



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

INTRODUÇÃO AO ENSINO DE ÓPTICA POR MEIO DE UMA OFICINA
DE FOTOGRAFIA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

ALEX SANDER TEIXEIRA SILVA

BRASÍLIA – DF

2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

INTRODUÇÃO AO ENSINO DE ÓPTICA POR MEIO DE UMA OFICINA
DE FOTOGRAFIA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

ALEX SANDER TEIXEIRA SILVA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física pelo Programa de Pós-Graduação do Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF) da Universidade de Brasília.

Orientador: Prof. Dr. Ronni Geraldo Gomes de Amorim.

BRASÍLIA – DF

2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS586i Silva, Alex Sander Teixeira
Introdução ao ensino de óptica por meio de uma oficina de
fotografia potencialmente significativa / Alex Sander
Teixeira Silva; orientador Ronni Geraldo Gomes de Amorim .
-- Brasília, 2020.
117 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado Profissional em Ensino
de Física) -- Universidade de Brasília, 2020.

1. . I. Amorim , Ronni Geraldo Gomes de, orient. II.
Título.

ALEX SANDER DA SILVA TEIXEIRA

INTRODUÇÃO AO ENSINO DE ÓPTICA POR MEIO DE UMA OFICINA DE
FOTOGRAFIA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física pelo Programa de Pós-Graduação do Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF) da Universidade de Brasília.

Aprovada em 14 de agosto de 2020.

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. RONNI GERALDO GOMES DE AMORIM (UnB)

PRESIDENTE

PROF. DR. MARCELLO FERREIRA (UnB)

MEMBRO INTERNO

PROFA. DRA. TATIANE DA SILVA EVANGELISTA (FGA)

MEMBRO EXTERNO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir esta oportunidade.

Aos meus pais, Geová Silva e Maria Aparecida T. Silva, que passaram por diversos desafios para que eu pudesse chegar até aqui e, diante de tantas dificuldades e escolhas a fazer, priorizaram seus filhos. Sou eternamente grato! Sem vocês, eu nada seria.

À minha noiva, Luciene Alves da Cruz, por me ensinar dia após dia o que é o amor. Sou grato pelo seu apoio, por estar ao meu lado em todos os momentos, por não ter reclamado uma única vez das dificuldades que enfrentou durante esta jornada, pela ajuda como revisora, pelo seu apoio incondicional.

Aos meus alunos, por me proporcionarem a oportunidade de aprender mais que ensinar.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ronni Geraldo Gomes de Amorim, pela atenção, paciência e dedicação.

Aos membros da banca, Professor Dr. Marcello Ferreira e Professora Dr. Tatiane Evangelista, pela presteza e disposição.

Ao corpo docente do Programa Nacional de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade de Brasília (MNPEF-UnB).

A José Rosa (*in memoriam*), grande fotógrafo, professor e amigo.

Aos colegas do mestrado, turma 01/2018, em especial, Clenílson, Guilherme, Lucas e Neto, pela companhia, generosidade, paciência e compreensão.

Aos colegas de trabalho Ariadne, Ivan, Lenise e Rafael, i.e., ao corpo diretivo do Colégio Estadual Delfino Oclécio Machado (CEDOM), pelo apoio e incentivo.

À UnB e à Sociedade Brasileira de Física (SBF), pelo apoio e pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) – Código de Financiamento 001, pelo apoio e pela oportunidade.

A Deus, por me permitir; aos meus pais, por tanto lutarem por mim; à minha noiva, pelo apoio incondicional, pelo carinho e pela paciência. À minha filha, aos meus avós, aos(às) meus tios(as), às minhas irmãs, aos meus sobrinhos e aos meus amigos.

RESUMO

O presente trabalho versa sobre uma forma não arbitrária e não literal de se realizar uma abordagem inicial potencialmente significativa do conteúdo de óptica, apoiando-se na elaboração, aplicação e validação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), de acordo com Moreira (2011a). A aplicação da sequência didática proporcionou investigar se são observados indícios de aprendizagem significativa quando uma câmara escura e uma oficina de fotografia pinhole são utilizadas como materiais potencialmente significativos. Para realizar a abordagem inicial do conteúdo de óptica, o produto educacional que integra esta pesquisa foi aplicado em duas turmas do 9º ano do ensino fundamental do Colégio Estadual Delfino Oclécio Machado (CEDOM), localizado no município de Luziânia (GO). Para pesquisa e validação da UEPS, as atividades que a integram foram hierarquicamente organizadas, e a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003) foi utilizada como referencial teórico durante a elaboração do produto educacional, assim como durante a aplicação da sequência didática e após sua aplicação, para avaliação de sua efetividade. Já para viabilizar a aplicação da sequência didática, potencializar as chances de aprendizagem do conteúdo e para sondagem por indícios de aprendizagem significativa, as atividades realizadas durante os encontros presenciais envolveram investigações sobre a formação de imagens no interior da câmara escura, no interior da câmara fotográfica pinhole, questionários de sondagem, participação ativa do professor junto aos alunos e aulas expositivas potencialmente significativas.

Palavras-chaves: Aprendizagem significativa. Ensino de óptica. Câmara escura. Oficina de fotografia. Pinhole. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa.

