chamada o índice de refração absoluto e sua relação com a velocidade da luz em diferentes meios. Mostrará que, ao passar de um meio menos refringente para um mais refringente, um raio de luz se aproxima da reta normal, pois a velocidade de propagação no meio mais refringente é menor. Mostrará como é feito o cálculo do índice de refração relativo entre dois meios diferentes e efetuará o cálculo do índice de refração relativo entre o ar e a água. Após esta discussão, será solicitado aos alunos que levantem hipóteses sobre de que material seria

¹² Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=W0VvsM2vawU>> Acesso em 30 Jun. 2019.

composta a montagem presente na Figura 13, sabendo que a velocidade da luz no material é correspondente a $2,01 \times 10^8$ m/s e tendo a disposição uma tabela contendo alguns meios materiais e seus respectivos índices de refração. Nessa última atividade, ocorre a conclusão da primeira situação-problema da UEPS, com a identificação do material das peças utilizadas na pintura do artista Rashad Alakbarov. Espera-se que os estudantes concluam que o material é acrílico, com índice de refração igual a 1,49.

Ao final da segunda aula, os estudantes deverão produzir em casa um mapa mental online no site www.popplet.com contendo palavras que possuam alguma relação com o que foi observado no decorrer das atividades e mediado pelo professor em sala de aula. Esse mapa mental deve ser enviado até o fim do dia. Espera-se que os estudantes conectem conceitos-chave acerca da refração da luz, como meio material, desvio da luz, índice de refração, entre outros. Pode-se ter uma noção da estrutura cognitiva dos estudantes ao fim do primeiro encontro. Quanto maior é o número de ligações entre diferentes conceitos, melhor é o entendimento do estudante acerca das relações entre esses conceitos e, conseqüentemente, mais significativa é a sua aprendizagem.

O segundo encontro, que possui duas aulas, tem como objetivo discutir a física presente no *mobile game* “Glass”, com base nas observações feitas por estudantes ao jogá-lo e discutir a influência das leis da refração no desaparecimento de um peixe em um aquário esférico. Este é o primeiro encontro em que o *game* é introduzido aos estudantes e utilizado nas atividades solicitadas pelo professor.

Na primeira aula, os estudantes são organizados em grupos colaborativos, de tal maneira que todos tenham acesso ao *game*. Cada grupo é, então, encarregado de resolver uma etapa do *game*, sendo que nas etapas é possível observar diversos conceitos relacionados à óptica geométrica. As etapas do *game* assumem papel de organizador prévio, pois apresentam, de maneira geral e inclusiva, aspectos acerca da refração da luz que serão discutidos nos próximos encontros. Enquanto jogam o *game*, os estudantes devem identificar todos os objetos utilizados para mudar a trajetória da luz e formular teorias para explicar o seu funcionamento. Também é solicitado que mostrem quais conceitos da óptica geométrica são utilizados para compreender os fenômenos observados dentro do *game* e se existe algum equívoco na física

presente nele. Após a resolução das etapas do *game*, os estudantes devem apresentar ao professor suas observações. Esta atividade tem como objetivo identificar, na estrutura cognitiva prévia dos estudantes, evidências da presença de subsunçores que serão utilizados como ancoragem para o ensino das leis da refração. Desta maneira, espera-se que, em suas falas, os estudantes utilizem expressões verbais com linguagem mais técnica para explicar a refração da luz do que a observada no primeiro encontro. Procura-se investigar a presença dos seguintes subsunçores: (I) interfaces entre meios materiais; (II) lentes esféricas; e (III) refração da luz. A seguir, estão listados alguns indicadores de presença dos subsunçores na fala dos estudantes:

- (I) e (III) – Se os estudantes expressam que a luz desvia, ou refrata, ao passar de um meio para outro. Espera-se que este subsunçor esteja presente na estrutura cognitiva dos estudantes, devido ao que foi discutido e mediado no primeiro encontro.

- (II) – Se um dos dispositivos que é utilizado para alterar a trajetória da luz é identificado como lente. Espera-se que os estudantes não façam distinção entre lentes convergentes e divergentes.

Dando sequência na aula, é feita uma discussão acerca das leis da refração com os estudantes, retomando uma etapa do *game* como exemplo, identificando a reta normal, o raio incidente, refletido e seus respectivos ângulos. Após esta discussão, os estudantes devem descobrir, a partir da projeção multimídia da etapa “Divergence_1”, figura 16, qual seria o material que compõe um dos meios observados no *game* (dado um conjunto conhecido de materiais discriminados por seus índices de refração), quando o raio de luz verde emerge da lente divergente, assumindo que o ângulo de incidência é de 60 graus e o de refração é de 30 graus, e por que o raio de luz vermelho não sofre desvio ao emergir da lente, encerrando assim, a primeira aula do segundo encontro.

Nessa atividade, é esperado que os estudantes descubram que o meio material é o ar, com índice de refração aproximadamente igual a 1. Caso isto ocorra, infere-se que a ancoragem da nova informação nos subsunçores causou a diferenciação progressiva na compreensão do fenômeno da refração da luz. Espera-se que alguns estudantes tenham dificuldade em realizar a atividade por causa da expressão matemática que deve ser utilizada e, provavelmente, não descubram que o meio material é o ar. Neste caso, a nova informação interagiu

com os subsunçores, porém, ainda são necessárias mais discussões acerca do tema em diferentes contextos para que ocorra a ressignificação da lei de Snell-Descartes. Também se espera que a maioria dos estudantes perceba que o raio vermelho não sofre desvio ao emergir da lente por ser perpendicular à superfície.

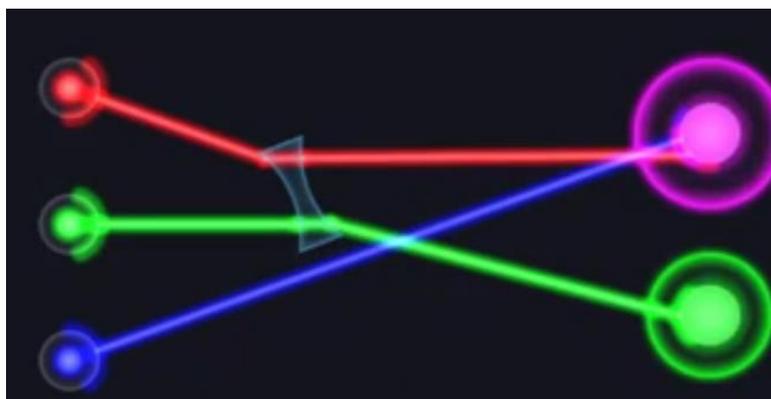


Figura 16: Etapa Divergence_1 do mobile game Glass.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na segunda aula, a situação-problema 2 é proposta aos estudantes, em nível mais alto de complexidade, levando-se em conta que a aprendizagem significativa é progressiva. Um vídeo¹³ sobre reflexão interna total (LOPES, 2014) é exibido aos estudantes. O vídeo mostra um peixe se movendo dentro de um aquário esférico, quando se aproxima das laterais do aquário desaparece e volta a aparecer quando se move em direção ao centro. Os estudantes, organizados em trios, devem representar graficamente como a luz se propaga na situação do vídeo. Espera-se que a maioria dos estudantes represente raios de luz que não atingem os olhos do observador. Espera-se também que não consigam representar devidamente que uma parcela dos raios é refletida, pois ainda não assimilaram a informação acerca do fenômeno da reflexão total da luz. Entretanto, espera-se que os raios de luz sejam representados com trajetórias retilíneas e que sofram desvio ao passar da água para o ar, evidenciando que as discussões do primeiro encontro ainda estão presentes em sua estrutura cognitiva.

É realizada, então, uma discussão sobre o fenômeno da reflexão total da luz, retomando a etapa divergence_2 do *game*, na qual o fenômeno da

¹³ Disponível em: <http://youtu.be/FO5v_tQANZE> Acesso em 30 Jun. 2019.

reflexão total em uma lente divergente é observado. As condições necessárias para que a reflexão total da luz aconteça e como é feita a determinação do ângulo crítico são debatidas entre o professor e os estudantes, que devem, após a discussão, representar novamente os raios de luz na situação observada no vídeo da atividade anterior. Esta atividade tem como objetivo verificar se houve diferenciação progressiva do fenômeno da reflexão total da luz. Espera-se que após a discussão da etapa do *game* ocorra a interação entre as novas informações e os subsunçores. Assim, os estudantes devem representar uma parcela dos raios de luz refletindo totalmente dentro do aquário. Espera-se que haja uma diferença notável entre as duas representações, os estudantes são confrontados com novas informações, ancoradas no que foi feito na atividade anterior para a formulação de novos significados.

A seguir, será apresentado um vídeo¹⁴ do canal “engineerguy”, que mostra o funcionamento de cabos de fibra óptica. Com base no vídeo, deve ser feita uma breve discussão sobre alguns usos da fibra óptica e os estudantes devem descobrir que materiais podem ser utilizados nas camadas externas e internas para fabricar uma fibra óptica com o menor ângulo crítico, tendo como base uma tabela com alguns meios materiais e seus respectivos índices de refração. Conforme os estudantes concluem que materiais deverão ser utilizados para resolver o problema, o professor os questionará sobre a possibilidade real de criar uma fibra óptica com os materiais fornecidos. Espera-se que os estudantes concluam que a fibra óptica que produz o menor ângulo crítico é composta com diamante na camada externa e glicerina na camada interna.

O terceiro encontro, de duas aulas, tem como objetivo refletir acerca da influência da refração da luz no processo de formação de arco-íris e discutir a relação dos fenômenos luminosos com a coloração do céu. Neste encontro se propõe a seguinte situação-problema: “Por que o céu é azul durante a maior parte do dia e vermelho quando o sol está se pondo?”.

A primeira aula começa com a resolução de uma etapa do *game* “Glass” pelos estudantes, integrante do mundo “Dispersion”, em que é possível utilizar um prisma para dispersar um raio de luz branca. Os estudantes devem identificar o dispositivo utilizado para separar os raios de luz, formulando teorias para

¹⁴ Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0MwMkBet_5I> Acesso em: 30 Jun. 2019

explicar o funcionamento deste dispositivo. Esta atividade tem como objetivo introduzir o conceito de prisma, dispersão da luz e luz monocromática e policromática. Espera-se que os estudantes identifiquem que os raios de luz são separados em raios de cores diferentes ao atravessar pelo prisma, introduzindo a noção de dispersão da luz. Nas explicações contendo estes elementos, infere-se que os subsunçores necessários para o ensino da dispersão da luz estão presentes na estrutura cognitiva dos estudantes.

Em sequência, é feita uma discussão acerca do fenômeno da dispersão da luz, comentando sobre a relação entre o desvio sofrido por cores distintas e sua respectiva velocidade de propagação e raios de luz monocromáticos. Ao fim da discussão, o professor realizará uma adaptação da demonstração sugerida em AXT (1990). Nessa demonstração, um espelho côncavo é imerso em uma bacia com água e, com a lanterna de um celular localizado fora da água, ilumina-se o espelho submerso. Por causa da dupla refração, ar-água e água-ar, é possível observar a dispersão da luz da lanterna projetada no teto da sala de aula, que deve estar com as luzes desligadas para melhor visualização.

Durante a demonstração, os estudantes devem responder os seguintes questionamentos: (1) “Por que o fenômeno observado apenas acontece quando o espelho está imerso na água?” (2) “Qual é o tipo de raio de luz proveniente da lanterna do celular?”. Espera-se que os estudantes percebam que a dispersão da luz acontece apenas quando há refração da luz, isto é, espera-se que, como resposta da questão (1), a maioria dos estudantes respondam que é devido à refração da luz na água. Também é esperado que na questão (2), os estudantes identifiquem que a luz é policromática, semelhante à luz do sol, pois ela se dispersa ao refratar. Em ambas respostas esperadas pode-se inferir que a estrutura cognitiva dos estudantes, previamente modificada por causa da resolução da etapa do *game* e da discussão, interagiu com as novas informações, causando a diferenciação progressiva do conceito de dispersão da luz.

Além de responder as questões, os estudantes devem representar graficamente os raios de luz na situação da demonstração. Espera-se que as representações sejam apresentadas, em sua maioria, de três maneiras diferentes:

- Caso 1: Os raios de luz provenientes da lanterna se dispersam na primeira refração, ar-água, refletem no espelho e aumentam o espaçamento entre si na segunda refração, água-ar. Neste caso, pode-se inferir que ocorreu a reconciliação integrativa dos subsunçores referentes a luz monocromática e a refração da luz, que se recombina, causando a compreensão do fenômeno da dispersão da luz.
- Caso 2: Os raios de luz provenientes da lanterna se dispersam apenas na primeira ou na segunda refração. Neste caso, infere-se que a interação da nova informação com os subsunçores criou significados na estrutura cognitiva preexistente dos estudantes, porém, ainda são necessárias novas experiências e confronto de ideias para que ocorra a resignificação do fenômeno da dispersão da luz.
- Caso 3: Os raios de luz não dispersam nas refrações, mas ao refletirem no espelho. Neste caso, o estudante não reconfigurou sua estrutura cognitiva preexistente em qualquer das atividades anteriores. São necessárias novas discussões a respeito da dispersão da luz.

Na segunda aula, é feita uma retomada da discussão da primeira aula, com a inclusão de informações acerca da formação de arco-íris. Espera-se que os estudantes representem corretamente a dispersão dos raios de luz na gota de água, compreendendo como é formado o arco-íris. Os estudantes, após a discussão, devem representar graficamente a dispersão dos raios de luz em uma gota de água. Na sequência, o professor pergunta: “Por que o céu é azul?”, atentando para as respostas dos estudantes. Espera-se que, nesta atividade inicial, os estudantes apresentem muitas noções equivocadas a respeito da coloração do céu durante o dia, provavelmente apoiadas no senso comum. Esta atividade tem como objetivo verificar se os estudantes possuem alguma explicação prévia, mesmo que equivocada, para a coloração azul do céu em sua estrutura cognitiva.

Em sequência a essa mediação inicial, será realizado o experimento descrito em Ortiz et al. (2010). Nesse experimento, uma lanterna é posicionada em frente a um recipiente transparente contendo uma solução de água com algumas gotas de leite e acionada. Pode-se observar que a luz, ao atravessar o recipiente, possui uma cor azulada. Se um anteparo for colocado atrás do recipiente, uma luz mais avermelhada pode ser observada. Caso o professor não

tenha os recursos necessários para a realização do experimento, poderá mostrar um vídeo¹⁵, em que um experimento semelhante é realizado. Apoiando-se na realização do experimento, é feita uma discussão sobre o fenômeno do espalhamento da luz. Após a discussão, o professor retoma a pergunta lançada no começo da aula, com um detalhe complementar: além da coloração do céu em um dia sem nuvens, os estudantes devem explicar por que o céu assume uma coloração avermelhada no nascer e pôr do sol. Essa atividade tem como objetivo investigar se as discussões causaram a assimilação do fenômeno do espalhamento da luz. Espera-se que os estudantes consigam explicar a coloração do céu nas duas situações propostas, tendo em vista que a nova informação, apresentada na realização do experimento, interaja com a estrutura cognitiva dos estudantes, apoiando-se no conhecimento prévio dos fenômenos luminosos, alterando-o.

O quarto encontro, penúltimo da UEPS, tem como objetivo refletir acerca do uso de lentes esféricas na correção de problemas da visão e é composto por três aulas.

A primeira aula se inicia com o professor mostrando aos estudantes, por meio de projeção multimídia, duas etapas do *game Glass*, figura 17, em que é possível observar uma lente do tipo divergente e outra do tipo convergente. Durante a projeção, é solicitado aos estudantes que diferenciem o desvio sofrido pelos raios de luz ao passar em uma lente convergente e em outra divergente. Espera-se que nesta atividade os estudantes consigam diferenciar uma lente convergente de uma divergente a partir do padrão de refração de luz criado por ambas. Entretanto, não se espera que a linguagem técnico-científica seja utilizada pelos estudantes, uma vez que estes assuntos ainda não foram discutidos.

Após essa mediação introdutória, e considerando que aprendizagem é progressiva, o professor discutirá sobre os tipos de lentes esféricas que existem, as condições para que uma lente seja considerada convergente ou divergente e os elementos geométricos que formam uma lente esférica. Em seguida à discussão, o professor solicitará que os estudantes, organizados em grupos colaborativos, identifiquem, no âmbito do *game*, se é a lente esférica ou o meio

¹⁵ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=sDcWsx00O48>> Acesso em: 30 Jun. 2019.

que possui o maior índice de refração. Essa atividade serve para determinar se houve interação entre a nova informação a que os estudantes foram expostos e suas estruturas cognitivas. Espera-se que a maioria dos estudantes afirme que a lente esférica no *game* possui maior índice de refração que o meio. Caso isto não aconteça, serão necessárias discussões complementares acerca desse assunto.

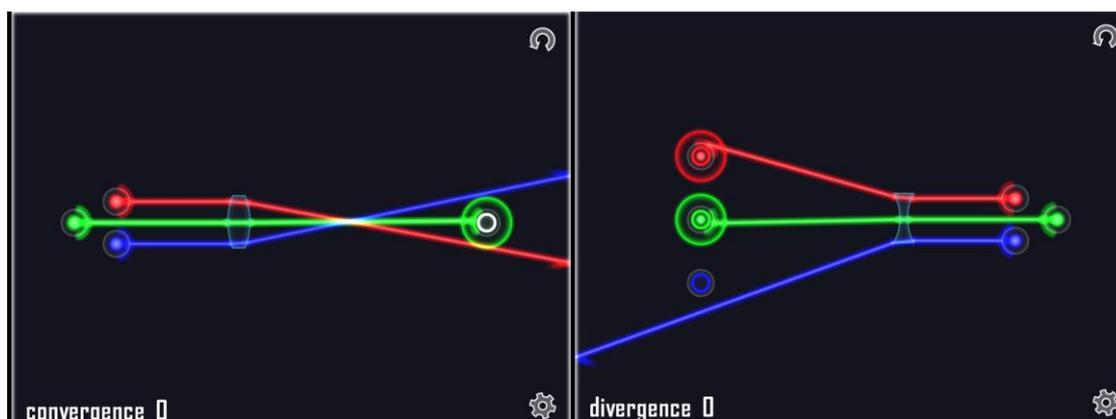


Figura 17: Etapas Convergence_0 e Divergence_0
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na segunda aula, o professor retomará os assuntos discutidos na primeira aula. Considerando a diferenciação progressiva, o aplicativo de smartphone “Ray Optics” será utilizado para discutir o processo de formação de imagem em lentes esféricas, destacando os aspectos geométricos da formação da imagem. Em sequência a essa discussão inicial, o professor mostrará, por meio de projeção multimídia, um objeto localizado em frente a uma lente divergente, figura 18, e solicitará que os estudantes determinem as características da imagem formada nesta situação. O intuito da atividade é buscar evidências da diferenciação progressiva. Aqui, em uma situação ideal, espera-se que a maioria dos estudantes consiga representar corretamente a imagem formada pela lente divergente. Entretanto, caso a maioria não consiga, o professor poderá, logo após a atividade, realizar uma nova discussão sobre a formação das imagens em lentes esféricas. Após a realização da atividade, o professor discutirá brevemente a determinação das características da imagem de maneira analítica, por meio da equação de Gauss.

O professor iniciará a terceira aula mostrando um vídeo¹⁶, que tem papel de organizador prévio, pois, de maneira geral e inclusiva, introduz os estudantes à anatomia do olho humano, que servirá de subsunçor (partes que integram o olho) para a ancoragem dos defeitos da visão. Em sequência ao vídeo, o professor discutirá com os estudantes como o cristalino do olho humano pode ser interpretado como uma lente convergente e como a imagem é formada na retina.

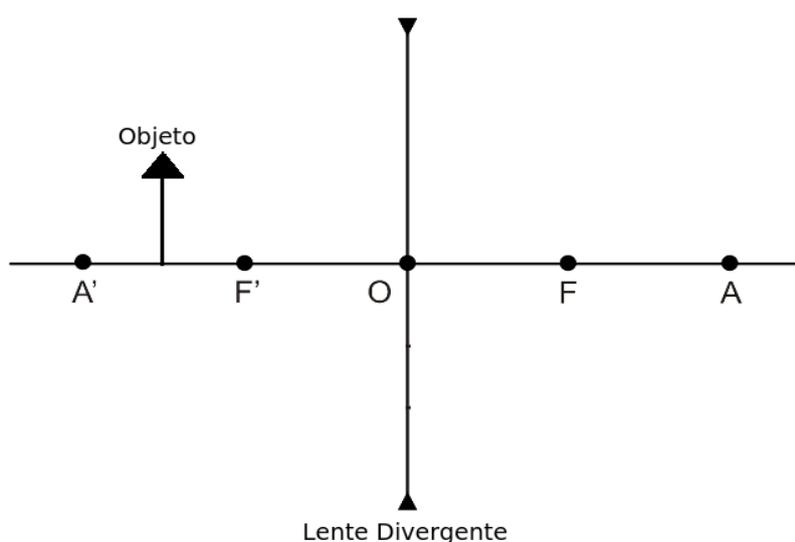


Figura 18: Objeto em frente a uma lente divergente.
Fonte: Elaborado pelo autor

Com o intuito de diversificar a discussão anterior, um vídeo¹⁷ será reproduzido para os estudantes. O vídeo explica de maneira visual e simples como a imagem é formada na retina e quais são os defeitos da visão. Após as discussões iniciais provocadas pelos vídeos, o professor mostrará, por meio de projeção multimídia, um esquema de formação de imagem em um olho humano com miopia e um outro com hipermetropia. Será solicitado, então, que os estudantes formulem teorias para explicar qual tipo de lente que seria mais adequado para corrigir cada tipo de defeito da visão, representando os raios de luz em cada caso. Espera-se que a maioria dos estudantes consigam perceber que as lentes divergentes são apropriadas para corrigir a miopia e as convergentes para a hipermetropia. Caso o que é esperado não aconteça, o professor retomará a discussão sobre lentes esféricas e defeitos da visão.

¹⁶ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=PFtVO-A7M5E>> Acesso em: 30 Jun. 2019.

¹⁷ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=6YxffFmi4Eo>> Acesso em: 30 Jun. 2019.

O quinto encontro da UEPS tem como objetivo avaliar, de maneira global, a sua eficácia. Esse é o encontro final da UEPS e tem como foco central uma avaliação dos encontros, por meio de perguntas direcionadas aos alunos que devem ser respondidas individualmente e de maneira discursiva. Sugere-se que sejam feitos para os estudantes os seguintes questionamentos:

- Questão 1: Por que, ao observar o fundo de uma piscina quando estamos na sua beirada, ela parece ser mais rasa do que realmente é?
- Questão 2: Por que um peixe em um aquário esférico desaparece quando se aproxima das laterais do aquário?
- Questão 3: Explique, com as suas palavras, como funciona uma fibra óptica.
- Questão 4: Por que as nuvens são brancas?
- Questão 5: Por que a água concentrada em grandes quantidades, nos oceanos por exemplo, apresenta uma cor azul?
- Questão 6: Qual é a lente que deve ser utilizada por uma pessoa que não consegue ver o seu amigo que se encontra do outro lado de uma rua?

A questão 1 tem como função identificar se, após a aplicação da UEPS, os estudantes aprenderam significativamente o fenômeno da refração da luz. Já as questões 2 e 3 têm como função buscar indícios da aprendizagem significativa sobre o fenômeno da reflexão total da luz e uma de suas principais aplicações tecnológicas. As questões 4 e 5 tentam encontrar indícios da aprendizagem significativa do fenômeno da dispersão da luz. Por fim, a questão 6 tem como função identificar indícios de aprendizagem significativa sobre lentes esféricas e suas aplicações na correção de problemas da visão.

3.2. Aplicação do produto educacional

O produto educacional foi aplicado no período de agosto a outubro de 2018 em uma escola privada do Distrito Federal, localizada na Região Administrativa de Ceilândia, que possui um perfil socioeconômico vulnerável quando comparada com outras regiões administrativas, fazendo com que parte dos estudantes sejam bolsistas e que as turmas, em geral, apresentem um perfil socioeconômico diversificado. A escola apresenta uma infraestrutura boa quando comparada com outras escolas privadas da região; todas as salas possuem quadro branco e *Datashow* com entradas HDMI, além de dispor de um espaço para um laboratório de ciências, porém, sem materiais ou kits experimentais. O autor desta dissertação atuava na escola como professor de

Física nas turmas do Ensino Médio e 9º ano do Ensino Fundamental II do período matutino na época da aplicação do produto educacional desenvolvido.

A UEPS foi aplicada em duas turmas do 2º ano do Ensino Médio, com um total de setenta e seis estudantes matriculados e com uma média de sessenta e quatro que frequentavam regularmente as aulas. No geral, os estudantes foram participativos e compreensivos durante as aulas de aplicação do produto, contribuindo para a legitimidade dos dados coletados.

Antes de começar a aplicação do produto, os estudantes foram esclarecidos a respeito da natureza da atividade, bem como das atividades propostas; além disso, foram orientados instalar o *game Glass* em seus *smartphones* e a se organizarem em grupos colaborativos diversas vezes no decorrer das aulas. Como as aulas na escola possuem duração de apenas quarenta minutos, o professor pediu a colaboração dos estudantes para uma boa execução do que havia sido planejado. Não houve qualquer tipo de prêmio ou punição aos alunos que decidiram participar ou não participar desta pesquisa.



Figura 19: Atividade do descritivo da obra de Rashad Alakbarov.
Fonte: Elaborado pelo Autor

A primeira aula do primeiro encontro foi no mesmo dia para as duas turmas, no dia vinte e dois de agosto de 2018, com sessenta estudantes presentes. Nas duas turmas, os estudantes aparentavam estar descansados e animados com a perspectiva de aulas diferentes, que se distanciariam do ensino tradicional da escola. Quando expostos à obra de Rashad Alakbarov, alguns estudantes apresentavam semblantes de surpresa e curiosidade, o que sugere que nunca tinham tido contado com a obra do artista. Houve certa dificuldade de compreensão quando o professor solicitou que elaborassem um descritivo da obra, pois a maioria não sabia o que significava. Assim sendo, o comando da

atividade foi explicado para os estudantes – eles deveriam fazer um manual com instruções sobre como realizar uma obra daquele tipo. Para auxiliar na execução da tarefa, o professor escreveu alguns pontos essenciais que todos os descritivos deveriam possuir, como, por exemplo, materiais necessários, influência (ou não) do tipo de fonte de luz e esquema de formação da imagem.

Durante a atividade de construção do descritivo, o professor atentou às falas dos estudantes. Já neste primeiro momento da aplicação do produto houve menções à refração da luz como fenômeno responsável pela composição da obra.

Quando os estudantes contemplaram a obra da fotógrafa Suzanne Saroff, logo afirmaram que o formato do copo deveria influenciar na formação da imagem fotografada. Entretanto, quando questionados sobre quais tipos de meios de propagação da luz estavam presentes na obra, tiveram dificuldade em identificar o vidro como meio. O restante das atividades do primeiro encontro foram desenvolvidas conforme planejado, sem grandes dificuldades pelos estudantes.

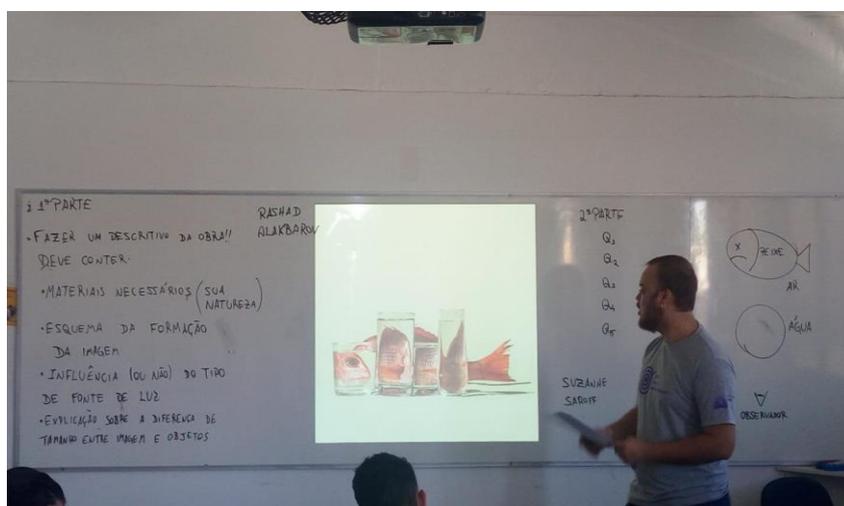


Figura 20: Professor discutindo a obra de Suzanne Saroff.
Fonte: Elaborado pelo Autor

No segundo encontro, o professor encontrou dificuldades para a sua execução logo no início da primeira aula. Para poder desenvolver as atividades planejadas para o segundo encontro, os estudantes deviam possuir o *game Glass* em seus *smartphones* com os mundos *Convergence* e *Divergence* liberados. Entretanto, a maioria não tinha sequer jogado o *game*, embora os tivessem instalado em seus dispositivos. Dessa forma, o professor concedeu

duas aulas para que os estudantes jogassem efetivamente o *game* em sala, para poder desbloquear os mundos necessários para o segundo encontro. Nessas aulas de resolução do *game*, em alguns momentos, os estudantes não conseguiam passar de algumas etapas, demonstrando um pouco de frustração. O professor os ajudou a passar das etapas em que encontravam muita dificuldade, visto que o interessante na utilização do *game* escolhido para ensinar óptica geométrica não era a resolução das fases em si, mas os fenômenos relacionados a luz que nele poderiam ser observados e manipulados.



Figura 21: Tela de seleção de mundo do game Glass, com destaque nos mundos *Convergence* e *Divergence*.
Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim que se garantiu que todos os grupos possuíam pelo menos um *game* com as etapas necessárias desbloqueadas, deu-se prosseguimento ao segundo encontro e as suas atividades previamente planejadas. Acerca das apresentações dos grupos sobre as etapas que resolveram, a grande maioria disse que as lentes convergentes e divergentes eram espelhos, algo que não era esperado como resultado, mas que é compreensível levando em consideração que os espelhos e lentes são visualmente similares no *game*. Entretanto, a grande maioria dos grupos soube identificar que os raios de luz se aproximam/afastam quando passam pelas lentes. Inclusive, houve uma discussão entre dois grupos acerca do meio que constituía o interior da lente esférica. Um grupo assegurava que dentro da lente havia um líquido que

desviava os raios de luz, sendo o responsável pela refração observada na etapa do *game*, enquanto o outro grupo atribuía o desvio ao fato da lente ser constituída por um único meio e era a sua geometria que causava a refração da luz.

Na atividade em que os estudantes tinham que representar esquematicamente os raios de luz emergindo do aquário para os olhos de um observador, houve muita dificuldade por parte dos estudantes, pois não havia ocorrido ainda uma discussão acerca da reflexão total da luz e diversos grupos, ao concluir a atividade, procuravam o professor querendo uma confirmação de que o que fizeram estava certo, que assegurava aos estudantes a fazer o que achavam que estava correto, tentando ao máximo não influenciar na execução da atividade. Esse tipo de busca de confirmação dos estudantes é reflexo do ensino tradicional, onde há apenas uma resposta correta aceita pelo professor e aqueles que não conseguem memorizá-la são punidos com notas baixas.



Figura 22: estudantes atentos ao vídeo do canal *engineerguy* sobre fibras ópticas.
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para a última parte do segundo encontro, sobre a fibra óptica e sua fabricação, foi feita em uma terceira aula, para que os estudantes pudessem ter mais tempo para realizar todas as atividades e refletir acerca do fenômeno da reflexão total da luz e de suas aplicações tecnológicas.

O terceiro encontro ocorreu conforme planejado. Os estudantes gostaram da perspectiva de demonstrações experimentais em conjunto com o *game* adotada no encontro, pois, até então, não possuíam contato com experimentos sobre o que estudavam e discutiam.

A maior dificuldade na aplicação do produto aconteceu entre o terceiro e o quarto encontro. A escola em que o autor trabalha faz parte de uma das

maiores redes de ensino do Distrito Federal, com nove unidades no ano de aplicação do produto. Sendo assim, o sistema avaliativo da rede é composto por provas unificadas. A coordenação pedagógica da unidade em que o autor aplicou a UEPS julgou que o conteúdo estaria defasado quando comparado com outras unidades. Dessa maneira, foi solicitado ao autor que interrompesse com a aplicação do produto e continuasse a sequência do conteúdo de maneira tradicional. Isso influenciou diretamente nos resultados da UEPS, uma vez que houve uma interrupção abrupta da sequência de ensino. Entretanto, o autor ainda realizou o quarto encontro, como sendo uma oficina de lentes esféricas, no contraturno, antes de discutir este assunto nas aulas regulares. A presença dos estudantes ainda foi positiva, porém, menos representativa do que nos encontros anteriores, com apenas trinta e três participantes.



Figura 23: Demonstrações do terceiro encontro.
Fonte: Elaborado pelo Autor

A maior dificuldade na aplicação do produto aconteceu entre o terceiro e o quarto encontro. A escola em que o autor trabalha faz parte de uma das maiores redes de ensino do Distrito Federal, com nove unidades no ano de aplicação do produto. Sendo assim, o sistema avaliativo da rede é composto por provas unificadas. A coordenação pedagógica da unidade em que o autor aplicou a UEPS julgou que o conteúdo estaria defasado quando comparado com outras unidades. Dessa maneira, foi solicitado ao autor que interrompesse com a aplicação do produto e desse sequência ao conteúdo de maneira tradicional. Isso influenciou diretamente nos resultados da UEPS, uma vez que houve uma interrupção abrupta da sequência de ensino. Entretanto, o autor ainda realizou o quarto encontro, como sendo uma oficina de lentes esféricas, no contraturno,

antes de discutir este assunto nas aulas regulares. A presença dos estudantes ainda foi positiva, porém, menos representativa do que nos encontros anteriores, com apenas trinta e três participantes.

Apesar das dificuldades encontradas, o quarto encontro foi realizado, no contraturno das aulas, no período vespertino. Todas as três aulas planejadas para o encontro foram executadas de uma só vez, para evitar mais encontros em contraturno e minimizar a evasão dos estudantes presentes. Durante a projeção das etapas *Divergence_0* e *Convergence_0*, a maioria dos estudantes conseguiu diferenciar o tipo de desvio sofrido pelos raios de luz, uma vez que já haviam observado lentes esféricas sendo utilizadas em outras etapas do *game*, como nas etapas utilizadas no segundo encontro, por exemplo. Os estudantes que participaram o quarto encontro externalizaram seus pensamentos de maneira mais natural do que nos outros encontros. Talvez o fato de ser uma aula em contraturno, em um ambiente com menos participantes, os tenha incentivado a serem mais participativos. O quinto encontro foi aplicado durante a semana de provas e encerrou a aplicação do produto educacional no dia nove de outubro de 2018.

Capítulo 4

Resultados e Análise

Com a montagem do descritivo no primeiro encontro, foi possível perceber que uma parte expressiva dos estudantes, cerca de 33%, possuía a maioria dos subsunçores necessários para o ensino da refração da luz, enquanto outros 35% possuíam apenas alguns dos subsunçores necessários, não sendo possível identificar subsunçores em 32% dos estudantes participantes do primeiro encontro, como pode ser observado no gráfico 1. Um dos motivos na dificuldade de identificação de subsunçores na estrutura cognitiva dos participantes da aplicação do produto educacional se originou porque vários estudantes, cerca de 51,66%, não realizou um esquema de montagem da obra com representação gráfica, que era crucial para a identificação de vários subsunçores, como o princípio da propagação retilínea da luz, por exemplo. Um dos motivos para que a maioria dos estudantes não tenha realizado a representação gráfica da obra se deve à dificuldade que os estudantes tiveram para compreender o que se esperava de uma representação dos raios de luz; muitos não faziam ideia de como representar a luz, algo que possui uma trajetória intuitiva, porém, não é tão simples, a princípio, de ser representado.

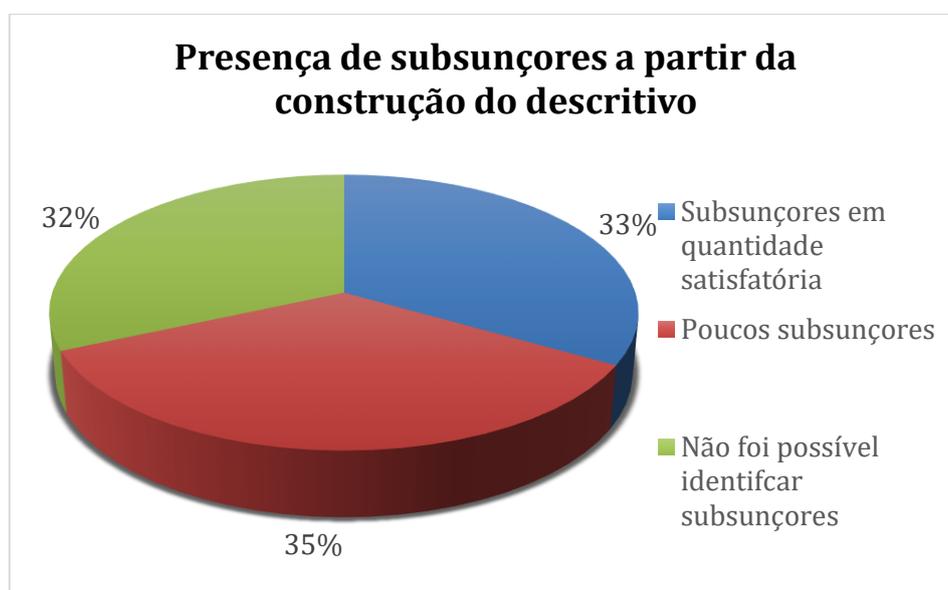


Gráfico 1: Subsunçores detectados a partir da montagem do descritivo da obra de Rashad Alakbarov.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Apesar de haver um déficit no número de representações gráficas integrando os descritivos, foi possível identificar subsunçores na maioria dos estudantes (68%), podendo-se inferir que os demais estudantes possuam algum subsunçor para o ensino de refração da luz, supostamente não identificados neste primeiro momento.