ABSTRACT

The present study shows a non arbitrary and non literary potentially significant approach of the optic content it is based in elaboration, application and validation of a potentially significant teaching unit (PSTU) – Moreira (2011a). The application of the didactic sequence provided to investigate if there are evidences of significant learning using a dark camera and a pinhole photography workshop being used as a potential significant material. To accomplish the inicial approach of the optics content, the educational product that forms this researt was applied in to 8 graders classes at Colégio Estadual Delfino Oclécio Machado (CEDOM), located in Luziânia (GO). To the research and validation of the PSTU, the integrating activiteis ware hierarchically organized and the Ausubel's significant learning theory was used as theoretical background during the elaboration of the educational procut, and also, during the application of the didactic sequence and after the evaluation of its efectiveness. To make it feaseble, the sequence's application, to potentialize the chances of the contents learnig and the reading of the evidences of significant learning – the activites that were proposed during the presential meetings involved the image formation inside the dark camera, inside the pinhole camera, questionnaires of tada collection, the teacher's active participation along with the studentes and potentially significant expostive classes.

Keywords: Significant Learning. Opticsteaching. Darkcamera. Photography workshop. Pinhole. Potentially significant learning unit.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 1 | – Contínuo aprendizagem mecânica e aprendizagem significativa | 19 |
| Figura 2 | – Esquema de símbolos para aprendizagem subordinada derivativa | 24 |
| Figura 3 | – Esquema de símbolos para aprendizagem subordinante | 24 |
| Figura 4 | – Esquema de símbolos para aprendizagem combinatória | 25 |
| Figura 5 | – Diagrama para diferenciação progressiva e reconciliação integradora | 25 |
| Figura 6 | – Espectro eletromagnético | 37 |
| Figura 7 | – Frentes de onda | 38 |
| Figura 8 | – Raios de luz paralelos | 38 |
| Figura 9 | – Reflexão especular | 43 |
| Figura 10 | – Reflexão difusa | 44 |
| Figura 11 | – Ilustração esquemática do funcionamento de uma câmara escura | 44 |
| Figura 12 | – Placa de MDF substituindo a porta metálica (a) e orifício de entrada de luz (b) | 48 |
| Figura 13 | – Bancada de revelação (a) e luz vermelha no laboratório fotográfico (b) | 48 |
| Figura 14 | – Projeção da imagem invertida em um anteparo translúcido no interior da câmara escura | 55 |
| Figura 15 | – Alunos fotografando com a câmara fotográfica pinhole | 57 |
| Figura 16 | – Negativos descansando em água após a revelação | 57 |
| Figura 17 | – Espalhamento da luz branca ao passar por um prisma de vidro | 58 |
| Figura 18 | – Lousa durante a aula expositiva dialogada integradora | 59 |
| Figura 19 | – Exemplo de questões não respondidas – NR | 62 |
| Figura 20 | – Exemplo de questão que fugiu ao tema – FT | 63 |
| Figura 21 | – Exemplo de resposta incoerente – IN | 63 |
| Figura 22 | – Exemplo de resposta coerente – CO | 64 |
| Figura 23 | – Exemplo de resposta coerente – CO | 64 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Questionário de sondagem inicial – Turma A | 57 |
| Gráfico 2 – Questionário de sondagem inicial – Turma B | 68 |
| Gráfico 3 – Questionário de sondagem inicial – Turmas A e B | 68 |
| Gráfico 4 – Questionário de sondagem final – Turma A | 72 |
| Gráfico 5 – Questionário de sondagem final – Turma B | 72 |
| Gráfico 6 – Questionário de sondagem final – Turmas A e B | 73 |
| Gráfico 7 – Sondagem inicial – Turmas A e B | 75 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Tabulação do questionário, sondagem inicial – Turma A | 65 |
| Tabela 2 – Tabulação do questionário, sondagem inicial – Turma B | 65 |
| Tabela 3 – Número de respostas por categoria, sondagem inicial – Turma A | 66 |
| Tabela 4 – Número de respostas por categoria, sondagem inicial – Turma B | 66 |
| Tabela 5 – Número de respostas por categoria, sondagem inicial – Turmas A e B | 66 |
| Tabela 6 – Tabulação do questionário, sondagem final – Turma A | 69 |
| Tabela 7 – Tabulação do questionário, sondagem final – Turma B | 70 |
| Tabela 8 – Quantitativo de respostas por categoria, sondagem final – Turma A | 71 |
| Tabela 9 – Quantitativo de respostas por categoria, sondagem final – Turma B | 71 |
| Tabela 10 – Quantitativo total de respostas por categoria, sondagem final – Turmas A e B | 71 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 Aprendizagem significativa e o processo de subsunção | 16 |
| 2.2 Condições para a aprendizagem significativa | 17 |
| 2.3 Aprendizagem mecânica | 18 |
| 2.4 Organizadores prévios | 20 |
| 2.5 O processo de assimilação | 22 |
| 2.6 Tipos de aprendizagem significativa e formas hierárquicas relacionais entre ideias novas e ancoradas | 22 |
| 2.7 Diferenciação progressiva e reconciliação integradora | 25 |
| 2.8 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) | 26 |
| 3 ÓPTICA | 28 |
| 3.1 História da óptica | 28 |
| 3.2 A luz visível | 37 |
| 3.3 Frentes de onda e o raio de luz | 38 |
| 3.4 Uma onda eletromagnética | 39 |
| 3.5 A óptica quântica | 41 |
| 3.6 A reflexão da luz | 43 |
| 3.7 A câmara escura e a câmara pinhole | 44 |
| 4 METODOLOGIA | 46 |
| 4.1 Proposta metodológica | 46 |
| 4.2 Contexto da aplicação | 46 |
| 4.3 Organização da UEPS | 47 |
| 4.4 Orientações para execução da UEPS | 50 |
| 4.5 Aplicação da UEPS segundo parâmetros propostos por Moreira (2011a) | 54 |
| 5 RESULTADOS E ANÁLISES | 62 |
| 5.1 Dados da aplicação da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa | 65 |
| 5.2 Análise e avaliação da UEPS | 73 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 80 |
| REFERÊNCIAS | 81 |

1 INTRODUÇÃO

São muitas as questões que intrigam a humanidade, e a natureza da luz visível é uma delas. Considerando a necessidade da luz para a sensação visual, é bem provável que a questão acompanhe o homem desde os tempos mais antigos. O empenho, a curiosidade e as necessidades da humanidade resultaram em conhecimentos no campo da óptica geométrica, da óptica física e, mais recentemente, da óptica quântica. No entanto, desde que Maxwell concebeu a luz visível como uma onda eletromagnética e que Einstein apresentou uma proposta de quantização da luz em pacotes de energia denominados fótons, a retórica apenas ganhou força.

Hoje, já se conhece bastante sobre a luz, ou, pelo menos, sabe-se bem sobre seu comportamento curioso e intrigante. No entanto, na educação básica, o ensino de óptica parece distante de processos de ensino que aproximem o estudante de sua investigação. A apresentação dos fenômenos e princípios ópticos, na maioria das vezes, é apenas mecânica, no sentido de se exigir do aprendiz a memorização em blocos de conhecimento. Tal processo de ensino gera problemas, pois, passado o período de instrução, as concepções alternativas de senso comum voltam a ter maior influência que ideias novas (BARROS; CARVALHO, 1998).

De acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais para Educação Básica, “as escolas devem propiciar ao aluno condições de desenvolver a capacidade de aprender, como quer a Lei nº 9.394/1996, em seu art. 32, mas com prazer e gosto, tornando suas atividades desafiadoras, atraentes e divertidas” (BRASIL, 2013, p. 116), e isso é algo que a aprendizagem pautada na memorização não oferece ao aluno.

A busca por formas alternativas para o ensino de óptica é observada em trabalhos de diversos pesquisadores. No âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), um número grande de pesquisas valida o uso de metodologias alternativas às aulas excessivamente tradicionais¹.

Como exemplo desses trabalhos, Silva (2017, p. 14) propõe fazer uso dos princípios ópticos que regem a formação de imagens em câmaras escuras para ensinar semelhança de triângulos, alertando para a necessidade de métodos diversificados:

¹ O material bibliográfico utilizado para a construção do aporte teórico desta pesquisa foi consultado na internet, por meio de buscas no Google e no banco de dissertações do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), a partir das seguintes palavras-chaves: “Aprendizagem significativa”, “Ensino de óptica”, “Câmara escura”, “Oficina de fotografia”, “Pinhole”, “Unidade de Ensino Potencialmente Significativa”.

Os alunos não encontram significado no que estudam, não associam os conhecimentos científicos que veem na escola com sua vida diária. Nesse contexto, as aulas tradicionais são insuficientes para atender às demandas atuais, onde se espera que o estudo de ciências contribua para a formação de cidadãos críticos, participativos e conscientes das mudanças e necessidades tecnológicas, além de contribuir para o desestímulo dos alunos.

Farias Junior (2018) desenvolve uma sequência de ensino investigativo para ensinar óptica geométrica. Dentre as justificativas para seu trabalho, evoca sua experiência enquanto aluno para explicitar o quanto foram frustrantes e pouco produtivas as aulas de óptica no ensino básico. Tal sentimento é, particularmente, partilhado pelo autor desta pesquisa.

Franz (2019) desenvolve uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para ensinar óptica geométrica, utilizando um *mobile game* não específico para educação. Segundo sua avaliação, o uso de *games* é uma alternativa viável, visto que sua pesquisa e as de outros autores apontam indícios de aprendizagem significativa após a utilização de *games* como material complementar ao processo de instrução.

Tal como observado nos trabalhos supramencionados, esta dissertação nasceu da vontade do pesquisador de colaborar com um ensino de física realmente transformador e significativo. Para que isso pudesse ocorrer, foi levada em consideração a necessidade de se ter um ensino menos mecanicista, mais agradável e que desperte o gosto do aprendiz em continuar a aprender. Referenciado pela teoria da aprendizagem significativa proposta por David Ausubel (2003), buscou-se, no trabalho, por meio de uma sequência didática em formato de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), fazer uma introdução significativa sobre óptica geométrica. Para auxiliar o objeto de ensino, foram alinhados às aulas expositivas dois pontos estruturantes: visitas a uma câmara escura e uma oficina de fotografia com câmeras fotográficas pinhole². As atividades extraclasse foram realizadas ao longo da exposição verbal e foram fundamentais para promover investigações e situações potencialmente significativas.