Um dado interessante na atividade de montagem do descritivo foi que cerca de 36,66% dos estudantes afirmou que a luz era refletida nos componentes translúcidos da composição da obra. Não se esperava que uma parcela dos estudantes identificaria o fenômeno da reflexão da luz ocorrendo na situação da obra, uma vez que se pode observar e inferir claramente a partir das imagens projetadas pelo professor que a luz atravessa os objetos que compõem a obra. Uma das justificativas para o uso da palavra reflexão pelos estudantes, ao observar a obra, seria a falta de outro termo para explicar o que era observado. Logicamente, a maioria dos estudantes não tinha ainda estudado a refração da luz, sendo assim plausível a utilização da palavra reflexão nesse caso.

Ao serem expostos a obra da artista Suzanne Saroff, foram feitos alguns questionamentos aos estudantes com o intuito de verificar a conexão entre os subsunçores detectados na atividade de montagem do descritivo. Os resultados dessa atividade podem ser observados no gráfico 2.

Em 92% dos estudantes que participaram do primeiro encontro foi possível encontrar conexões entre os subsunçores. A maior parte dos estudantes percebeu que a luz mudava de meio de propagação, podendo-se inferir que a utilização da palavra reflexão da luz na atividade anterior foi escolhida por mera falta de outras palavras melhores, não uma má interpretação do fenômeno físico em questão.

Diversos grupos discutiram as diferenças entre o ar e a água como meios de propagação da luz, alguns alegando que a principal diferença era a densidade e distribuição molecular no meio, outros afirmando que a diferença mais importante era o estado da matéria do meio. Dois grupos, cerca de 20% dos estudantes participantes, afirmaram que o fator que diferencia os dois meios é a velocidade na qual a luz se propaga neles. Ainda houve um grupo que, durante o desenvolvimento da atividade, comentou acerca da refração da luz na água. Isso mostra a heterogeneidade dos participantes da pesquisa.

Existência de conexão entre subsunçores da primeira atividade na estrutura cognitiva

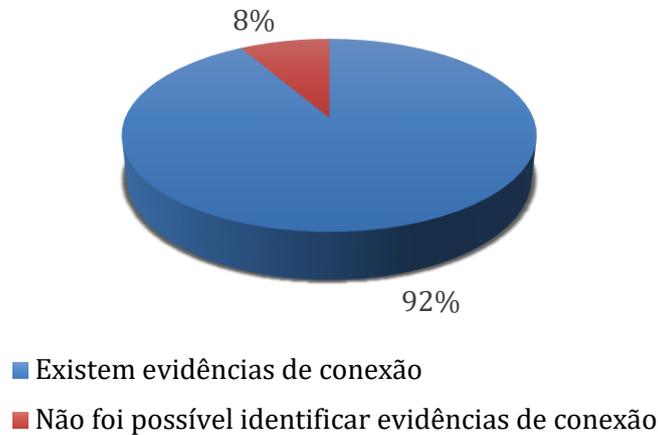


Gráfico 2: Conexão entre subsunçores identificados na primeira atividade do primeiro encontro.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto à representação dos raios de luz que saem do peixe e chegam aos olhos do observador, pode-se perceber um aumento significativo na quantidade de representações satisfatórias após a discussão do fenômeno da refração da luz, como pode ser observado no gráfico 3.

Representações satisfatórias dos raios de luz antes e após a discussão sobre refração

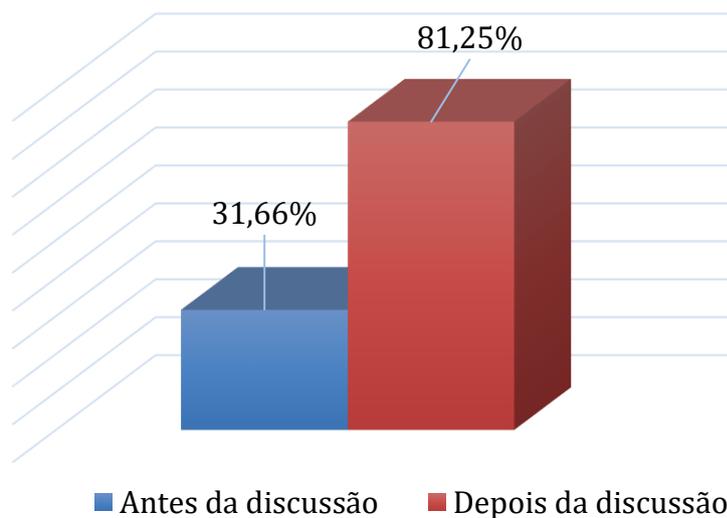


Gráfico 3: Representação dos raios de luz antes e após a discussão acerca da refração da luz.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Antes da refração da luz ser discutida, apenas 31,66% dos estudantes conseguiram representar os raios de luz de maneira satisfatória, isto é, a luz sofrendo desvio ao passar do ar para a água e da água para o ar. Após a discussão, 81,25% dos estudantes representaram os raios de luz de maneira correta. Este aumento é expressivo e pode-se inferir que ocorreu diferenciação progressiva, uma vez que as novas informações interagiram com os subsunçores, causando a formação de novos significados na estrutura cognitiva dos estudantes. Corroborando com esta afirmação, 87,5% dos estudantes concluíram que o material dos objetos translúcidos que compõem a obra de Rashad Alakbarov é feito de acrílico, resultado que já era esperado.

Em relação ao mapa mental solicitado pelo professor para ser entregue via e-mail, decidiu-se que não seriam considerados como resultados confiáveis, pois muitos são extremamente semelhantes, inclusive em seus equívocos, e possuem assuntos da refração da luz que ainda não haviam sido discutidos, como a lei de Snell-Descartes, por exemplo. Isto não significa que atividades on-line não sejam encorajadas, apenas é necessário um ambiente com um controle mais rigoroso e melhor clarificação aos estudantes dos objetivos e formas de execução de cada atividade.

No segundo encontro, nas apresentações dos grupos acerca das resoluções das etapas do *game Glass*, todos os grupos chegaram à conclusão de que a luz seria desviada quando passava pela lente, entretanto, apenas um grupo identificou o objeto utilizado para desviar a luz como lente, sendo que os demais o identificaram como espelho. Esses resultados confirmam as expectativas do autor, evidenciando a presença dos subsunçores “refração da luz” e “interfaces entre meios materiais” na estrutura cognitiva dos estudantes, causada, provavelmente, pela sua interação com as informações discutidas no primeiro encontro.

Após a discussão acerca das leis da refração, a maioria dos estudantes, cerca de 85%, concluiu que o meio material que envolve as lentes no *game* é o ar. Neste caso, infere que a nova informação, introduzida na discussão, causou a diferenciação progressiva na compreensão do fenômeno da refração da luz, como esperado.

Na representação dos raios de luz na situação do vídeo que mostra o peixe dentro do aquário, antes da discussão acerca do fenômeno da reflexão

total da luz, apenas 5,97% dos estudantes conseguiram realizar a representação de maneira correta, como esperado, pois ainda não tinham as informações necessárias em sua estrutura cognitiva para realizar a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa entre refração da luz e reflexão total da luz. Após a discussão, 67,16% dos estudantes conseguiram representar os raios de luz de maneira satisfatória, como pode ser observado no gráfico 4, inferindo-se a ocorrência de diferenciação progressiva.

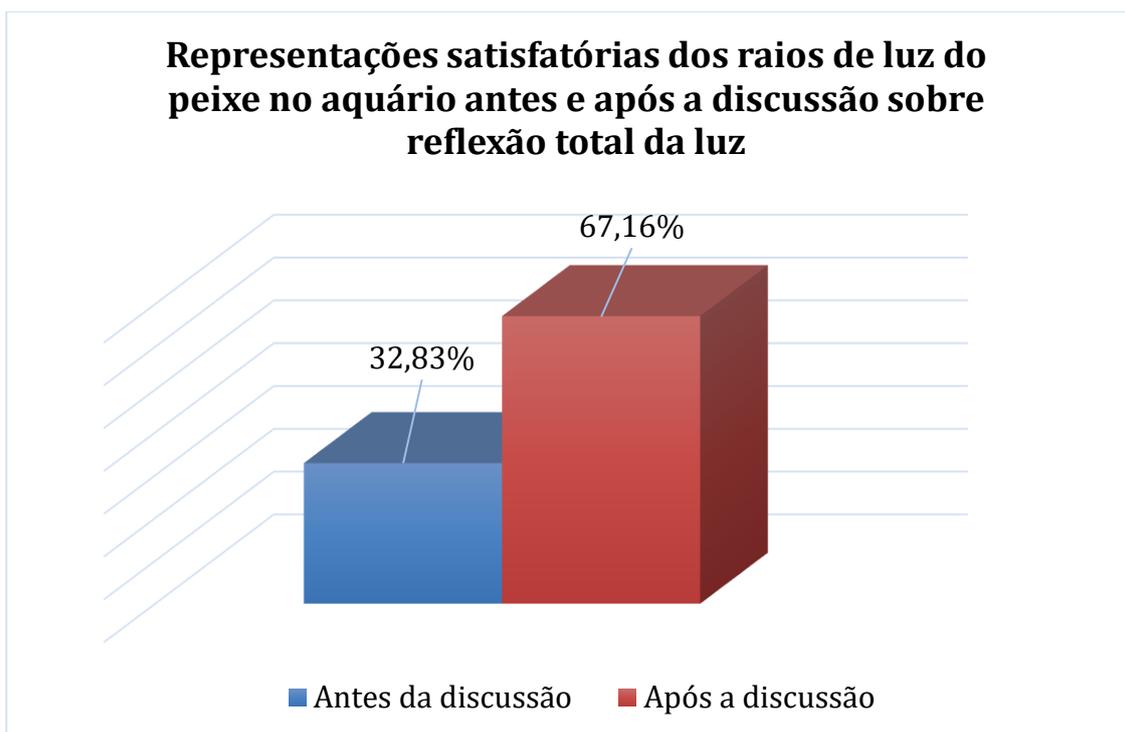


Gráfico 4: Raio de luz provenientes do peixe no aquário antes e após a discussão sobre reflexão da luz.
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na terceira aula do segundo encontro, a maioria (74,60%) dos estudantes concluíram que a fibra óptica que produz o menor ângulo crítico é composta por diamante na camada externa e glicerina na camada interna, conforme esperado. Pode-se inferir, neste caso, que as informações discutidas nessa aula interagiram com a estrutura cognitiva dos estudantes, modificando-a.

No terceiro encontro, 77,96% dos estudantes concluiu que a luz apenas se dispersa quando o espelho está na água por causa da refração dos raios de luz, que passam do ar para a água e 98,30% concluiu que o tipo de luz proveniente da lanterna é policromática. Destes dois resultados, é possível deduzir que a interação dos estudantes com a etapa do mundo *Dispersion* do

game Glass modificou a sua estrutura cognitiva, causando a diferenciação progressiva do conceito de dispersão da luz. Entretanto, na atividade em que deveriam representar os raios de luz na situação da demonstração experimental feita pelo professor em sala de aula, a maioria dos estudantes, cerca de 66%, representou a dispersão da luz acontecendo quando os raios de luz emergiam do espelho, o que é equivocado, tendo em vista que a dispersão da luz ocorre quando há refração. Apenas 7% dos estudantes representaram da maneira correta, como pode ser observado no gráfico 5, com duas refrações acontecendo, quando a luz passa do ar para a água e quando os raios emergem do espelho e passam da água para o ar. Ainda foram entregues ao professor representações gráficas em que havia apenas uma refração, 27%, que causava a dispersão dos raios de luz. Nesse caso, fica evidente a necessidade de novas discussões acerca da dispersão da luz, para que ocorra ressignificação e reorganização da estrutura cognitiva dos estudantes.

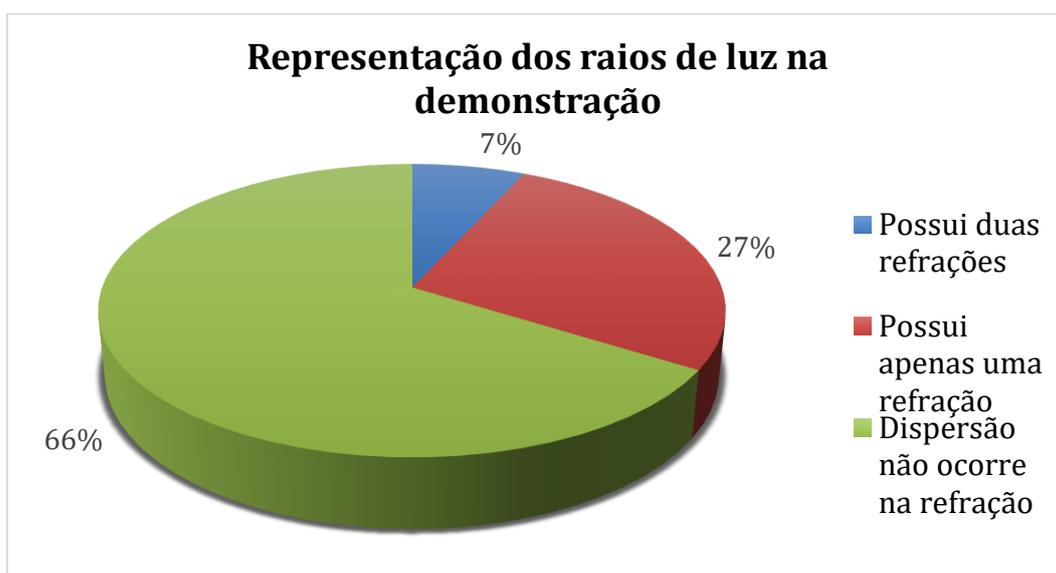


Gráfico 5: Representação da dispersão da luz na demonstração experimental.
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na segunda aula do terceiro encontro, o professor retomou brevemente uma discussão acerca da dispersão da luz (nesse caso, sobre a formação do arco-íris), solicitando, após a discussão, uma representação gráfica dos raios de luz em uma gota d'água. A maioria dos estudantes, 64,06%, conseguiu executar de maneira satisfatória a atividade, mostrando que a nova discussão sobre

dispersão da luz causou a reorganização da estrutura cognitiva, alterando-a por meio do confronto com novas informações e ancoragem em subsunções.

Na situação-problema 3, boa parte dos estudantes conseguiram associar a coloração azulada do céu com a dispersão da luz. Entretanto, não houve qualquer menção ao fenômeno do espalhamento da luz, o que era esperado, uma vez que o espalhamento da luz foi discutido posteriormente.

Após a discussão acerca do espalhamento da luz, poucos estudantes conseguiram explicar que a mudança da coloração do céu ao longo do dia estava relacionada com a distância com que luz se propagava e se espalhava na atmosfera. Em situações futuras, sugere-se que sejam feitas outras discussões acerca do comprimento de onda das cores e da sua influência no espalhamento da luz na atmosfera terrestre.

No quarto encontro, todos os estudantes conseguiram perceber a diferença entre o desvio na luz causado por uma lente convergente e uma divergente. 82,35% dos estudantes concluiu que a lente possuía um índice de refração maior que o meio, o que sugere que houve interação entre as informações discutidas e a sua estrutura cognitiva, causando a diferenciação progressiva. Na representação da formação da imagem da lente divergente, 88,23% dos estudantes realizou uma representação gráfica satisfatória da imagem e conseguiu explicar as suas características, como era esperado. Na última atividade, 85,29% dos estudantes participantes concluíram que as lentes divergentes são adequadas para a correção de miopia, enquanto as lentes convergentes são adequadas para a correção de hipermetropia. A partir destes resultados, pode-se inferir que ocorreu a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa, pois a maioria dos estudantes conseguiu perceber a diferença entre uma lente divergente e convergente, além de associar o processo de formação de imagem à correção de defeitos da visão.

Por causa dos problemas encontrados durante a aplicação do produto educacional, mais especificamente entre o terceiro e quarto encontro, poucos estudantes participaram de todos os encontros, não permitindo uma avaliação global da UEPS de uma parte expressiva das turmas. Mesmo assim, é válido avaliar de maneira global o desempenho daqueles que participaram de todas as etapas da aplicação do produto, analisando assim, o quinto encontro destes estudantes.

Nas questões do quinto encontro, a maioria dos estudantes que participaram de todos encontros, cerca de 85,71%, conseguiram responder a maior parte das questões de maneira correta, com respostas coerentes em que se pode identificar evidências de aprendizagem significativa, como pode se observar no gráfico 6. Duas estudantes, identificadas como A57 e A59 por questões éticas, não conseguiram obter um desempenho satisfatório na avaliação, não conseguindo aprender significativamente todos os assuntos discutidos nos encontros. Acredita-se que este resultado negativo não é devido a falhas na diversificação das estratégias de ensino, ou na construção da UEPS, uma vez que as duas estudantes possuem um histórico de desmotivação e problemas de disciplina na escola e que representam uma pequena parcela dos participantes da pesquisa.

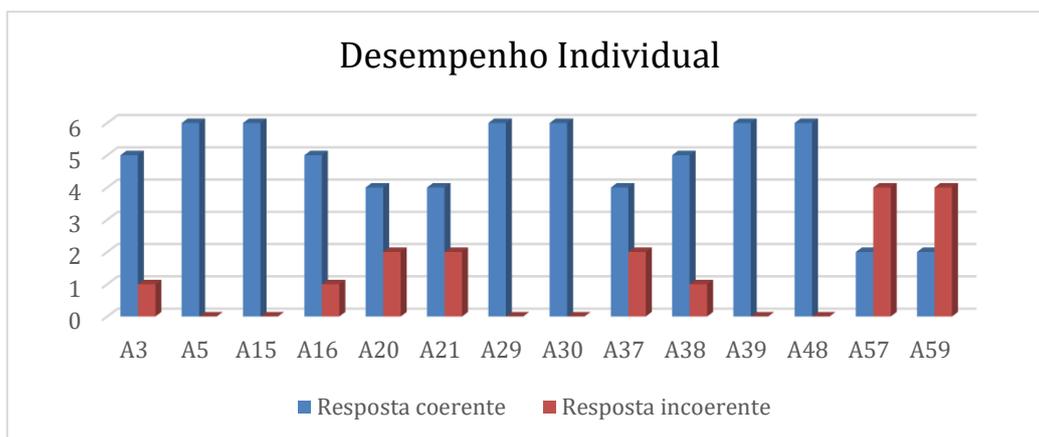


Gráfico 6: Desempenho individual do 5º encontro dos estudantes participantes de todos os encontros.