Ausubel (2003) argumenta que a exposição verbal é uma maneira eficaz de gerar aprendizagem significativa. Para colaborar com o enriquecimento da discussão, sugere o uso de elementos recursais e intermediários, tais como: levantamento de conhecimentos prévios relevantes (subsunçores), adoção de organizadores avançados, materiais potencialmente significativos e hierarquia crescente de complexibilidade diante da exposição dos conteúdos. A

² Uma câmera pinhole é uma máquina fotográfica que não utiliza lentes para focalizar a luz. O termo “pinhole” vem do inglês *pin-hole* (“buraco de agulha”) e faz referência à pequena entrada de luz que existe nesse tipo de equipamento fotográfico. Essa pequena entrada de luz permite a projeção de imagens em seu interior e a captura com papel fotossensível ou com filme fotográfico. Devido à sua simplicidade, é conhecida como câmera artesanal.

partir disso, como resultado, tem-se um aprendiz capaz de elaborar proposicionamentos autônomos, recontextualizados e produtivos. Seu trabalho é norteado pela defesa da exposição verbal, mas sem que seja mecânica e tradicional, como a observada em sala de aula. Assim, o autor defende uma exposição verbal significativa, promovida pelo uso de materiais, situações e proposições potencialmente significativos.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) destacam como pode ser útil a fotografia na tarefa de potencializar as chances de aprendizagem:

Fotografar ou utilizar fotografias pode ser uma boa forma de problematizar os conteúdos das diferentes áreas do currículo. Por exemplo, é possível trabalhar aspectos relacionados à geometria, fotografando pontos de referência para fornecer índices de determinado percurso; ou construir a representação gráfica de um espaço, a partir de fotografias de seus diversos ângulos. (BRASIL, 1998, p. 144)

Por sua vez, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) ressalta a importância de se projetar e de fazer uso de dispositivos ópticos como potenciais geradores de situações que possam colaborar com a construção de conceitos e proposições relativos à utilização social de instrumentos ópticos:

(EF05CI13) Projetar e construir dispositivos para observação à distância (luneta, periscópio etc.), para observação ampliada de objetos (lupas, microscópios) ou para registro de imagens (máquinas fotográficas) e discutir usos sociais desses dispositivos. (BRASIL, 2018, p. 341)

Esta pesquisa, alinhada aos PCN e à BNCC, correlaciona os processos ópticos para a formação de imagens no interior de câmaras escuras aos processos ópticos necessários para se fotografar com câmeras fotográficas pinhole. O objetivo das atividades propostas é dar significado lógico aos fenômenos ópticos estudados, a fim de que os estudantes sejam mais participativos e conscientes com relação ao processo científico. Ao final das atividades, acredita-se que o aluno seja capaz de dar significado lógico à necessidade de reflexão e de propagação retilínea da luz para a formação de imagens em qualquer outra situação.

Ainda segundo os PCN, a escola e o professor devem proporcionar um ensino de ciências que seja social, por meio do qual os estudantes tenham a oportunidade de trocar conhecimentos e investigar processos que os ajudem a compreender o saber científico como inacabado, ou seja, como dinâmico e prático:

[...] é responsabilidade da escola e do professor promover o questionamento, o debate, a investigação, visando ao entendimento da ciência como construção histórica e como saber prático, superando as limitações do ensino passivo, fundado na memorização de definições e de classificações sem qualquer sentido para o aluno. (BRASIL, 1998, p. 62)

Consciente do que é proposto nos PCN, este pesquisador sugere a execução de uma UEPS, distribuída ao longo de seis aulas e estruturada segundo oito passos metodológicos recomendados por Moreira (2011a), a saber:

- definição de recortes específicos do conhecimento a ser ensinado;
- criação de situações para avaliar a existência de conhecimentos prévios relevantes;
- apresentação de situações-problema, em nível introdutório;
- exposição verbal potencialmente significativa do conhecimento a ser aprendido;
- retomada de aspectos gerais, por meio de novas situações-problema;
- nova apresentação de aspectos relevantes do tópico estudado e de situações-problema, em nível maior de complexibilidade e generalidade;
- avaliação ao longo da implementação de toda a UEPS;
- avaliação quanto ao êxito e a evidências de aprendizagem significativa.

A proposta metodológica valoriza as investigações e a interação entre os alunos, sugerindo, durante as atividades, debates mediados pelo professor e questionamentos a respeito dos fenômenos físicos estudados, a fim de evitar a entrega direta e mecânica de respostas prontas.

Da organização da dissertação, tem-se, no segundo capítulo, a apresentação do referencial teórico que guiou a elaboração e a execução tanto da pesquisa quanto da UEPS aplicada. Nesse capítulo, são apresentados tópicos estruturantes da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel (2003). Além disso, explica-se ao leitor o que são as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) propostas por Moreira (2011a). No capítulo 3, é dado um destaque à luz visível: primeiramente, são abordados os aspectos históricos; em seguida, a concepção dual da luz; depois, a propagação retilínea e o fenômeno da reflexão; por fim, a câmara escura e a câmara fotográfica pinhole. Já no capítulo 4, são dispostas a proposta metodológica, a contextualização, a organização, as orientações de execução e a aplicação da sequência didática. O capítulo 5 traz os dados e a análise da aplicação do produto educacional. Por sua vez, o capítulo 6 é dedicado às considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

É comum utilizar os termos “aprendizagem correta” e “aprendizagem significativa” como sinônimos. No entanto, se “significativo” deriva da teoria da aprendizagem significativa proposta por Ausubel (2003), não deveria ser empregado como sinônimo de “aprendizagem correta” (MOREIRA, 2011a), mas, sim, de “retenção duradoura e disponibilidade cognitiva da informação”.