Fonte: Elaborado pelo Autor

No gráfico 7, é possível observar o desempenho dos estudantes, de maneira geral, em cada questão. A quarta (Por que as nuvens são brancas?) e a sexta (Qual é a lente que deve ser utilizada por uma pessoa que não consegue ver o seu amigo que se encontra do outro lado de uma rua?) questão foram as que apresentaram maior número de respostas incoerentes, com cerca de 57,14% e 35,71%, respectivamente. Na quarta questão, isso significa que a maioria dos estudantes não consegue identificar que a cor branca de uma nuvem é causada pela dispersão da luz em todas as cores ao refratar, que se somam para formar a cor branca. Entretanto, isso não significa que os estudantes não aprenderam significativamente o conceito de dispersão da luz, uma vez que todos responderam à questão cinco (Por que a água concentrada em grandes

quantidades, nos oceanos por exemplo, apresenta uma cor azul?) de forma coerente.

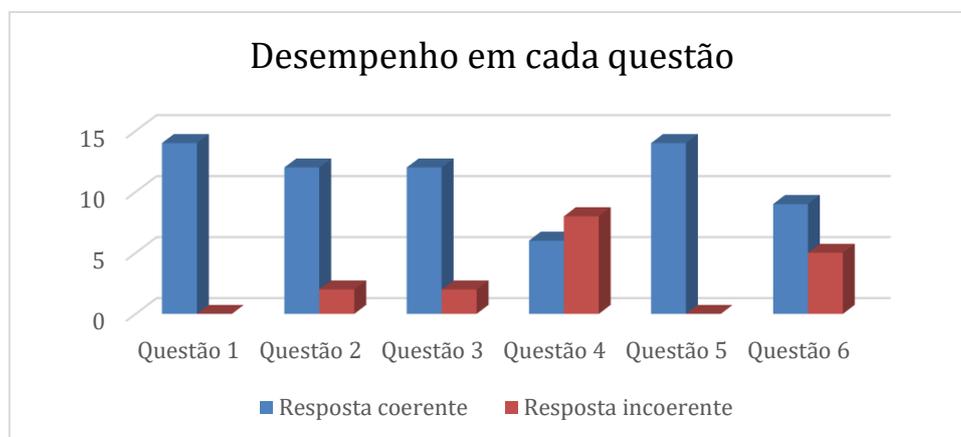


Gráfico 7: Desempenho geral dos estudantes no 5º encontro.
Fonte: Elaborado pelo Autor

Já a sexta questão, a maioria dos estudantes conseguiu responder coerentemente. Acredita-se que aqueles que não conseguiram formular respostas coerentes identificaram equivocadamente o defeito da visão descrito na questão, confundindo-o com a hipermetropia ou até mesmo o astigmatismo, isto é, estes assuntos ainda não possuem uma representação significativa na sua estrutura cognitiva.

Em síntese, os dados coletados demonstram que as discussões sobre a refração da luz e as situações-problema foram suficientes para proporcionar a aprendizagem significativa de óptica geométrica, tanto no aspecto individual de cada encontro, como na avaliação geral de desempenho dos estudantes que participaram de todos os encontros. Na maioria dos encontros, o número de representações gráficas satisfatórias das situações apresentadas aos estudantes aumentou substancialmente após as discussões e exposições às novas informações relacionadas aos fenômenos ópticos em questão.

Capítulo 5

Considerações Finais

Um dos objetivos deste trabalho foi desenvolver, aplicar e avaliar uma proposição educacional, caracterizada por uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, para o ensino de óptica geométrica. Com base nos dados coletados e nos resultados, é possível inferir que alguns estudantes participantes da pesquisa apresentaram indícios de aprendizagem significativa, com base nos indicadores propostos no referencial teórico (AUSUBEL, 1968), principalmente nos que participaram de todos os encontros, uma vez que 85,71% conseguiram responder a maior parte das questões com proposições consideradas de acordo com o que era esperado. Tendo como base os resultados dos encontros individualmente, pode-se afirmar que eles foram planejados de forma a proporcionar situações em que os estudantes pudessem externalizar suas concepções acerca da óptica geométrica e seus fenômenos, fornecendo ferramentas para a investigação de evidências de aprendizagem significativa, tal como proposto na teoria da aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1968).

Com base nos resultados e na análise do primeiro encontro, fica clara a dificuldade que os estudantes encontram de representar situações em que fenômenos ópticos acontecem – 51%, por exemplo, não fizeram o esquema de raios de luz proposto pelo professor. Acredita-se que este obstáculo foi superado nos outros encontros, tendo em vista que o professor realizou algumas representações gráficas ao longo das discussões, tornando claro o que havia sido proposto. Isso pode ser visto nos resultados e na análise do segundo encontro, em que todos os estudantes fizeram as representações propostas nas atividades.

Observando os resultados dos encontros, pode-se perceber que em algumas situações, por exemplo na avaliação de conhecimentos prévios realizada no primeiro encontro, conceitos que seriam discutidos na aula já eram conhecidos pelos estudantes, podendo possuir significado ou não. Isso deve ao fato de alguns estudantes frequentarem, em contraturno, cursos preparatórios para o Programa de Avaliação Seriada da Universidade de Brasília, PAS-UnB.

No terceiro encontro, 66% dos estudantes representaram a dispersão da luz acontecendo quando os raios de luz emergiam do espelho, o que é equivocado. Acredita-se que, em futuras aplicações da UEPS e discussões acerca do fenômeno da refração e dispersão cromática da luz, é necessário um enfoque maior na relação entre a dispersão e a refração de um raio de luz policromático. A dispersão é devida à refração dos raios de luz e não à reflexão da luz, ao contrário do que foi representado pelos estudantes.

Por outro lado, o uso do *game Glass* mostrou-se adequado para as situações de ensino-aprendizagem da UEPS. Quando se utiliza um *game* com destinação comercial, isto é, quando não possui fins educacionais originários, são necessárias adaptações para que possa ser utilizado. Não é jogando o *game* por si só que o estudante aprenderá óptica geométrica; ele deve satisfazer critérios necessários para que seja utilizado no ensino, como representar os fenômenos físicos de maneira correta, por exemplo.

De maneira geral e salvo algumas exceções, os estudantes receberam muito bem o produto educacional, pois se afasta de uma aula expositiva, comum ao sistema de ensino a que estão acostumados. Um exemplo da recepção positiva do *game* foi que uma estudante completou todas as etapas do *game* em menos de uma semana.

A análise dos dados levou à conclusão de que os resultados são satisfatórios e, ainda, levando em consideração os passos para a construção e aplicação de uma UEPS evidenciados por Moreira (2011) e o referencial teórico adotado (AUSUBEL, 1968), que os objetivos propostos foram alcançados e o produto educacional foi devidamente validado para a aplicação e implementação por outros professores, respeitando-se os devidos contextos sociais e culturais dos estudantes.

Apêndice A

Produto Educacional

Apresentação

O presente produto educacional foi desenvolvido com o intuito de auxiliar professores que estejam interessados em experimentar metodologias alternativas para o ensino de óptica geométrica. Ele se fundamenta na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (1968), em que os fatores mais impactantes no processo de ensino-aprendizagem são os conhecimentos que previamente integram a estrutura cognitiva do estudante. Os conhecimentos prévios servem como apoio para a aprendizagem de novos assuntos de um determinado tema. Esse processo é chamado por Ausubel de subsunção, em que os conhecimentos prévios relevantes para a aprendizagem são chamados de subsunçores. Ao alcançar a aprendizagem significativa, o estudante não deve mais memorizar os conceitos porque será cobrado em algum teste, tudo deve fazer sentido para ele e possuir significado; o conhecimento deve estar à sua disposição a qualquer momento, podendo ser aplicado em diversas situações diferentes das apresentadas pelo professor no processo de ensino-aprendizagem, em diferentes níveis de complexidade e em diversas abordagens conceituais e metodológicas.

O produto educacional foi desenvolvido como sendo uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa - UEPS, proposta por Moreira (2011), em que é sugerida uma estrutura didática teoricamente orientada à aprendizagem significativa. Primeiramente, deve-se escolher o tema a ser trabalhado, identificando tudo o que é necessário para a sua compreensão. Após a escolha do tema, situações que levem o estudante a externalizar seus conhecimentos prévios devem ser elaboradas, pois esse é o ponto de partida para a discussão de novos tópicos de ensino dentro da perspectiva da teoria da aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1968). Situações-problema iniciais são sugeridas em nível introdutório. Em sequência, o conteúdo a ser ensinado é apresentado e discutido e são apresentadas novas situações-problema, em um nível maior de complexidade, e novas discussões são realizadas, com o objetivo de diferenciar os conceitos introduzidos pela nova informação daqueles que o estudante já conhecia previamente. Concluindo a UEPS, são realizadas atividades em uma

perspectiva integradora, objetivando a integração dos novos conhecimentos com os conhecimentos prévios dos estudantes. A avaliação da UEPS é realizada ao longo do processo de ensino-aprendizagem, mas Moreira (2011) também sugere que sejam realizadas avaliações ao final, de tal maneira que o professor possa registrar tudo o que possa ser considerado indício de aprendizagem significativa.

Um dos objetivos específicos que tentou-se alcançar com esse produto foi verificar a possibilidade de uso de *games* comerciais, não concebidos com fins educacionais, no ensino de física. Para aumentar a possibilidade de replicação e uso do produto, um *game* para plataformas móveis foi selecionado, devido ao grande uso de *smartphones* por jovens no Brasil. Com isso, assegura-se uma probabilidade maior de uso do produto educacional sem a necessidade de alterações que possam comprometer sua eficácia. O *game* escolhido chama-se “*Glass*” e foi desenvolvido por cube3rd¹⁸ para a plataforma *Android*. É um jogo do tipo *puzzle*¹⁹, em que o jogador tem que desviar a trajetória de raios de luz provenientes de uma fonte utilizando refletores planos, lentes convergentes e divergentes, primas e divisores de raios até um receptor. O jogo possui oitenta e um níveis espalhados em nove mundos diferentes, em que cada mundo possui um fenômeno ou instrumento óptico diferente do anterior. O uso do *game Glass* mostrou-se adequado para as situações de ensino-aprendizagem da UEPS. Quando se utiliza um *game* com destinação comercial, são necessárias adaptações para que possa ser utilizado. Não é jogando o *game* por si só que o estudante aprenderá óptica geométrica; ele deve satisfazer critérios necessários para que seja utilizado no ensino, como representar os fenômenos físicos de maneira correta, por exemplo.

O produto foi aplicado, devidamente validado em duas turmas do 2º ano de ensino médio de uma escola particular de Brasília e possui cinco encontros, cada um com uma média de duas aulas de duração. Cada encontro concentra-se em aspectos e fenômenos integrantes da óptica geométrica. A análise dos dados da aplicação do produto sugere que a maioria dos estudantes que participaram de todos os encontros apresentaram indícios de aprendizagem significativa de tópicos de óptica geométrica.

¹⁸ Site do desenvolvedor disponível em: <<http://cube3rd.blogspot.com/>> Acesso em: 30 Jun. 2019.

¹⁹ Consiste em um tipo de *game* em que o jogador deve resolver um quebra-cabeças.

Conceitos de Óptica Geométrica

1. A natureza da luz

Antes do início do século XIX, a natureza da luz foi objeto de interesse de diversos cientistas. Desde os gregos, que não faziam distinção entre luz e visão (KNIGHT, 2016), passando pelos experimentos de Newton, que acreditava que a luz era composta de partículas, até os de Hooke e Huygens, que sugeriam que a luz era uma onda, a discussão sobre a natureza da luz servia como referência em todas as descobertas e revoluções no estudo da óptica. Mas, foram as contribuições de Thomas Young e seus experimentos de interferência com a luz que consubstanciaram a teoria ondulatória. No final do século XIX, Maxwell e Hertz provaram, então, que a luz se comportava como uma onda eletromagnética (BORN; WOLF, 1980).

No início do século XX, alguns fenômenos relacionados à natureza da luz ainda não podiam ser explicados. Por exemplo, o efeito fotoelétrico, descoberto em um experimento feito por Hertz, acontecia quando a luz incidia sobre uma superfície metálica e, ocasionalmente, elétrons eram ejetados. Os resultados deste experimento mostravam que a energia cinética dos elétrons ejetados era independente da intensidade da luz. Esse fenômeno foi apenas explicado por Einstein em 1905, utilizando o conceito de quantização desenvolvido por Max Planck. O modelo da quantização assume que a energia de uma onda de luz pode ser interpretada como um conjunto descontínuo de partículas, chamadas de fótons. Por causa do progresso no estudo da natureza da luz no século XX, chega-se à conclusão de que a luz não é *stricto sensu* onda ou partícula. A luz apresenta uma natureza dual, comportando-se como onda em algumas situações e como partícula em outras. O que define o comportamento da luz como onda ou partícula é o tamanho dos obstáculos ou aberturas em que a luz atravessa. Se atravessa por uma abertura com tamanho menor do que 0,1 mm de largura, apresenta comportamento ondulatório. Se a abertura possui um tamanho maior do que 0,1 mm, se comporta como partícula (KNIGHT, 2016). Por exemplo, sabe-se que um comportamento associado às ondas é o fenômeno da difração, o espalhamento da onda em todas as direções ao passar através de uma fenda. Em um primeiro momento, pode-se pensar que a luz, sendo um jato contínuo de partículas, não pode apresentar este comportamento, conforme

ilustra a figura 1. Entretanto, Thomas Young mostrou, em 1801, que a luz poderia sofrer não apenas difração, mas também interferência, não havendo dúvida de que a luz é uma onda. No caso do efeito fotoelétrico, a teoria ondulatória previa que a energia dos elétrons deveria depender da intensidade da luz emitida, porém, não era isso que os resultados experimentais mostravam. Apenas considerando a luz como um jato discreto (descontínuo) de partículas seria possível explicar tais resultados. Então, a luz pode sofrer interferência e efeito fotoelétrico, não se limitando a um modelo, mas comportando-os ao mesmo tempo (KNIGHT, 2016; SERWAY; JEWETT, 2004).

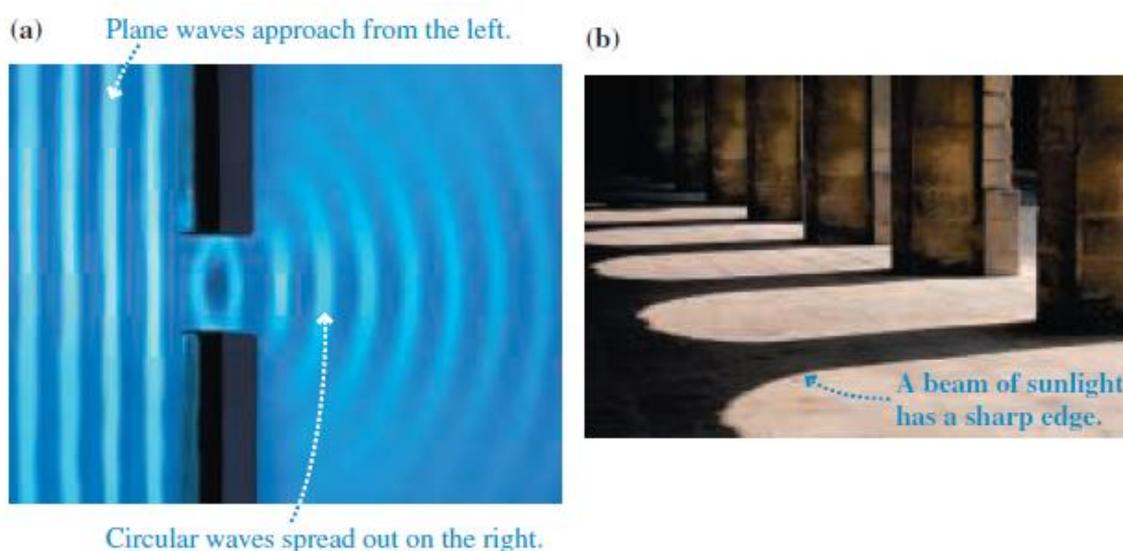


Figura 1: (a) difração de uma onda se propagando na água. (b) a luz não sofre difração ao passar pelos arcos. Os raios de luz estão bem definidos.

Fonte: Knight (2016, p. 931)

2. Velocidade da Luz e Índice de Refração

Segundo Griffiths (2011, p. 227), Maxwell, ao tentar explicar o comportamento de campos eletromagnéticos com as equações que posteriormente receberam seu nome, chegou a um resultado que mostrava que os campos elétrico e magnético se propagavam no espaço por meio de ondas, conhecidas hoje como ondas eletromagnéticas. Tais ondas, segundo Maxwell, propagam-se com uma velocidade correspondente a

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

onde ε e μ são constantes que dependem do meio de propagação do campo elétrico e magnético. Substituindo os valores das constantes na equação (1), obtém-se o valor da velocidade da luz. Baseado neste resultado que Maxwell desenvolveu a sua teoria eletromagnética da luz.

De acordo com Born e Wolf (1980, p. 11), a luz, ao passar de um meio para outro, sofre uma mudança na sua direção de propagação e na sua velocidade. O índice de refração absoluto “n” de um meio é a razão da velocidade da luz no vácuo e da velocidade da luz no meio e é utilizado para medir o quão refringente um meio pode ser:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Se dois meios, 1 e 2, possuem índices de refração diferentes, a razão entre eles fornece o índice de refração relativo entre esses dois meios:

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3)$$

Comparando (2) e (1), temos a formula de Maxwell:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (4)$$

3. Raios de Luz

Uma maneira conveniente de representar a propagação da luz é por meio de raios. Sendo a luz uma onda tridimensional, sua propagação a partir de uma fonte possui um formato esférico. Em situações de fronteira, distante da fonte, as frentes de onda assumem um formato próximo a um plano retilíneo. Por isso, neste tipo de situação, usa-se a representação por meio de raios perpendiculares aos planos. Segundo Hecht (2017, p. 107), a representação da luz em forma de raios vem da antiguidade. Um raio é definido como uma linha desenhada no espaço correspondente à direção do fluxo de radiação luminosa, como pode se observar na Figura 2.

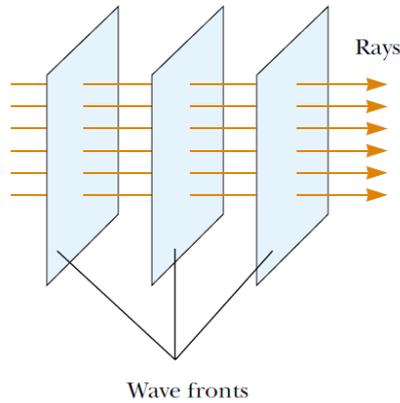


Figura 2: Raios de luz perpendiculares às frentes de onda

Fonte: Serway e Jewett (2004, p. 1097)

4. Reflexão e Refração

Ainda de acordo com Born e Wolf (1980, p. 37), quando uma onda eletromagnética plana incide sobre a superfície entre dois meios distintos, ela se separa em duas ondas: uma que é transmitida ao longo do segundo meio e outra que é refletida de volta para o primeiro meio.