Aprender um saber de forma correta pode ser interpretado como algo mecânico ou imutável, resultado de um paradigma intransponível, findo em um saber absoluto, ou seja, conceito pronto e imutável – memorização mecânica. Esse fato, como sabemos, caminha em sentido contrário às propostas que busquem um aprender que tenha como resultado a aquisição significativa e a retenção duradoura de saberes.

Para clarificar o conceito sobre aprendizagem significativa e expor a teoria que fundamenta esta pesquisa, são apresentadas, neste capítulo, a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003) e a fundamentação teórica proposta por Marco Antônio Moreira (2011b) para a construção da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) utilizada neste trabalho.

2.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E O PROCESSO DE SUBSUNÇÃO

Da interpretação sobre a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003), tem-se que aprender de maneira significativa pressupõe a transformação da estrutura cognitiva do sujeito, a maturação progressiva de uma estrutura âncora e, por fim, a progressão hierarquicamente organizada de saberes, de modo que alcance construtos mais complexos. Se o ensino tem interesse no saber acadêmico, é dito que o indivíduo aprende significativamente um conceito, ou uma ideia expressa por um conjunto de conceitos (proposição), quando a transformação de sua estrutura cognitiva, durante e após o ensino, o leva a progredir em direção ao saber que se quer ser ensinado, isto é, a mutabilidade sofrida pela estrutura cognitiva não resulta no fim do processo, mas a torna mais complexa e estável, pronta a ancorar informações mais refinadas.

Segundo a perspectiva ausubeliana, para que o sujeito possa aprender de forma significativa, o fator mais importante é que existam conhecimentos específicos e relevantes em sua estrutura cognitiva para dar significado àquilo que se deseja ensinar, ou seja, são necessários não quaisquer conhecimentos prévios, mas, sim, conhecimentos prévios específicos e

relevantes (MOREIRA, 2011b). Ausubel (2003) chamou tais conhecimentos específicos e relevantes de subsunçores.

Em termos simples, subsunçor é o nome que se dá a um conhecimento específico, existente na estrutura de conhecimentos do indivíduo, que permite dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por ele descoberto. (MOREIRA, 2011b, p. 14)

Subsunçor, ou ideia-âncora, é o conhecimento específico preexistente no grupo de saberes que o aprendiz traz consigo. Pode ser interpretado como um conjunto de informações, símbolos, proposições ou construtos que preexistam em sua estrutura cognitiva. Por não se tratar de estruturas rígidas, quando são apresentadas novas informações ao sujeito, os subsunçores passam por processos de subsunção que modelam novos saberes e dão estabilidade a construtos mentais mais antigos.

Ademais, o novo conhecimento não pode ser impositivo, devendo interagir com os subsunçores do indivíduo de forma substantiva e não arbitrária. Segundo Moreira (2011b, p. 13):

Aprendizagem significativa é aquela em que ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não arbitrária com aquilo que o aprendiz já sabe. Substantiva quer dizer não literal, não ao pé da letra, e não arbitrária significa que a interação não é com qualquer ideia prévia, mas, sim, com algum conhecimento especificamente relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende.

2.2 CONDIÇÕES PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Segundo Moreira (2011b, p. 24), são duas as condições para a aprendizagem significativa: “1) o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo; e 2) o aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender”. Vejamos o que diz Ausubel (2003, p. 72) sobre as condições para a aprendizagem significativa.

A aprendizagem significativa exige que os aprendizes manifestem um mecanismo de aprendizagem significativa (ou seja, uma disposição para relacionarem o novo material a ser apreendido, de forma não arbitrária e não literal, à própria estrutura de conhecimentos) e que o material que apreendem seja potencialmente significativo para os mesmos, nomeadamente relacional com as estruturas de conhecimento particulares, numa base não arbitrária e não literal.

Diante do exposto, buscou-se, na elaboração da UEPS utilizada nesta dissertação, agregar dois pontos estruturantes para a promoção da aprendizagem segundo o parâmetro ausubeliano:

1º ponto – a busca por situações que pudessem proporcionar abordagens não literais e não arbitrárias de princípios relacionados à óptica geométrica;

2º ponto – um ambiente que despertasse no aprendiz o querer saber sobre os fenômenos abordados (engajamento) e, assim, dar a oportunidade de relacionar, de forma não arbitrária e não literal, conhecimentos novos àqueles preexistentes.

O primeiro ponto foi colocado em prática quando os conceitos sobre reflexão luminosa e propagação retilínea da luz deixaram de ser apresentados de maneira literal e arbitrária, como são vistos geralmente em aulas expositivas, para serem construídos pela exposição verbal significativa com auxílio de uma câmara escura e em uma oficina de fotografia utilizando câmeras pinhole (ver o capítulo de metodologia).

Já o segundo ponto depende mais da predisposição do aprendiz em querer relacionar os novos conhecimentos àqueles preexistentes em sua estrutura cognitiva. Tentou-se fazer uso da formação de imagens no interior da câmara escura e da oficina de fotografia pinhole como atrativo, mas, conforme Moreira (2011b), caso o aprendiz não queira, o resultado será a memorização sem significado. Segundo Ausubel (2003, p. 72):

[...] independentemente da quantidade de potenciais significados que pode ser inerente a uma determinada proposição, se a intenção do aprendiz for memorizá-los de forma arbitrária e literal (como uma série de palavras relacionadas de modo arbitrário), quer o processo, quer o resultado da aprendizagem devem ser, necessariamente, memorizados ou sem sentido.