Suponha que uma onda plana se propaga em uma direção no espaço especificada pelo vetor unitário $\mathbf{s}^{(i)}$. Ao incidir sobre a superfície entre dois meios, ela é transmitida na direção com vetor unitário $\mathbf{s}^{(t)}$ no segundo meio e refletida na direção do vetor unitário $\mathbf{s}^{(r)}$. Na interface entre os dois meios, a variação do tempo dos campos secundários, de reflexão e transmissão, é igual à variação do tempo no campo primário de incidência. Equacionando os argumentos das funções de onda para um ponto \mathbf{r} , na interface entre os meios, $z = 0$, tem-se que:

$$t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(i)}}{v_1} = t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(r)}}{v_1} = t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(t)}}{v_2} \quad (5)$$

Sendo que v_1 e v_2 são as velocidades de propagação da onda nos dois meios. Já que $\mathbf{r} \equiv x, y, 0$ podemos reescrever (5) em termos das coordenadas “x” e “y” na interface entre os meios:

$$\frac{s_x^{(i)}}{v_1} = \frac{s_x^{(r)}}{v_1} = \frac{s_x^{(t)}}{v_2} \quad e \quad \frac{s_y^{(i)}}{v_1} = \frac{s_y^{(r)}}{v_1} = \frac{s_y^{(t)}}{v_2} \quad (6)$$

As relações acima demonstram que as ondas transmitida e refletida se encontram no mesmo plano da onda incidente, como pode ser observado na figura 3.

Tendo um plano xz como plano de incidência e adotando θ_i , θ_r e θ_t como os respectivos ângulos que $\mathbf{s}^{(i)}$, $\mathbf{s}^{(r)}$ e $\mathbf{s}^{(t)}$ fazem com o plano z, temos que

$$\begin{aligned}
s_x^{(i)} &= \sin \theta_i, & s_y^{(i)} &= 0, & s_z^{(i)} &= \sin \theta_i \\
s_x^{(r)} &= \sin \theta_r, & s_y^{(r)} &= 0, & s_z^{(r)} &= \sin \theta_r \\
s_x^{(t)} &= \sin \theta_t, & s_y^{(t)} &= 0, & s_z^{(t)} &= \sin \theta_t
\end{aligned} \tag{7}$$

Utilizando as relações em x de (6) e substituindo em (7), temos que

$$\frac{\sin \theta_i}{v_1} = \frac{\sin \theta_r}{v_1} = \frac{\sin \theta_t}{v_2} \tag{8}$$

Uma vez que, observando a figura 3, $\sin \theta_r = \sin \theta_i$ e $\cos \theta_r = -\cos \theta_i$ temos que

$$\theta_r = \pi - \theta_i \tag{9}$$

Este resultado, juntamente com a relação (6), constituem a lei da reflexão.

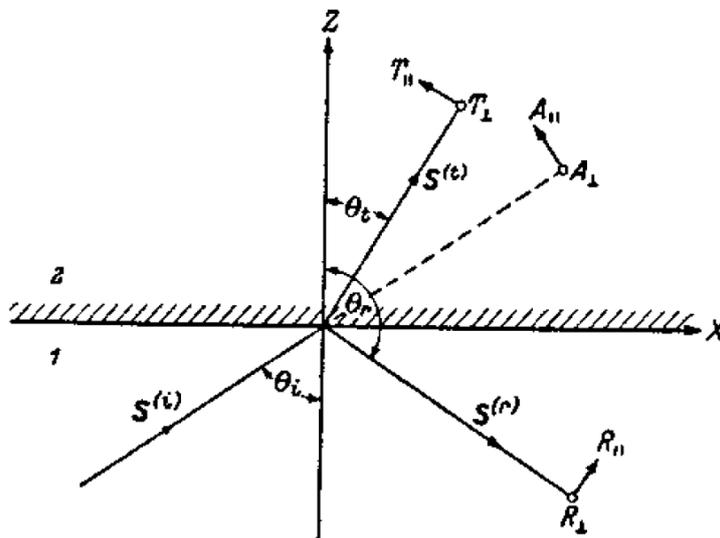


Figura 3: Refração e reflexão de uma onda plana.

Fonte: Born e Wolf (1980, p. 38)

Segundo Hecht (2017, p. 107), a lei da reflexão já era conhecida pelos gregos e pode ser deduzida ao observar a luz sendo refletida pela superfície de um espelho. Se a organização atômica de um material possui irregularidades menores do que o comprimento de onda de uma luz incidente no material, os raios de luz são refletidos com a mesma fase. Neste caso, a reflexão é especular (Figura 4a). Por outro lado, se as irregularidades na superfície do material são da ordem do comprimento de onda da luz incidente, os raios de luz refletidos serão refletidos em todas as direções, causando a reflexão difusa (Figura 4b). Vale a pena ressaltar que a reflexão difusa e a especular são extremos, a reflexão da luz na maioria dos objetos é algo entre estes tipos de reflexão.

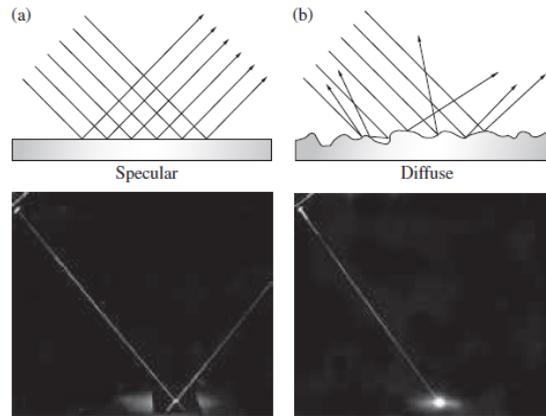


Figura 4: (a) reflexão especular e (b) reflexão difusa.
 Fonte: Hecht (2017, p. 108)

Suponha agora que uma onda plana se propagando em um meio “i” incida na interface entre os meios “i” e “t”, como é possível observar na Figura 5.

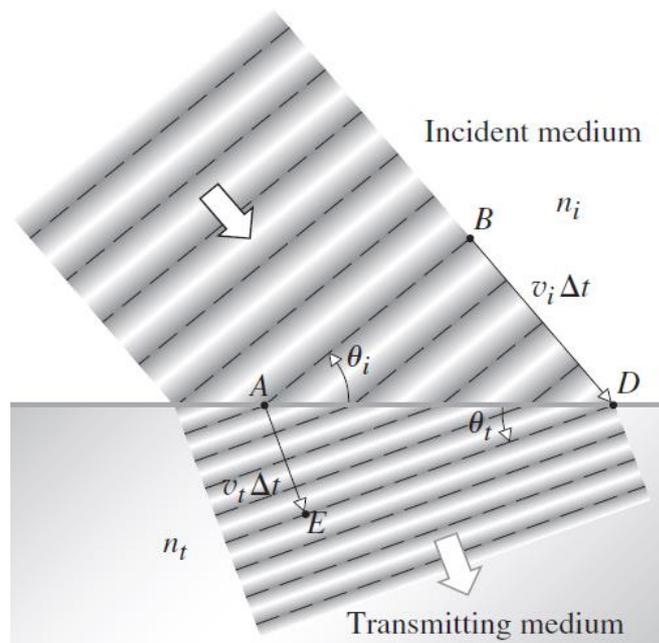


Figura 5: Esquema da refração de uma onda plana
 Fonte: Hecht (2017, p. 108)

Sendo Δt o intervalo de tempo que uma extremidade da onda leva para ir do ponto B para o ponto D com velocidade v_i , a outra extremidade já se encontra no ponto E, onde possui velocidade v_t , os triângulos ABD e AED compartilham a mesma hipotenusa \overline{AD} . Tem-se, então

$$\sin \theta_i = \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} \text{ e } \sin \theta_t = \frac{\overline{AE}}{\overline{AD}} \tag{10}$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\overline{BD}} = \frac{\sin \theta_t}{\overline{AE}} \quad (11)$$

Mas $\overline{BD} = v_i \Delta t$ e $\overline{AE} = v_t \Delta t$, então

$$\frac{\sin \theta_i}{v_i} = \frac{\sin \theta_t}{v_t} \quad (12)$$

Multiplicando os dois lados da relação acima pela velocidade da luz “c”, podemos estabelecer uma relação entre os senos dos ângulos e os respectivos índices de refração dos dois meios:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (13)$$

A expressão (13), juntamente com (6), constituem a lei da refração. (13) é conhecida como lei de Snell-Descartes.

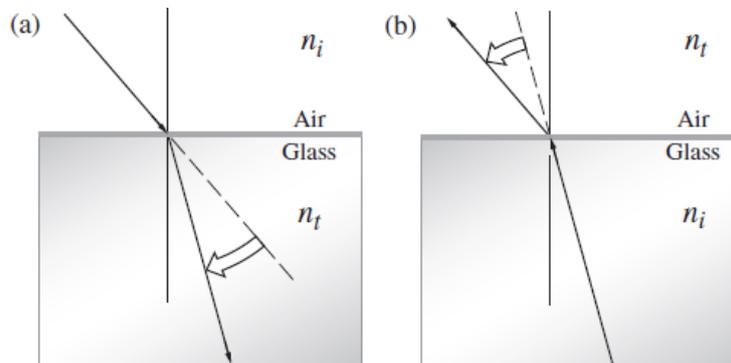


Figura 6: (a) meio i com índice de refração menor do que o meio t e (b) meio i com índice de refração maior do que o meio t.

Fonte: Hecht (2017, p. 110)

Quando $n_i < n_t$, o raio de luz refratado tem um ângulo, em relação a uma reta normal à interface entre os dois meios, menor do que o raio incidente. O oposto também acontece, quando $n_i > n_t$, o raio refratado possui um ângulo maior em relação à normal do que o raio incidente, como pode ser observado na Figura 6 (HECHT, 2017).

4.1. Reflexão Interna Total

Quando a luz passa para um meio com índice de refração menor do que o que contém os raios incidentes, o ângulo de refração é maior do que o ângulo de incidência. Se o ângulo de incidência for aumentando gradualmente, chegará um momento em que o ângulo de refração será de noventa graus e, para ângulos de incidência maiores, a luz não será mais transmitida para outro meio, sendo refletida totalmente.

De acordo com Knight (2016, p. 969), quando o ângulo de refração é de noventa graus, o ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico e pode ser deduzido a partir de (14), fazendo $\theta_t = 90^\circ$. O ângulo crítico é dado por

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_t}{n_i}\right) \quad (14)$$

A reflexão interna total possui diversas aplicações em tecnologia, desde binóculos até fibra óptica, que é utilizada em comunicações e na medicina (KNIGHT, 2016).

4.2. Dispersão da luz

De acordo com Serway e Jewett (2004, p. 1109), uma propriedade importante do índice de refração de um meio é que o seu valor varia de acordo



Figura 7: Arco-íris e sua reflexão em um lago.

Fonte: Web²⁰

com o comprimento de onda da luz. Quanto maior o comprimento de onda, menor o índice de refração; assim, por exemplo, uma luz de cor violeta sofre uma refração mais acentuada do que uma luz vermelha. Esse desvio da luz de acordo com a sua cor é conhecido como dispersão, pois um raio de luz branca se dispersa em todas as cores ao refratar. O fenômeno da dispersão da luz foi

²⁰ Rainbow and Rainbow Reflection over a large lake. Disponível em: <<https://www.goodfreephotos.com/other-landscapes/rainbow-and-rainbow-reflection-over-a-large-lake.jpg.php>>. Acesso em: 27 jun. 2019.

descrito por Newton e pode ser observado na natureza por meio de uma de suas manifestações mais poéticas: o arco-íris (Figura 7). Quando a luz solar incide em uma gotícula de água, ela dispersa e reflete internamente na gota, passando da água para o ar em uma segunda refração. Essa segunda refração é mais acentuada e separa mais os raios de cores diferentes, formando o arco-íris. Um modelo para explicar o arco-íris foi feito por René Descartes, que considerou a luz do sol adentrando uma gota esférica de água, sendo refratada duas vezes (HUGGINS, 1999).

4.3. Lentes Esféricas

Segundo Knight (2016, p. 972), uma lente é um objeto construído com material transparente que utiliza a refração da luz em superfícies curvas para formar uma imagem a partir de raios divergentes.

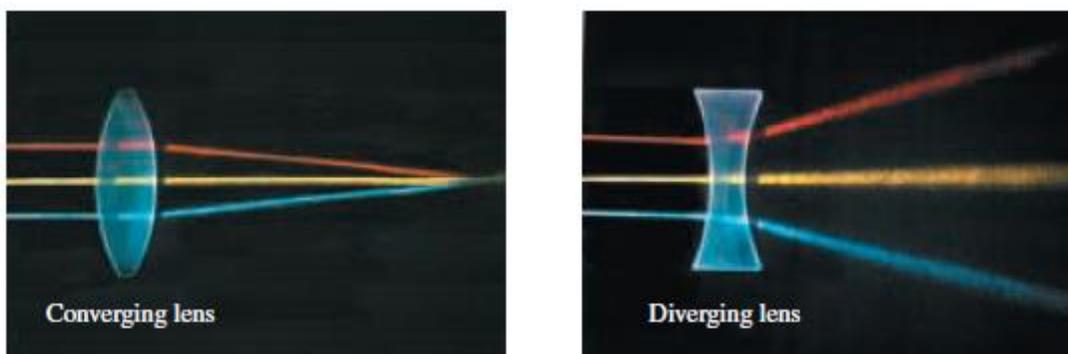


Figura 8: Dois tipos de lentes esféricas

Fonte: Knight (2016)

Na figura 8, estão representados dois tipos de lentes muito comuns. Na lente da esquerda, chamada de lente convergente, os raios de luz paralelos se encontram em um certo ponto após atravessarem a lente. Este ponto é conhecido como ponto focal e a distância entre o ponto focal e a lente é a distância focal. Na lente da direita, chamada de lente divergente, os raios de luz, inicialmente paralelos, afastam-se do eixo óptico da lente. O raio de luz que incide sobre o centro da lente não muda de direção ao refratar.

As lentes esféricas podem ser classificadas como lentes de bordas grossas e de bordas finas, como pode se observar na figura 9.

Tanto as lentes de bordas grossas, quanto as de bordas finas, podem ser convergentes ou divergentes. O que define a natureza da convergência ou divergência de tais lentes é o seu índice de refração em relação ao do meio em

que está inserido. Se o índice de refração relativo entre lente e meio é maior do que 1, ou seja, se a lente possui maior índice de refração do que o meio, as lentes de bordas finas são convergentes e as de bordas grossas divergentes. No caso contrário, em que o índice de refração do meio é maior do que o da lente, as lentes de bordas finas são divergentes e as de bordas grossas são convergentes.

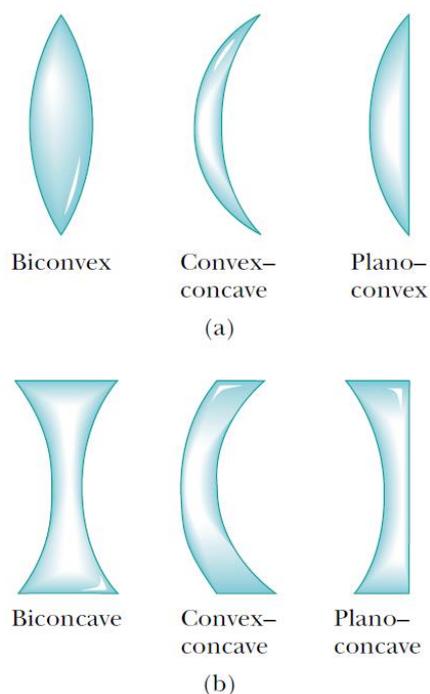


Figura 9: Tipos de lentes esféricas. Bordas finas (a), da esquerda para a direita: Biconvexa, côncavo-convexa e plano-convexa. Bordas grossas (b), da esquerda para a direita: Bicôncava, convexo-côncava e plano-côncava.

Fonte: Serway e Jewett (2004, p. 1145)

Na prática, a maioria das lentes possui uma espessura muito pequena, quase desprezível, é por isso que, no estudo da formação de imagem em lentes esféricas, é comum considerar que as lentes são delgadas, ou seja, que possuem espessura desprezível. O estudo analítico das lentes delgadas é conhecido como óptica gaussiana.

A figura 10 mostra, esquematicamente, a formação da imagem em uma lente convergente, em que “o” é a distância do objeto de altura A até a lente, “i” é a distância entre a lente e a imagem de altura B e “f” é a distância focal da lente.

Observando a figura 10b, é possível estabelecer uma relação de semelhança entre o triângulo de maior base ($i+o$) e altura ($A+B$) e outro de menor base (o) e menor altura (A):

$$\frac{A}{o} = \frac{A+B}{(o+i)} \rightarrow \frac{(A+B)}{A} = \frac{(o+i)}{o} \quad (15)$$

Na figura 10c, outro triângulo é formado, podendo também ser estabelecida uma relação de proporcionalidade entre os lados do maior e do menor triângulo:

$$\frac{A}{f} = \frac{A+B}{i} \rightarrow \frac{(A+B)}{A} = \frac{i}{f} \quad (16)$$

Combinando (16) e (17) e dividindo o resultado por i , temos que

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \quad (17)$$

A equação (18) é a equação das lentes delgadas, também conhecida como equação de Gauss (HUGGINS, 1999).

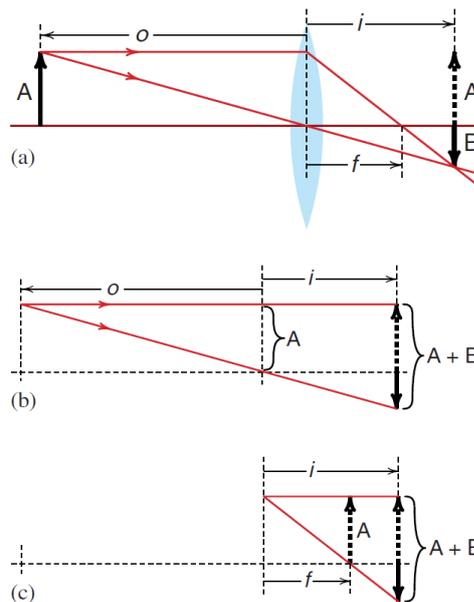


Figura 10: formação da imagem em uma lente delgada convergente

Fonte: Huggins (1999, p. 25)

3.5. Espalhamento da luz

Segundo Hecht (2017, p. 96), os processos de transmissão, reflexão e refração da luz são apenas manifestações macroscópicas do espalhamento da luz que ocorre em um nível submicroscópico. O espalhamento da luz consiste

na absorção e reemissão da luz por elétrons que se encontram nos átomos e moléculas que constituem os materiais.

Quando a luz viaja em um meio material, como o ar, as moléculas que o compõem se comportam como osciladores, as quais tem suas eletrosferas excitadas por fótons incidentes. As moléculas, então, absorvem o fóton e emitem imediatamente outro fóton com mesma frequência e comprimento de onda. Este processo é chamado de espalhamento elástico. Como as moléculas estão orientadas de maneira arbitrária, os fótons são espalhados em todas as direções (HECHT, 2017).

As amplitudes de vibração dos estados excitados e a amplitude da luz espalhada aumentam de acordo com a frequência, pois todas as moléculas possuem ressonâncias eletrônicas na faixa do ultravioleta. Quanto mais próxima a frequência de oscilação com a de ressonância, maior é a resposta do oscilador. Desta maneira, a luz violeta sofre mais espalhamento, seguida da luz azul, verde, amarela e assim por diante. Assim, um raio de luz que atravessa um gás deve apresentar uma luz majoritariamente vermelha no fim do espectro, enquanto a luz espalhada será na sua maioria azul, já que a luz solar não apresenta muita luz violeta em comparação com a azul (HECHT, 2017).

Plano de Aula - 1º Encontro²¹

1. Identificação

Nível de ensino	<i>Médio</i>
Ano	<i>2º</i>
Docente responsável	<i>Gustavo Bordignon Franz</i>
Modalidade	<i>Presencial</i>
Área do conhecimento	<i>Física</i>
Tema da aula	<i>Óptica Geométrica</i>
Título (Tópico) da aula	<i>Avaliação de Conhecimentos Prévios e Refração da luz</i>
Duração prevista	<i>80 min (2h/a de 40 min cada)</i>

2. Problema

Descobrir qual é o material utilizado na obra de Rashad Alakbarov, a partir da medida da velocidade da luz ao atravessá-lo.

3. Objetivos

- Discutir a influência da luz e de seus fenômenos na concepção de obras de arte contemporâneas.
- Refletir, a partir das percepções dos estudantes, o papel do estudo dos efeitos da luz na produção artística contemporânea.

4. Metodologia

Este encontro é dividido em duas aulas de 40 (quarenta) minutos cada. Na primeira delas, será proposta a situação-problema 1, em nível introdutório, levando-se em conta aspectos mais gerais da refração da luz. Pressupõe-se o seguinte desenvolvimento:

- a) apresentar aos alunos, por projeção multimídia, duas tomadas da pintura do artista contemporâneo Rashad Alakbarov, que integrou a exposição de artistas do Azerbaijão na galeria de arte *Phillips de Pury & Company*, em Londres (Figura 1), que utiliza a luz como principal meio de construção artística;
- b) investigar a opinião dos alunos sobre elementos constitutivos a obra, especialmente no que diz respeito a propriedades ópticas;

²¹ Elaborado com base em Ferreira e Filho (2019).

c) as imagens servirão como organizadores prévios para o ensino da refração da luz, pois mostram, de maneira geral e não inclusiva, duas situações em que a refração da luz é utilizada em contextos artísticos distintos;

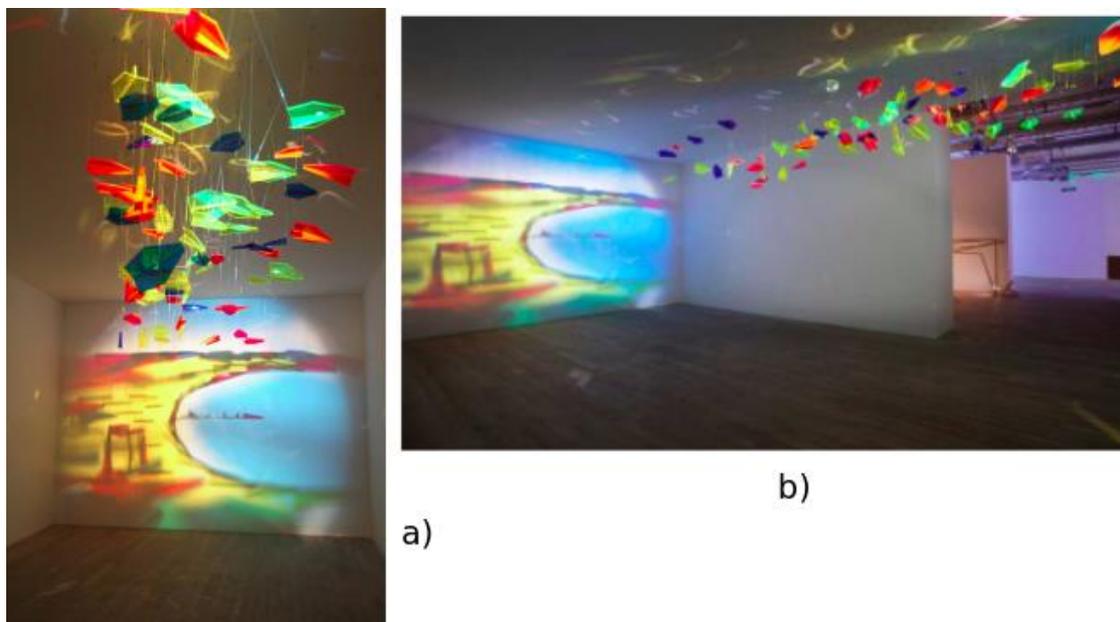


Figura 1: Obra de Rashad Alakbarov. a) vista de frente. b) vista lateral.

Fonte: Web²²

d) dois conjuntos de imagens serão projetadas em *datashow* para os estudantes, que se reunirão em grupos colaborativos, estimando-se um tempo aproximado de 20 (vinte) minutos para cada atividade de discussão;

e) ao final, como trabalho de retomada e síntese, e após a contemplação das obras pelos alunos, o professor pedirá que os estudantes produzam um descritivo de construção de uma obra similar, explicando como é possível obter os mesmos efeitos visuais que podem ser observados na imagem. Os descritivos devem conter um esquema de formação da imagem, materiais necessários e procedimentos de montagem da obra;

f) o professor pode mediar o processo de resolução da situação-problema, fazendo perguntas acerca da natureza dos materiais que compõem os materiais nas imagens, sobre a possibilidade da imagem corresponder a um tamanho maior do que os mesmos, sobre a influência do tipo de fonte de luz utilizada na composição das obras e sobre os raios de luz que são desviados. O professor

²² Rashad Alakbarov's Paintings Live in the Shadows of the Objects That Created Them. Disponível em: <<https://www.core77.com/posts/21613/Rashad-Alakbarovs-Paintings-Live-in-the-Shadows-of-the-Objects-That-Created-Them>> Acesso em 25 Jan. 2019.

deve salientar que os estudantes não devem se preocupar com um rigor científico na produção do material, devendo, por óbvio, utilizar suas próprias expressões verbais habituais;

g) após 15 (quinze) minutos do início da atividade, o professor recolherá os descritivos produzidos pelos grupos para análise posterior. Durante a realização desta primeira etapa da situação-problema, o professor deverá ficar atento às falas dos estudantes, buscando compreender como eles percebem as imagens que lhes foram mostradas;

h) apresentar uma nova imagem aos alunos (fotografias feitas pela fotógrafa Suzanne Saroff, que utiliza copos de água em sua série “Perspectiva”, para criar efeitos de fragmentação de imagens, como pode ser observado na Figura 2), novamente por projeção multimídia;



Figura 24: Fotografia de Suzanne Saroff

Fonte: Website da fotógrafa²³

i) nesta etapa, os estudantes contemplariam a nova imagem para, em seguida, responderem aos seguintes questionamentos, em grupos colaborativos, do professor acerca de sua formação: “O que faz com que a imagem fique distorcida desta forma?”; “Por que as imagens nos copos possuem tamanhos diferentes?”; “Por que, ao passar pela água, a luz se comporta de maneira diferente?”; “Quais são os meios de propagação da luz presentes nesta

²³ Suzanne Saroff – Disponível em <<https://www.hisuzanne.com/>> Acesso em 25 Jan. 2019.

imagem?"; "O que a água e o ar, por exemplo, tem de diferentes como meios de propagação da luz?";

j) o professor anotará algumas das respostas dos estudantes no quadro e as registrará em meios próprios para posterior análise. É interessante que o professor não interfira na discussão dos questionamentos, nesta etapa, para não influenciar nas respostas dadas pelos estudantes. Mesmo com alguns possíveis equívocos nas falas dos estudantes, a discussão destas questões é importante para visualizar de que maneira os fenômenos luminosos presentes na imagem são percebidos pelos estudantes;

k) o professor, então, pedirá que, em uma folha separada, cada grupo represente graficamente como a luz se propaga na situação da fotografia. Para facilitar o desenvolvimento dessa atividade, será desenhado esquema da situação e solicitado aos estudantes que nele representem os raios de luz ao passar do ar para a água e ao retornar para o ar, como mostra a Figura 3;

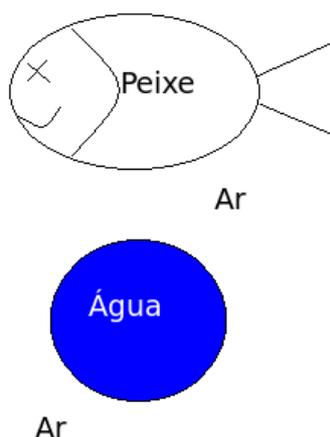


Figura 3: Sugestão de esquema da situação da fotografia.

Fonte: Elaborado pelo Autor

l) ao término da primeira aula, o professor recolherá todas as atividades realizadas pelos estudantes;

m) espera-se que, nas atividades realizadas na primeira aula, os estudantes percebam que o meio em que a luz se propaga influencia na sua propagação de alguma maneira. Não se espera, entretanto, que os alunos tenham a incorreta percepção de que a grandeza que varia de um meio para outro seja a velocidade da luz. Caso este conceito apareça, ele será indicativo de falhas no subsunçor e no avanço hierárquico da aprendizagem, pressupondo

a adoção de estratégias complementares e reorientadoras dos problemas de ensino aprendizagem;

n) na segunda aula, o professor rediscutirá a situação-problema 1, apresentando o vídeo (<https://www.youtube.com/watch?v=W0VvsM2vawU>) de uma experiência em que são colocadas duas setas, grafadas em um pequeno pedaço de papel e em frente a um copo, que é então preenchido com água, a partir do que é possível observar a mudança de orientação das setas quando a luz passa pela água;

o) o professor, então, terá oportunidade de investigar com os alunos hipóteses e discutir como ocorre o desvio dos raios de luz na situação do vídeo, já que, para compor imagens como as das figuras exibidas na primeira aula, o artista se aproveita do fenômeno da refração da luz, algo que acontece também no vídeo. A seguir, solicitará que os estudantes, baseando-se no que foi discutido, representem o desvio dos raios de luz nas situações das obras de arte;

Tabela 1: Índice de refração de alguns meios materiais.

Meio material	Índice de refração (n)
ar	1,00
água	1,33
vidro	1,50
glicerina	1,90
álcool etílico	1,36
diamante	2,42
acrílico	1,49

Fonte: Web²⁴

p) o professor discutirá sobre as causas do desvio sofrido pela luz ao trocar de meio, mostrando o que é a grandeza física chamada o índice de refração absoluto e sua relação com a velocidade da luz em diferentes meios. Mostrará que, ao passar de um meio menos refringente para um mais refringente, um raio de luz se aproxima da reta normal, pois a velocidade de propagação no meio mais refringente é menor. Mostrará como é feito o cálculo do índice de refração relativo entre dois meios diferentes e efetuará o cálculo do

²⁴ Disponível em: <<http://www.usp.br/massa/2013/qf12453/pdf/coloquiorefratometria-2013.pdf>> Acesso em: 30 Jun. 2019.

índice de refração relativo entre o ar e a água. Após esta discussão, será solicitado aos alunos que descubram qual é o material das peças utilizadas na montagem presente na Figura 1, sabendo que a velocidade da luz no material é correspondente a $2,01 \times 10^8$ m/s e tendo a disposição uma tabela, como a da Tabela 1, contendo alguns meios materiais e seus respectivos índices de refração.

4. Recursos necessários

Quadro, pincel, projetor multimídia e computador.

5. Proposta de Avaliação

Entre a primeira e a segunda aula, o professor analisará as atividades entregues na primeira aula, buscando evidências de que as imagens, como organizadores prévios, resgataram ou introduziram os subsunçores necessários para a segunda aula na estrutura cognitiva dos estudantes.

Na atividade do item e)/f), procura-se investigar a presença dos seguintes subsunçores: (I) desvio da luz; (II) princípio da propagação retilínea da luz; (III) interferência do meio material na propagação da luz; (IV) ordem “fonte-objeto-anteparo” na formação de uma imagem; (V) fontes de luz.

Indicadores da presença dos subsunçores, a partir de itens presentes no descritivo produzido pelos estudantes:

- (I) e (III) – Qualquer representação, gráfica ou escrita, da mudança na direção de propagação de raios de luz ao atravessar um objeto;
- (II) – Representação de raios de luz se propagando em trajetória retilínea bem definida, contendo direção e sentido da propagação;
- (IV) – Disposição da fonte de luz, objeto e anteparo na representação da formação da pintura. Dois casos esperados – (a) se a ordem é correta e apresenta todos os elementos e (b) se a ordem é correta, porém, apenas fonte e objeto são representados. No caso (b), uma retomada da formação de uma imagem real é necessária no decorrer das próximas aulas;
- (V) – presença de qualquer tipo de fonte de luz primária, lâmpada ou fogo por exemplo, no esquema de formação da imagem.

A atividade descrita em i) tem como objetivo verificar a existência de conexão entre os subsunçores da primeira atividade na estrutura cognitiva. Nas respostas das perguntas “O que faz com que a imagem fique distorcida desta

forma?”, “Por que as imagens nos copos possuem tamanhos diferentes?” e “Por que, ao passar pela água, a luz se comporta de maneira diferente?”, espera-se notar a percepção do desvio da luz como consequência da mudança de meio material, a partir das falas dos estudantes durante a mediação. Espera-se também, a partir das respostas da questão “O que a água e o ar, por exemplo, tem de diferentes como meios de propagação da luz?” a inconexão da velocidade da luz como propriedade distinguível entre os meios, provavelmente a maioria das respostas oscilará em torno da densidade ou estrutura química dos meios materiais. A pergunta “Quais são os meios de propagação da luz presentes nesta imagem?” tem como objetivo expor a clareza com que os meios são identificados a partir de uma imagem. Espera-se que a maioria dos estudantes responda que os únicos meios existentes são o ar e a água, desprezando os recipientes de vidro que contém a água como dispositivos capazes de causar desvio nos raios de luz.

Na atividade descrita em k), espera-se que os estudantes realizem dois tipos de representação dos raios de luz:

1. Os raios de luz emergem do peixe e passam do ar para a água sem desvio, ocorrendo apenas na mudança da água para o ar;
2. Os raios de luz emergem do peixe passam do ar para a água e, novamente, da água para ar apresentando desvio nas duas mudanças de meio de material.

No caso de 1, infere-se que a interação da nova informação, proveniente da mediação em i) e da apresentação da Figura 3, com os subsunçores criou significados na estrutura cognitiva preexistente dos estudantes, porém, ainda são necessárias novas experiências e confronto de ideais para que ocorra a ressignificação do fenômeno da refração da luz. No caso de 2, pode-se inferir que ocorreu a reconciliação integrativa dos subsunçores referentes ao desvio da luz e aos meios materiais, que se recombinaaram, cansando a compreensão do fenômeno da refração da luz.

A atividade sugerida em o) serve para verificar se houve diferenciação progressiva na forma de representação da refração da luz. Espera-se que após a discussão do vídeo ocorra a interação entre as novas informações e os subsunçores, já modificados previamente pelas primeiras discussões. Desta maneira, os estudantes devem representar corretamente o desvio dos raios de

luz na mudança de meio de propagação da luz. Um indicador da diferenciação progressiva neste caso é a comparação entre a produção em o) e k). Espera-se que haja uma diferença notável entre as duas representações, pois em o) os estudantes são confrontados com novas informações, ancoradas no que foi feito em k) para a formulação de novos significados.

Em p) ocorre a conclusão da situação-problema 1, com a identificação do material das peças utilizadas na pintura do artista Rashad Alakbarov. Espera-se que os estudantes concluam que o material é acrílico, com índice de refração igual a 1,49.

Ao final da segunda aula, os estudantes deverão produzir em casa um mapa mental online no site www.popplet.com contendo palavras que possuam alguma relação com o que foi observado no decorrer das atividades e mediado pelo professor em sala de aula. Esse mapa mental deve ser enviado até o fim do dia. Espera-se que os estudantes conectem conceitos-chave acerca da refração da luz, como meio material, desvio da luz, índice de refração, entre outros. Pode-se ter uma noção da estrutura cognitiva dos estudantes ao fim do primeiro encontro. Quanto maior é o número de ligações entre diferentes conceitos, melhor é o entendimento do estudante acerca das relações entre esses conceitos e, conseqüentemente, mais significativa é a sua aprendizagem.

Plano de Aula - 2º Encontro²⁵

1. Identificação

Nível de ensino	<i>Médio</i>
Ano	<i>2º</i>
Docente responsável	<i>Gustavo Bordignon Franz</i>
Modalidade	<i>Presencial</i>
Área do conhecimento	<i>Física</i>
Tema da aula	<i>Óptica Geométrica</i>
Título (Tópico) da aula	<i>Leis da Refração e ângulo crítico</i>
Duração prevista	<i>80 min (2h/a de 40 min cada)</i>

2. Problema

Como descobrir qual é o melhor modelo de fibra óptica na hora de se instalar uma internet por fibra? (Determinar os materiais que constituem uma fibra óptica com menor ângulo crítico.)

3. Objetivos

- Discutir a física presente no *mobile game* “Glass”, com base nas observações feitas por estudantes ao jogá-lo.
- Discutir a influência das leis da refração no desaparecimento de um peixe em um aquário esférico.

4. Metodologia

Este encontro é composto por duas aulas, cada uma com duração de 40 (quarenta) minutos. Na segunda aula, é introduzida a situação-problema 2, com grau de inclusividade maior do que a situação-problema 1. Sugere-se os seguintes passos para o desenvolvimento do encontro:

a) o professor organizará os estudantes em grupos colaborativos, garantido que cada grupo contenha pelo menos um *smartphone* com o *mobile game Glass*²⁶ instalado. Cada grupo será encarregado de resolver uma etapa do *game*, sendo que nas etapas é possível observar diversos conceitos que foram

²⁵ Elaborado com base em Ferreira e Filho (2019).