A predisposição do aprendiz não significa motivação (MOREIRA, 2011b). Sabidamente, é importante a motivação, assim como fatores afetivos, relacionais, dentre outros, mas, devido à sua complexibilidade, e em razão de outras teorias psicológicas oferecerem maior suporte, ela não é abordada na teoria cognitivista ausubeliana (AUSUBEL, 2003). O interesse de Ausubel é no cognitivo; por tal motivo, esse foi o foco desta pesquisa.

2.3 APRENDIZAGEM MECÂNICA

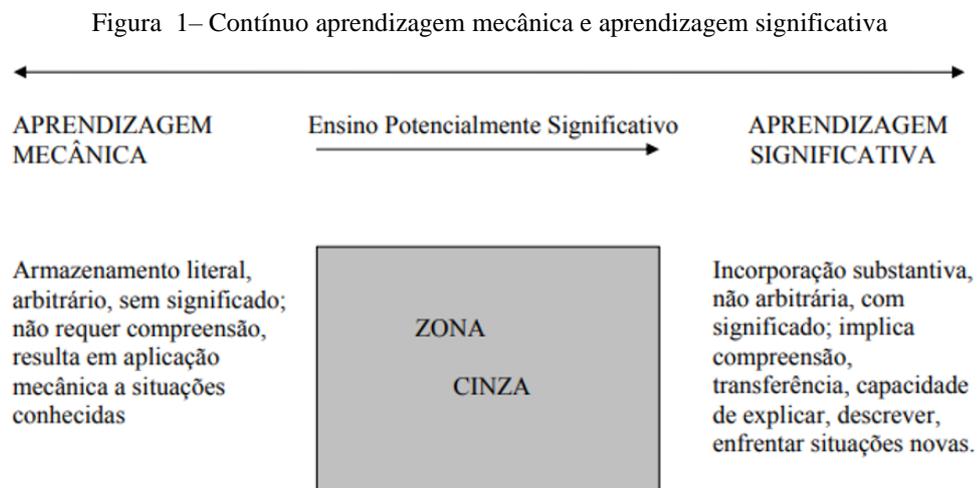
Aprendizagem mecânica é aquela em que a memorização sem significado é apresentada como regra. Na aprendizagem mecânica, o aprendiz é instruído a reter saberes que não se relacionam com conhecimentos relevantes preexistentes em sua estrutura cognitiva, decorando-se conteúdos sem significados para reprodução em curto prazo.

Tem-se uma infinidade de exemplos desse tipo de prática, porém, para clarificar o exposto, são apresentados apenas alguns:

- lista de palavras sem significado para atividades específicas;
- fórmulas matemáticas maceteadas para serem decoradas;
- aplicação de fórmulas e de processos algébricos com intuito apenas de se chegar a um resultado sem interpretação lógica;
- sequências de exercícios com respostas prontas.

Tais informações internalizadas sem interação com conhecimentos específicos e relevantes são facilmente esquecidas por não se relacionarem de maneira substancial e não arbitrária com outras estruturas cognitivas. Têm elas maior dificuldade para adquirir estabilidade cognitiva porque não participam de processos de subsunção com a mesma facilidade que informações relacionáveis participam.

Moreira (2011b) esclarece que aprendizagem mecânica e aprendizagem significativa não constituem uma dicotomia, mas um contínuo. O espaço entre as duas formas de aprendizagem, quando preenchido por um ensino carregado de estratégias e materiais significativos, potencializa a promoção de aprendizagem significativa. Vejamos a Figura 1:



Fonte: Moreira (2011b, p. 32).

A zona cinza na Figura 1 clarifica a interpretação do leitor sobre a forma por meio qual é processada a informação pelo aprendiz. A aprendizagem significativa não é algo que acontece de imediato, leva tempo para a maturação cognitiva, logo, não se pode separar completamente processos potencialmente significativos de processos mecânicos. Existe uma relação intermediária entre eles, e é na zona cinza que a apresentação de materiais potencialmente significativos e a vontade do sujeito de aprender podem facilitar a aquisição do saber e sua retenção duradoura.

A UEPS utilizada nesta pesquisa mescla atividades investigativas com aulas teóricas para evitar o excesso expositivo voltado à memorização de conteúdos. Tem-se como princípio que a aprendizagem por recepção verbal significativa é ativa e potencializa a possibilidade de aprendizagem significativa dos conteúdos abordados. Como mencionado, não é possível excluir completamente das atividades que foram realizadas a parcela que corresponde à apresentação verbal mecânica, uma vez que o contínuo aprendizagem mecânica e aprendizagem significativa não é dicotômico, no entanto, tentou-se proporcionar a maior gama de possibilidades para o indivíduo aprender no intermediário (zona cinza), entre as duas formas de aprendizagem.

2.4 ORGANIZADORES PRÉVIOS

O produto educacional que integra esta dissertação foi aplicado no 9º ano do ensino fundamental, série que marca uma breve ruptura na forma como os alunos aprendem ciências. Nela, são apresentados, em blocos definidos, os conteúdos de química, física e biologia. Conceitos primários são abordados com intuito de preparar o estudante para a aprendizagem de conceitos, proposições, informações e conteúdos em geral, amplamente tratados no ensino médio. Dentre esses conteúdos, estão presentes os princípios mais sutis da óptica geométrica, e, como se sabe, foi esse o grupo de conhecimentos escolhido para ser trabalhado durante a aplicação da UEPS utilizada na pesquisa.