²⁶ *Game* de *smartphone* lançado em 2014 pela empresa Cube3rd. Se trata de um jogo de quebra cabeças, em que o objetivo principal é conectar raios de luz emitidos por uma fonte até um receptor. Para isso, o jogador dispõe, em cada nível, de dispositivos ópticos para mudar a trajetória dos raios de luz.

e serão ensinados como, por exemplo, reflexão da luz em espelhos planos, refração da luz em lentes convergentes e divergentes, ângulo limite e reflexão total da luz;

b) as etapas do *game* assumem papel de organizador prévio, pois apresentam, de maneira geral e não inclusiva, aspectos acerca da refração da luz que serão discutidos nos próximos encontros, como lentes esféricas e dispersão da luz em prismas, por exemplo;

c) cada grupo deverá resolver uma etapa diferente do *game*, sendo que o número total de etapas resolvidas depende do número de grupos formados. Desta forma, sugere-se que sejam indicadas etapas, alternando-se entre os mundos *Convergence* e *Divergence*, que são constituídos por 8 (oito) etapas distintas, com nível de dificuldade gradual. Para melhor visualização do grau de dificuldade de cada etapa, um solucionário pode ser acessado em <<https://game-solver.com/glass-puzzle-game-by-cube3rd-solutions/>>;

d) os estudantes deverão identificar todos os objetos utilizados para mudar a trajetória da luz e formular teorias para explicar o seu funcionamento. Também devem mostrar quais conceitos da óptica geométrica são utilizados para compreender os fenômenos observados dentro do *game* e se existe algum equívoco na física presente no *game*;

e) uma pequena apresentação das conclusões do grupo ao resolver a etapa do *game* será feita para o professor, que atentarà às falas dos estudantes, exigindo-se mais acuidade conceitual em relação à forma como se conduziu discussão análoga no encontro anterior e registrando-se, nos devidos meios, cada apresentação para posterior análise;

f) ao fim da atividade, o professor discutirá as leis da refração com os estudantes, retomando uma etapa do *game* como exemplo, identificando a reta normal, o raio incidente, refletido e seus respectivos ângulos. Mostrarà também, no âmbito do *game*, a lei de Snell-Descartes e seu diagrama usual de representação da interface entre dois meios, ressaltando que um ângulo de incidência de noventa graus não causa refração da luz. Mostrarà, também, a importância da segunda lei da refração como método de determinação, a partir do índice de refração, de materiais desconhecidos.

g) após esta discussão, o professor solicitarà que os estudantes descubram, a partir da projeção multimídia da etapa “*Divergence_1*” (Figura 4),

qual seria o material que compõe um dos meios observados no *game* (dado um conjunto conhecido de materiais discriminados por seus índices de refração), quando o raio de luz verde emerge da lente divergente, assumindo que o ângulo de incidência é de 30 graus e o de refração é de 60 graus, e por que o raio de luz vermelho não sofre desvio ao emergir da lente;

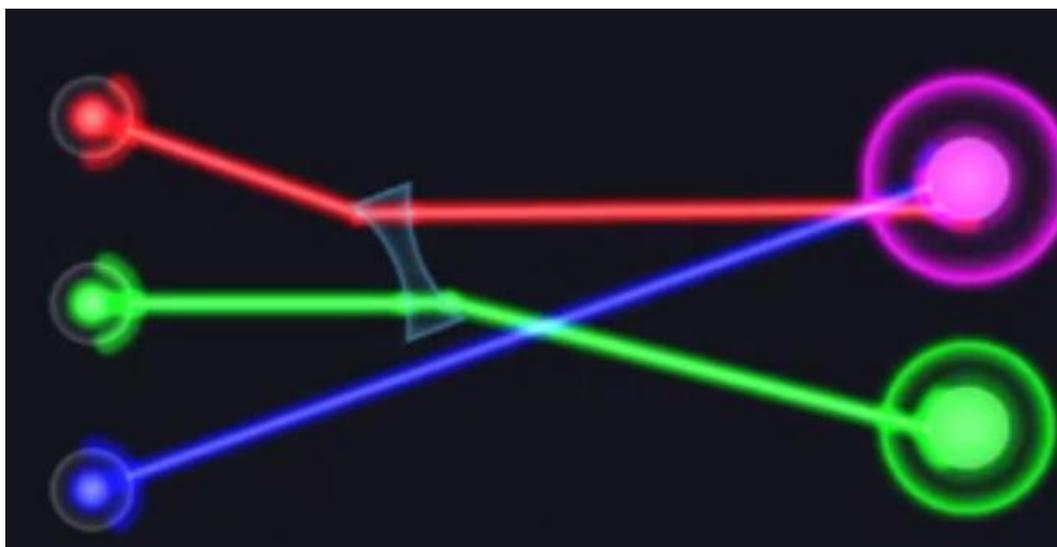


Figura 4: Etapa *Divergence_1* do *mobile game Glass*.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

h) na segunda aula, será proposta a situação-problema 2 em nível mais alto de complexidade, levando-se em conta que a aprendizagem significativa é progressiva. O professor apresentará o vídeo (http://youtu.be/FO5v_tQANZE), retirado da dissertação de mestrado de Lopes (2014), intitulada “Refração e o Ensino de Óptica”. O vídeo mostra um peixe se movendo dentro de um aquário esférico, quando se aproxima das laterais do aquário desaparece e volta a aparecer quando se move em direção ao centro.

i) o professor, então, solicitará que, em uma folha separada, os estudantes, organizados em trios, representem graficamente como a luz se propagaria na situação do vídeo. Para facilitar o desenvolvimento dessa atividade, será desenhado um esquema da situação e solicitado aos estudantes que nele representem os raios de luz que chegam aos olhos do observador, como mostra a Figura 5.

j) ao fim da atividade, o professor recolherá as representações gráficas feitas pelos estudantes, para posterior análise.

k) o professor, então, discutirá com os estudantes o fenômeno da reflexão total da luz, retomando a etapa *divergence_2* do *game*, na qual o fenômeno da reflexão total em uma lente divergente é observado. Mostrará as condições necessárias para que a reflexão total da luz aconteça e mostrará como é feita a determinação do ângulo crítico. Solicitará, então, que os estudantes refaçam, em uma folha separada a atividade proposta em h) e que a entreguem ao professor, para posterior análise.

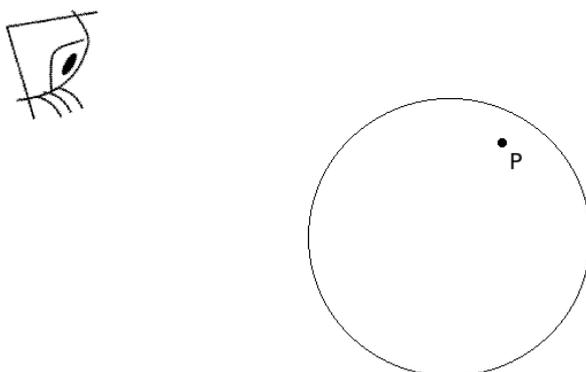


Figura 5: Esquema de representação da situação do vídeo. P é o ponto onde o peixe se localiza.

Fonte: Elaborado pelo autor.

l) a seguir, será apresentado o vídeo (https://www.youtube.com/watch?v=0MwMkBET_5l) do canal “*engineerguy*”, que mostra o funcionamento de cabos de fibra óptica, uma aplicação tecnológica do fenômeno da reflexão total da luz. Com base no vídeo, o professor discutirá brevemente com os estudantes alguns usos da fibra óptica e solicitará que eles descubram que materiais podem ser utilizados nas camadas externas e internas para fabricar uma fibra óptica com o menor ângulo crítico, tendo como base uma tabela com alguns meios materiais e seus respectivos índices de refração (Tabela 1). Conforme os estudantes concluem que materiais deverão ser utilizados para resolver o problema, o professor os questionará sobre a possibilidade real de criar uma fibra óptica com os materiais fornecidos.

m) após o recolhimento das atividades, o professor discutirá com os estudantes que tipos de materiais que são razoáveis na construção de fibras ópticas e para que caminhos converge esta indústria atualmente.

5. Recursos necessários

Pincel, quadro, projetor multimídia, computador e tablets ou *smartphones* (para os alunos).

6. Proposta de Avaliação (com referencial teórico)

A atividade proposta em d) e e) tem como objetivo identificar, na estrutura cognitiva prévia dos estudantes, evidências da presença de subsunçores que serão utilizados como ancoragem para o ensino das leis da refração. Desta maneira, espera-se que, em suas falas, os estudantes utilizem expressões verbais com linguagem mais técnica para explicar a refração da luz do que a observada no primeiro encontro. Procura-se investigar a presença dos seguintes subsunçores: (I) interfaces entre meios materiais; (II) lentes esféricas; (III) refração da luz.

Indicadores de presença dos subsunçores na fala dos estudantes:

- (I) e (III) – Se os estudantes falarem que a luz desvia, ou refrata, ao passar de um meio para outro. Espera-se que este subsunçor esteja presente na estrutura cognitiva dos estudantes, devido ao que foi discutido e mediado no primeiro encontro.
- (II) – Se um dos dispositivos que é utilizado para alterar a trajetória da luz é identificado como lente. Espera-se que os estudantes não façam distinção entre lentes convergentes e divergentes.

Na atividade g), é esperado que os estudantes descubram que o meio material é o ar, com índice de refração aproximadamente igual a 1. Caso isto ocorra, infere-se que a ancoragem da nova informação nos subsunçores causou a diferenciação progressiva na compreensão do fenômeno da refração da luz. Espera-se que alguns estudantes tenham dificuldade em realizar a atividade e, provavelmente, não descubram que o meio material é o ar. Neste caso, a nova informação interagiu com os subsunçores, porém, ainda são necessárias mais discussões acerca do tema em diferentes contextos para que ocorra a ressignificação da lei de Snell-Descartes. Também se espera que a maioria dos estudantes perceba que o raio vermelho não sofre desvio ao emergir da lente por ser perpendicular à superfície.

Na atividade em i), espera-se que a maioria dos estudantes represente raios de luz que não atingem os olhos do observador. Espera-se também que não consigam representar devidamente que uma parcela dos raios é refletida,

pois ainda não assimilaram a informação acerca do fenômeno da reflexão total da luz. Entretanto, espera-se que os raios de luz sejam representados com trajetórias retilíneas e que sofram desvio ao passar da água para o ar, evidenciando que as discussões do primeiro encontro ainda estão presentes em sua estrutura cognitiva. Já a retomada da atividade i), após a discussão em k), tem como objetivo verificar se houve diferenciação progressiva do fenômeno da reflexão total da luz. Espera-se que após a discussão da etapa do *game* ocorra a interação entre as novas informações e os subsunçores, modificados previamente pela atividade presente em i). Assim, os estudantes devem representar uma parcela dos raios de luz refletindo totalmente dentro do aquário. Um indicador da diferenciação progressiva neste caso é a comparação entre as produções em i) e k). Espera-se que haja uma diferença notável entre as duas representações, pois em k) os estudantes são confrontados com novas informações, ancoradas no que foi feito em i) para a formulação de novos significados.

Em l), espera-se que os estudantes concluam que a fibra óptica que produz o menor ângulo crítico é composta com diamante na camada externa e glicerina na camada interna.

Plano de Aula - 3º Encontro²⁷

1. Identificação

Nível de ensino	<i>Médio</i>
Ano	<i>2º</i>
Docente responsável	<i>Gustavo Bordignon Franz</i>
Modalidade	<i>Presencial</i>
Área do conhecimento	<i>Física</i>
Tema da aula	<i>Óptica Geométrica</i>
Título (Tópico) da aula	<i>Dispersão e Espalhamento da luz</i>
Duração prevista	<i>80 min (2h/a de 40 min cada)</i>

2. Problema

Por que o céu é azul durante a maior parte do dia e vermelho quando o sol está se pondo?

3. Objetivos

Refletir acerca da influência da refração da luz no processo de formação de arco-íris.

Discutir a relação dos fenômenos luminosos com a coloração do céu.

4. Metodologia

Este encontro é composto por duas aulas, cada uma com duração de 40 (quarenta) minutos. Pressupõe-se os seguintes passos para o desenvolvimento:

a) o professor organizará os estudantes em grupos colaborativos, garantido que cada grupo contenha pelo menos um *smartphone* com o *mobile game* “*Glass*” instalado. Cada grupo será encarregado de resolver uma etapa do *game*, sendo que nas etapas é possível observar diversos conceitos que serão ensinados como, por exemplo, o fenômeno da dispersão da luz.

b) as etapas do *game* assumem papel de organizador prévio, pois introduzem aos estudantes, de maneira geral e não inclusiva, aspectos a respeito dos fenômenos luminosos.

²⁷ Elaborado com base em Ferreira e Filho (2019).

c) cada grupo ficará encarregado de solucionar uma etapa do *game*, constituinte do mundo “Dispersion”. As questões estão dispostas em nível gradual de dificuldade.

d) os estudantes deverão identificar o dispositivo utilizado para separar os raios de luz, formulando teorias para explicar o funcionamento deste dispositivo.

e) após decorridos 15 (quinze) minutos do início da atividade, os estudantes devem realizar breves apresentações das teorias formuladas para o professor.

f) após esta atividade inicial, o professor discutirá com os estudantes o fenômeno da dispersão da luz, comentando acerca da relação entre o desvio sofrido por cores distintas e sua respectiva velocidade de propagação e raios de luz monocromáticos.

g) ao fim da discussão, o professor realizará uma adaptação da demonstração sugerida em Axt, R. (1990). Laboratório caseiro: Dispersão da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 7(3), 225-226. Nesta demonstração, um espelho côncavo é imerso em uma bacia com água e, com a lanterna de um celular localizado fora da água, ilumina-se o espelho submerso. Por causa da dupla refração, ar-água e água ar, é possível observar a dispersão da luz da lanterna projetada no teto da sala de aula, que deve estar com as luzes desligadas para melhor visualização.

h) o professor, durante a demonstração, solicitará que os estudantes respondam os seguintes questionamentos em uma folha separada: (1) Por que o fenômeno observado apenas acontece quando o espelho está imerso na água? (2) Qual é o tipo de raio de luz proveniente da lanterna do celular?

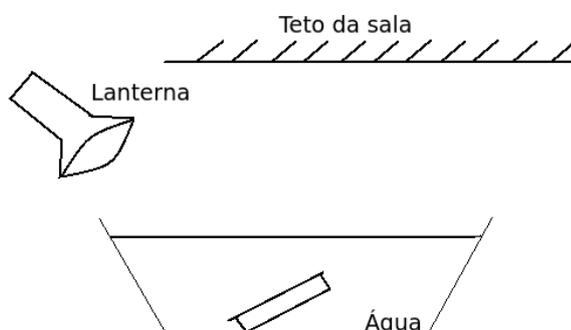


Figura 6: esquema do experimento a ser representado no quadro

Fonte: elaborado pelo autor

i) também será solicitado que os estudantes representem graficamente os raios de luz na situação da demonstração, tendo como base um esquema desenhado no quadro pelo professor, Figura 6.

j) ao término da primeira aula, o professor recolherá todas as atividades realizadas pelos estudantes.

k) na segunda aula, o professor retoma inicialmente a discussão da primeira aula, complementando com informações acerca da formação do arco-íris.

l) é solicitado que os estudantes, em uma folha separada, representem a dispersão dos raios de luz em uma gota de água. Para facilitar o desenvolvimento dessa atividade, será desenhado um esquema da situação, Figura 7.

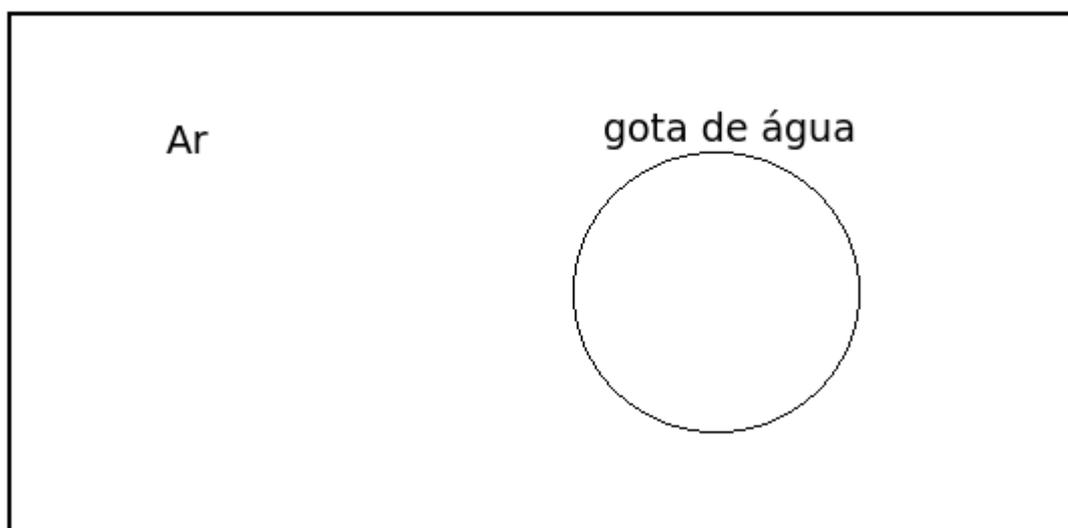


Figura 7: Representação da gota de água.

Fonte: Elaborado pelo autor

m) na sequência, o professor pergunta aos estudantes: “por que o céu é azul?”. Então, atentar-se para as respostas dos estudantes, registrando-as nos meios necessários para posterior análise.

n) em sequência a essa mediação inicial, será realizado o experimento descrito em Ortiz, A. J., Laburú, C. E., & da Silva, O. H. M. (2010). Proposta simples para o experimento de espalhamento Rayleigh. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(3), 599-608. Neste experimento, uma lanterna é posicionada em frente a um recipiente transparente contendo uma solução de

água com algumas gotas de leite e ligada. Pode-se observar que a luz, ao atravessar o recipiente, possui uma cor azulada. Se um anteparo for colocado atrás do recipiente, uma luz mais avermelhada pode ser observada. Caso o professor não tenha os recursos necessários para a realização do experimento, poderá mostrar o vídeo <https://www.youtube.com/watch?v=sDcWsx00O48>, em que um experimento semelhante é realizado.

o) apoiando-se na realização do experimento, o professor discutirá com os estudantes o fenômeno do espalhamento da luz.

p) após a discussão, o professor retoma a pergunta lançada no começo da aula, com um detalhe complementar: além da coloração do céu em um dia sem nuvens, os estudantes devem explicar por que o céu assume uma coloração avermelhada no nascer e pôr do sol. Os estudantes devem anotar as suas teorias em uma folha separada, que será entregue ao professor no término da aula.

5. Recursos necessários

Pincel, quadro, projetor multimídia, computador, Tablets ou *smartphones* (para os alunos), lanterna, bacia, espelho côncavo,

6. Proposta de Avaliação (com referencial teórico)

A atividade em d) e e) tem como objetivo introduzir o conceito de prisma, dispersão da luz e luz monocromática e policromática. Espera-se que os estudantes identifiquem que os raios de luz são separados em raios de cores diferentes ao atravessar pelo prisma, introduzindo a noção de dispersão da luz. Nas explicações contendo estes elementos, infere-se que os subsunçores necessários para o ensino da dispersão da luz estão presentes na estrutura cognitiva dos estudantes.

A atividade em h) e i) é realizada logo após uma breve discussão sobre dispersão da luz. Espera-se que os estudantes percebam que a dispersão da luz aconteça apenas quando houver refração da luz, ou seja, espera-se que, como resposta da questão (1), a maioria dos estudantes respondam que é devido à refração da luz na água. Também é esperado que na questão (2), os estudantes identifiquem que a luz é policromática, semelhante à luz do sol, pois ela se dispersa ao refratar. Em ambas respostas esperadas em h), pode-se inferir que a estrutura cognitiva dos estudantes, previamente modificada por causa de d) e e) interagiu com as novas informações, causando a diferenciação progressiva

do conceito de dispersão da luz. Em i) se espera que as representações sejam apresentadas, em sua maioria, de três maneiras diferentes:

- Caso 1: Os raios de luz provenientes da lanterna se dispersam na primeira refração, ar-água, refletem no espelho e aumentam o espaçamento entre si na segunda refração, água-ar. Neste caso, pode-se inferir que ocorreu a reconciliação integrativa dos subsunçores referentes a luz monocromática e a refração da luz, que se recombinaram, causando a compreensão do fenômeno da dispersão da luz.
- Caso 2: Os raios de luz provenientes da lanterna se dispersam apenas na primeira ou na segunda refração. Neste caso, infere-se que a interação da nova informação com os subsunçores criou significados na estrutura cognitiva preexistente dos estudantes, porém, ainda são necessárias novas experiências e confronto de ideias para que ocorra a ressignificação do fenômeno da dispersão da luz.
- Caso 3: Os raios de luz não dispersam nas refrações, mas sim ao refletirem no espelho. Neste caso, o estudante não reconfigurou sua estrutura cognitiva preexistente em nenhuma das atividades anteriores. São necessárias novas discussões a respeito da dispersão da luz.

Em l), espera-se que os estudantes representem corretamente a dispersão dos raios de luz na gota de água, compreendendo como é formado o arco-íris.

Na proposta de situação-problema 3, em m), espera-se que, nesta atividade inicial, os estudantes apresentem muitas noções equivocadas a respeito da coloração do céu durante o dia, provavelmente apoiadas no senso comum. Esta atividade tem como objetivo verificar se os estudantes possuem alguma explicação prévia, mesmo que equivocada, para a coloração azul do céu em sua estrutura cognitiva.

Após a realização do experimento em o), a atividade em p) tem como objetivo investigar se as discussões causaram a assimilação do fenômeno do espalhamento da luz. Espera-se que os estudantes consigam explicar a coloração do céu nas duas situações propostas, tendo em vista que a nova

informação, apresentada em o), interaja com a estrutura cognitiva dos estudantes, apoiando-se no conhecimento prévio dos fenômenos luminosos, alterando-o.

Plano de Aula - 4º Encontro²⁸

1. Identificação

Nível de ensino	<i>Médio</i>
Ano	<i>2º</i>
Docente responsável	<i>Gustavo Bordignon Franz</i>
Modalidade	<i>Presencial</i>
Área do conhecimento	<i>Física</i>
Tema da aula	<i>Óptica Geométrica</i>
Título (Tópico) da aula	<i>Lentes esféricas e óptica da visão</i>
Duração prevista	<i>120 min (3h/a de 40 min cada)</i>

2. Problema

Que tipo de lente uma pessoa deve utilizar para corrigir defeitos da visão como miopia e hipermetropia?

3. Objetivos

Refletir acerca do uso de lentes esféricas na correção de problemas da visão.

4. Metodologia

Este encontro é composto por três aulas, cada uma com duração de 40 (quarenta) minutos. Pressupõe-se os seguintes passos para o desenvolvimento:

- o professor mostrará para os alunos, por meio de projeção multimídia, duas etapas do *game Glass*, onde é possível observar uma lente do tipo divergente e outra do tipo convergente;
- durante a projeção das duas etapas, *Convergence_0* e *Divergence_0*, Figura 8, o professor solicitará que os estudantes diferenciem o desvio sofrido pelos raios de luz ao passar em uma lente convergente e em outra divergente, registrando as respostas nos devidos meios;
- após esta mediação introdutória e considerando que aprendizagem é progressiva, o professor discutirá sobre os tipos de lentes esféricas que existem, as condições para que uma lente seja considerada convergente

²⁸ Elaborado com base em Ferreira e Filho (2019).

ou divergente e os elementos geométricos que formam uma lente esférica;

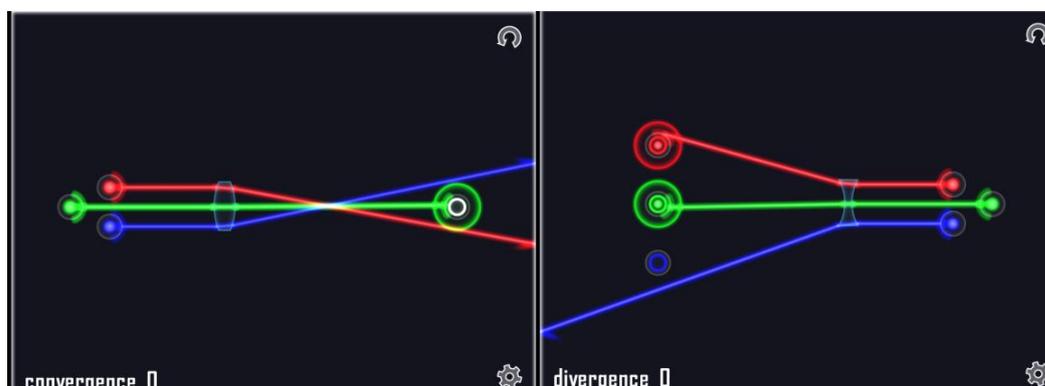


Figura 8: Etapas Convergence_0 e Divergence_0

Fonte: Elaborado pelo Autor

- d) após esta mediação introdutória e considerando que aprendizagem é progressiva, o professor discutirá sobre os tipos de lentes esféricas que existem, as condições para que uma lente seja considerada convergente ou divergente e os elementos geométricos que formam uma lente esférica;
- e) em seguida à discussão, o professor solicitará que os estudantes, organizados em grupos colaborativos, identifiquem, em uma folha separada e no âmbito do *game*, se a lente esférica ou o meio possui o maior índice de refração;
- f) ao fim da primeira aula, o professor recolherá todas as atividades;
- g) na segunda aula, o professor retomará os assuntos discutidos na primeira aula. Considerando a diferenciação progressiva, o aplicativo de *smartphone* “*Ray Optics*” será utilizado para discutir o processo de formação de imagem em lentes esféricas, destacando os aspectos geométricos da formação da imagem;
- h) em sequência a esta discussão inicial, o professor mostrará, por meio de projeção multimídia, um objeto localizado em frente a uma lente divergente, Figura 9, e solicitará que os estudantes, organizados em grupos colaborativos e em uma folha separada, determinem as características da imagem formada nesta situação;

- i) após a realização da atividade, o professor discutirá brevemente a determinação das características da imagem de maneira analítica, por meio da equação de Gauss;
- j) ao final da segunda aula, o professor recolherá todas as atividades realizadas;

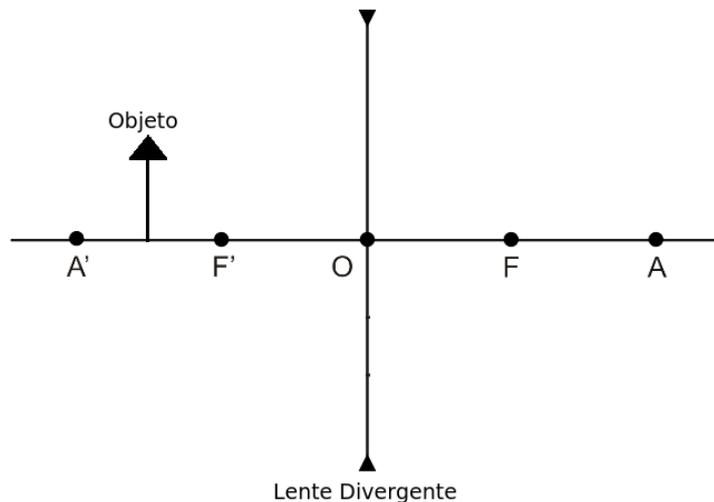


Figura 9: Objeto em frente a uma lente divergente.

Fonte: Elaborado pelo autor

- k) o professor iniciará a terceira aula mostrando o vídeo (<https://www.youtube.com/watch?v=PFtVO-A7M5E>), que tem papel de organizador prévio, pois, de maneira geral e não inclusiva, introduz os estudantes à anatomia do olho humano, que servirá de subsunçor (partes que integram o olho) para a ancoragem dos defeitos da visão;
- l) em sequência ao vídeo, o professor discutirá com os estudantes como o cristalino do olho humano pode ser interpretado como uma lente convergente e como a imagem é formada na retina;
- m) como intuito de diversificar a discussão do item anterior, o vídeo (<https://www.youtube.com/watch?v=6YxffFmi4Eo>) será reproduzido para os estudantes. O vídeo explica de maneira visual e simples como a imagem é formada na retina e quais são os defeitos da visão²⁹;
- n) após as discussões iniciais provocadas pelos vídeos, o professor mostrará, por meio de projeção multimídia, um esquema de formação de

²⁹ Caso os estudantes se interessem por outros defeitos da visão, como presbiopia e astigmatismo, sugere-se que o professor consulte Knight (2016, p. 1002) para mais detalhes.

imagem em um olho humano com miopia e um outro com hipermetropia, Figura 10;

- o) será solicitado que os estudantes, organizados em grupos colaborativos, formulem teorias para explicar qual tipo de lente que seria mais adequado para corrigir cada tipo de defeito da visão, representando os raios de luz em cada caso e registrando em uma folha separada;
- p) ao final da aula, o professor recolherá todas as atividades;

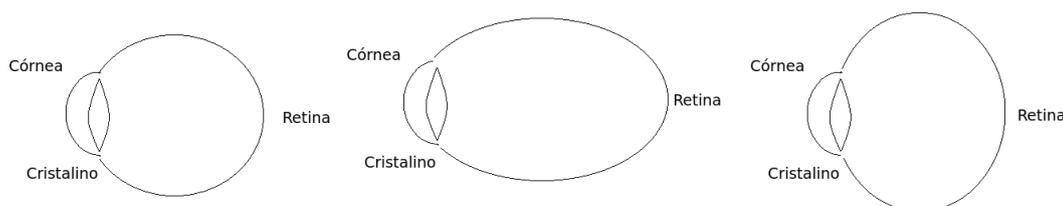


Figura 10: esquema do olho humano a ser mostrado à turma pelo professor, à esquerda, um olho sem nenhum tipo de defeito da visão; ao centro, um olho com miopia; à direita, com hipermetropia.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5. Recursos necessários

Pincel, quadro, projetor multimídia, computador.

6. Proposta de Avaliação (com referencial teórico)

Espera-se que na atividade proposta em b), os estudantes consigam diferenciar uma lente convergente de uma divergente a partir do padrão de refração de luz criado por ambas. Entretanto, não se espera que a linguagem técnico-científica seja utilizada pelos estudantes, uma vez que estes assuntos ainda não foram discutidos.

A atividade proposta em d) serve para determinar se houve interação entre a nova informação na qual os estudantes foram expostos e sua estrutura cognitiva. Espera-se que a maioria dos estudantes afirme que a lente esférica no *game* possui maior índice de refração que o meio. Caso isto não aconteça, serão necessárias discussões futuras acerca desse assunto.

Em g), o intuito da atividade é buscar evidências da diferenciação progressiva. Aqui, em uma situação ideal, espera-se que a maioria dos estudantes consiga representar corretamente a imagem formada pela lente divergente. Entretanto, caso a maioria não consiga, o professor poderá, logo

após a atividade, realizar uma nova discussão sobre a formação das imagens em lentes esféricas.

Em n) se espera que a maioria dos estudantes consigam perceber que as lentes divergentes são apropriadas para corrigir a miopia e as convergentes para a hipermetropia. Caso o que é esperado não aconteça, o professor retomará a discussão sobre lentes esféricas e defeitos da visão.

Plano de Aula - 5º Encontro³⁰

1. Identificação

Nível de ensino	<i>Médio</i>
Ano	<i>2º</i>
Docente responsável	<i>Gustavo Bordignon Franz</i>
Modalidade	<i>Presencial</i>
Área do conhecimento	<i>Física</i>
Tema da aula	<i>Avaliação da UEPS</i>
Duração prevista	<i>40 min</i>

2. Objetivos

Avaliar, de maneira geral, a eficácia da UEPS

3. Metodologia

Esse é o encontro final da UEPS e tem como foco central uma avaliação dos encontros, por meio de perguntas direcionadas aos alunos que devem ser respondidas individualmente e de maneira discursiva. Sugere-se que sejam feitos para os estudantes os seguintes questionamentos:

Questão 1: Por que, ao observar o fundo de uma piscina quando estamos na sua beirada, ela parece ser mais rasa do que realmente é?

Questão 2: Por que um peixe em um aquário esférico desaparece quando se aproxima das laterais do aquário?

Questão 3: Explique, com as suas palavras, como funciona uma fibra óptica.

Questão 4: Por que as nuvens são brancas?

Questão 5: Por que a água concentrada em grandes quantidades, nos oceanos por exemplo, apresenta uma cor azul?

Questão 6: Qual é a lente que deve ser utilizada por uma pessoa que não consegue ver o seu amigo que se encontra do outro lado de uma rua?

4. Recursos Necessários

Pincel, quadro, projetor multimídia.

³⁰ Elaborado com base em Ferreira e Filho (2019).

5. Proposta de Avaliação

A questão 1 tem como função identificar indícios de que se, após a aplicação da UEPS, os estudantes aprenderam significativamente o fenômeno da refração da luz.

A questão 2 e 3, tem como função verificar indícios da aprendizagem significativa do fenômeno da reflexão total da luz e uma de suas principais aplicações tecnológicas.

A questão 4 e 5 tenta encontrar indícios da aprendizagem significativa do fenômeno da dispersão da luz.

A questão 6 tem como função identificar se houve indícios da aprendizagem significativa das lentes esféricas e suas aplicações na correção de problemas da visão.

Referências

- ANDERSON, J. L.; BARNETT, M. Learning physics with digital game simulations in middle school science. *Journal of science education and technology*, v. 22, n. 6, p. 914-926, 2013.
- AUSUBEL, D. P. *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.
- AUSUBEL, D. P.; ROBINSON, F. G. *School learning: An introduction to educational psychology*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1969.
- AXT, R. Laboratório caseiro: Dispersão da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 7, n. 3, p. 225-226, 1990.
- BORN, M.; WOLF, E. *Principles of Optics*, 6. ed. Cambridge: Cambridge UP, 1980.
- BRASIL. Orientações Curriculares Para o Ensino Médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2006. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book_volume_02_internet.pdf> Acesso em 28 abr. 2019.
- BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: Ministério da Educação, 2018. Disponível em <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_-versaofinal_site.pdf> Acesso em 28 abr. 2019.
- CLARK, D. B.; NELSON, B. C.; CHANG, H. Y.; MARTINEZ-GARZA, M.; SLACK, K.; D'ANGELO, C. M. Exploring Newtonian mechanics in a conceptually-integrated digital game: Comparison of learning and affective outcomes for students in Taiwan and the United States. *Computers & Education*, v. 57, n. 3, p. 2178-2195, 2011.
- COSTA, O. S.; RAMOS, E. M. F. Jogos eletrônicos e Ensino de Física: estudo de algumas possibilidades. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 27, n. 2, p. 559-565, 2015.
- DINIZ, R. T. *Usando a experimentação no ensino potencialmente significativo de óptica geométrica*. 2016. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.
- DOLZ, J.; NOVERRAZ, M.; SCHNEUWLY, B. Sequências didáticas para o oral e para o escrito: apresentação de um procedimento. In.: SCHNEUWLY, B.; DOLZ, J. *Gêneros orais e escritos na escola*. [Tradução e organização ROJO, R.; CORDEIRO, G. S.] Campinas: Mercado de Letras, 2004.
- FERREIRA, A. S. P. O jogo angry birds space como ferramenta pedagógica para o ensino de física: Estudo aplicado na EEEFM Pedro Targino da Costa Moreira em Cacimba de Dentro-PB. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, Arana.
- FERREIRA, M.; FILHO, O. L. S. Proposta de plano de aula para o ensino de física. *Physicae Organum*, v. 5, n. 1, p. 39-44, Brasília, 2019.
- GALVÃO, A. P. N. C. *Gamificação no Scratch como recursos para aprendizagem potencialmente significativa no ensino da Física: lançamento de projéteis*. 2017. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

- GEE, J. P. Bons videogames e boa aprendizagem. *Perspectiva*, v. 27, n. 1, p. 167-178, 2009.
- GOWIN, D.B. *Educating*. Ithaca: Cornell University Press, 1981.
- GRIFFITHS, D. J. *Eletrodinâmica*. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.
- HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J; BIASI, R. S. *Fundamentos de Física*, volume 4: óptica e física moderna. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HECHT, E. *Optics*. 5. ed. Harlow: Pearson Education, 2017.
- HUGGINS, E. R. *Physics 2000*. New Hampshire: Moose Mountain Digital Press, 1999.
- JOHNSON-LAIRD, P. N. *Mental models*. Cambridge: Harvard University Press, 1983.
- KNIGHT, R. D. *Physics for scientists and engineers: a strategic approach with modern physics*. 4. ed. Boston: Pearson Education, 2016.
- LOPES, E. B. *Refração e o ensino de óptica*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro
- MEIRELLES, F. S. *Pesquisa Anual do Uso de TI*, 2018. Disponível em: <<https://eaesp.fgv.br/ensinoeconhecimento/centros/cia/pesquisa>>. Acesso em 10 abr. 2018
- MOHANTY, Soumya D.; CANTU, Sergio. Teaching introductory undergraduate physics using commercial video games. *Physics Education*, v. 46, n. 5, p. 570, 2011.
- MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. *Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo: Moraes, 1982.
- MOREIRA, M.A. *Uma abordagem cognitivista ao ensino da Física: a teoria de aprendizagem de David Ausubel como sistema de referência para a organização do ensino de ciências*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1983.
- MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.
- MOREIRA, M.A. *Aprendizagem significativa crítica*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2005.
- MOREIRA, M. A. Unidades de enseñanza potencialmente significativas – UEPS. *Aprendizagem Significativa em Revista*, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.
- NOVAK, J. D. *A theory of education*. Ithaca: Cornell University Press, 1977.
- NOVAK, J. D.; GOWIN, D. B.; VALADARES, C. *Aprender a aprender*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 1996.
- OLIVEIRA, J. R. *Games Digitais: Uma Abordagem de Física de Partículas Elementares no Ensino Médio*. 2018. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília
- ORTIZ, A. J., LABURÚ, C. E., & da SILVA, O. H. M. Proposta simples para o experimento de espalhamento Rayleigh. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.27, n. 3, p. 599-608, 2010.
- PRENSKY, M. Nativos digitais, imigrantes digitais. *On the horizon*, v. 9, n. 5, p. 1-6, 2001.
- RIBOLDI, B. M. *A construção de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para ensinar relatividade utilizando animações e o game A slower speed of light*. 2016. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional de

Ensino de Física) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SERWAY R. A.; JEWETT J. W. *Physics for Scientists and Engineers*. 6. ed. Thomson Brooks: Cole, 2004.

STUDART, N. Simulação, games e gamificação no ensino de Física. *Simpósio Nacional de Ensino de Física*. v. 21, p. 1-17. Uberlândia, 2015.

SUN, C. T.; YE, S. H.; WANG, Y. J. Effects of commercial video games on cognitive elaboration of physical concepts. *Computers & Education*, v. 88, p. 169-181, 2015.

VERGNAUD, G. La théorie des champs conceptuels. *Récherches en Didactique des Mathématiques*, v. 10, n. 23, p. 133-170, 1990.

VYGOTSKY, L. *Pensamento e linguagem*. São Paulo: Martins Fontes, 1987.

ZAHAILA, W. D. P. *Atividades experimentais virtuais usando o game Portal 2*. 2017. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do ABC, Santo André.