Mas como ensinar de forma potencialmente significativa conceitos introdutórios de óptica geométrica se o fator relevante para uma aprendizagem significativa é que o aprendiz traga, em sua estrutura cognitiva, conhecimentos prévios específicos? Como fazer isso se o material que o sujeito aprende precisa ser potencialmente significativo para se relacionar com ideias relevantes ancoradas nas estruturas cognitivas do aprendiz? Ausubel (2003) propõe como alternativa, caso o aprendiz não tenha subsunçores específicos, ou adequados para subsumir a nova informação, fazer a introdução de subsunçores adequados antes da apresentação da tarefa de aprendizagem, por meio de organizadores avançados. Segundo Ausubel (2003, p. 65):

Visto nem sempre se poder, em qualquer fase determinada da diferenciação de uma esfera particular de conhecimentos do aprendiz, depender da disponibilidade espontânea de conceitos de subsunção relevantes e próximos de modo adequado, uma forma fácil de facilitar a aprendizagem e a retenção, nestas circunstâncias, é introduzir-se subsunçores adequados ('organizadores avançados') e torná-los parte da estrutura cognitiva existente antes da apresentação real da tarefa de aprendizagem.

Ausubel (2003) é sutil ao utilizar o termo “subsunçores adequados”, pois não se pode negar a existência de uma série de conhecimentos prévios na estrutura de conhecimentos do aprendiz ou desconsiderar toda sua vida acadêmica e muito menos suas experiências fora da escola, mas o processo de subsunção exige estruturas cognitivas específicas ancoradas para que a nova informação tenha como se submeter. Dito isso, o que são, então, organizadores avançados? Segundo Ausubel (2003, p. 65-66):

[...] organizadores avançados consistem no material introdutório a um nível mais levado de abstração, generalidade e inclusão do que a própria tarefa de aprendizagem. A função do organizador é proporcionar um suporte (ancoragem) ideário para incorporação e retenção estáveis do material mais pormenorizado e diferenciado que resulta da situação de aprendizagem, bem como aumentar a capacidade de discriminação entre esta situação e as ideias ancoradas relevantes da estrutura cognitiva.

Moreira (2011b) chama os organizadores avançados mencionados por Ausubel (2003) de organizadores prévios, conforme será adotado nesta dissertação.

De acordo com Moreira (2011b), organizador prévio não se trata de uma lista de exercícios, um resumo ou uma visão geral no mesmo nível de abstração que o material a ser aprendido, mas, sim, de um enunciado, uma situação-problema, uma simulação etc., em um nível mais elevado de abstração, generalidade, mais abrangente e inclusivo que os materiais a serem aprendidos, para que os subsunçores mais próximos da ideia a ser subsumida possam apresentar disponibilidade à nova informação. Os organizadores prévios, ou avançados, exercem o papel de mediador entre os novos saberes e aqueles que o aprendiz já possui. Podem ser do tipo expositório, quando o hiato o qual se busca preencher não é familiar ao sujeito, ou comparativo, quando há recursos de analogia facilmente alcançáveis. É recomendado o uso de organizadores avançados quando:

- a) comparar é mais importante que expor;
- b) os alunos estão em nível muito introdutório;
- c) a matéria de ensino é muito abstrata (técnica, desconhecida);
- d) o modelo (ou a representação) é uma forma mais sustentável de acesso a um significado.

Na primeira aula de aplicação da UEPS, os estudantes são convidados a formar grupos de até cinco pessoas para visitar a câmara escura (mais detalhes no capítulo 4). O processo busca, por meio da investigação científica a respeito da formação de imagens no interior da câmara escura, criar uma situação-problema em um nível maior de generalidade e inclusão, por exemplo: elevar o nível da discussão sobre a formação da imagem externa no anteparo

translúcido para que o conjunto de atividades que envolve a investigação seja utilizado como organizador prévio.

2.5 O PROCESSO DE ASSIMILAÇÃO

Na teoria da assimilação proposta por Ausubel (2003), materiais potencialmente significativos interagem com ideias preexistentes da estrutura cognitiva do aprendiz, potencializando o surgimento de novos significados para proposições de conhecimentos específicos. Tais ideias (conhecimentos), quando interagem de forma não arbitrária e não literal com a parte específica da cognição à qual foram direcionadas, dão a esta maior significado e abrangência, modificando-a, sendo também modificadas, por meio do processo de assimilação obliterante.

[...] no âmago da teoria da assimilação está a ideia de que se adquirem os novos significados através da interação de novas ideias (conhecimentos) potencialmente significativas com proposições e conceitos anteriormente apreendidos. Este processo interativo resulta numa alteração quer do potencial significado das novas informações, quer do significado dos conceitos ou proposições aos quais estão ancoradas e cria, também, um novo produto ideário que constitui o novo significado para o aprendiz. (AUSUBEL, 2003, p. 106)

As ideias (conhecimentos) que são submetidas ao processo de assimilação podem passar a coexistir com a estrutura cognitiva em que foram ancoradas, como uma especificação do conceito, uma proposição ou extensão da estrutura cognitiva específica a que foram direcionadas, ou, em razão do potencial de subsunção da ideia hierarquicamente superior, serem incorporadas a essa estrutura a ponto de não serem mais dissociadas da estrutura dominante. O processo é especificado por Ausubel (2003) como um processo de esquecimento significativo, sendo denominado de assimilação obliterante.

2.6 TIPOS DE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E FORMAS HIERÁRQUICAS RELACIONAIS ENTRE IDEIAS NOVAS E ANCORADAS

A aprendizagem é um fenômeno cognitivo que respeita uma determinada hierarquia de processos para se consolidar. Ausubel (2003) explica que aprender uma palavra, símbolo que, por si só, elenca um conceito, é mais complexo que aprender o significado de uma palavra unitária, assim como é mais complexo o aprendizado de uma proposição composta por uma série de palavras, em que a maioria delas apresenta conceitos unitários. Seguindo a premissa de hierarquia e complexibilidade para a aprendizagem significativa, Ausubel (2003) elenca a

existência de três tipos de aprendizagem significativa: representacional, conceitual e proposicional.

A **aprendizagem significativa representacional** é a aprendizagem do significado de símbolos individuais, por exemplo, palavras. Todos os outros tipos de aprendizagem dependem da aprendizagem representacional (AUSUBEL, 2003).

A **aprendizagem significativa conceitual** remete ao aprendizado do conceito apresentado por algumas palavras. À exceção de nomes próprios, a palavra aprendida é apenas um símbolo que, com uso, generalização e compreensão, toma sentido e significado potencial em diversas outras situações, até se tornar um conceito.

A **aprendizagem significativa proposicional** exige maior maturidade cognitiva do aprendiz, pois são requisitos a aprendizagem significativa representacional e a aprendizagem significativa conceitual. Para que se expresse uma proposição, é necessário um conjunto de palavras, e cada uma dessas palavras pode conter em si um conceito. A compreensão, não das palavras unitárias, ou dos conceitos unitários, mas, sim, do significado das ideias formadas por esse conjunto de palavras e conceitos combinados em uma proposição, é o que caracteriza essa forma de aprendizagem.

Quanto à relação de causa para uma ancoragem ótima da informação, Ausubel (2003) apresenta as relações subordinadas, subordinantes ou combinatórias.

A **aprendizagem subordinada** é chamada por Ausubel (2003) de subsunção. O processo de subsunção ocorre quando uma nova informação se submete a uma informação já ancorada na estrutura cognitiva do aprendiz, assim, ancora-se a essa estrutura cognitiva, sendo modificada pela nova informação. A estrutura subsume a nova informação, aumentando sua abrangência e seu poder de diferenciação com relação a outras informações.

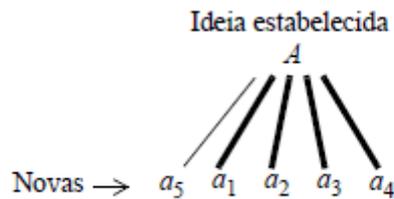
O processo de subsunção, por sua vez, é dividido em subsunção derivativa e subsunção correlativa. Apesar de conter diferenças quanto à estabilidade e à forma de ancoragem da nova ideia, tem-se como característica do processo de subsunção, seja ele por correlação ou derivação, a subordinação da nova ideia à estrutura cognitiva antes ancorada.

Ausubel (2003) faz uso do esquema de símbolos para clarificar o processo de subsunção.

Na aprendizagem por subsunção, **A** representa a informação ancorada, e **a** representa a ideia a ser assimilada. A ideia ancorada **A** assimila a nova ideia **a**, mas não é alterada, tem a

ideia que foi subsumida **a** como sua extensão, qualificação ou modificação, tal como representado esquematicamente na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Esquema de símbolos para aprendizagem subordinada derivativa

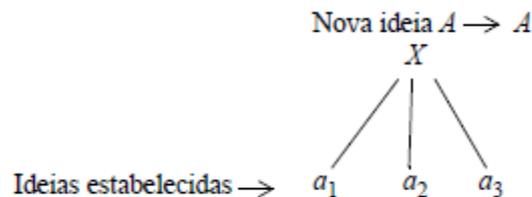


Fonte: Ausubel (2003, p. 111).

Já na **aprendizagem subordinante (superordenada)**, a informação que chega à estrutura cognitiva do aprendiz **X** é mais abrangente que as informações preexistentes constantes da estrutura cognitiva, **a**. Hierarquicamente, a nova informação é superior e, por isso, subordina as ideias preexistentes. A Figura 3 traz a aprendizagem subordinante, em forma esquemática.

X representa uma ideia mais abrangente que as ideias ancoradas na estrutura cognitiva do aprendiz.

Figura 3 – Esquema de símbolos para aprendizagem subordinante



Fonte: Ausubel (2003, p. 111).

Na **aprendizagem combinatória**, a ideia apresentada é a de que a estrutura cognitiva do aprendiz não subordina ou é subordinada por informações específicas preexistentes estáveis (subsunçores). A nova informação potencialmente significativa se relaciona com estruturas cognitivas de maior amplitude. Por exemplo, ela se relaciona não com uma ideia unitária, mas, sim, com determinado campo do conhecimento ou espécie de base subsunçor (MOREIRA, 2011b).

Muitas das novas generalizações inclusivas e amplamente explicativas que os estudantes apreendem em ciências, matemática, estudos sociais e humanidades são, no entanto, exemplos de aprendizagens combinatórias. (AUSUBEL, 2003, p. 95)

A ideia *A* não é mais abrangente ou inclusiva que as ideias *B*, *C* e *D* ancoradas na estrutura cognitiva do aprendiz. Pode-se perceber o que foi discutido no esquema apresentado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Esquema de símbolos para aprendizagem combinatória

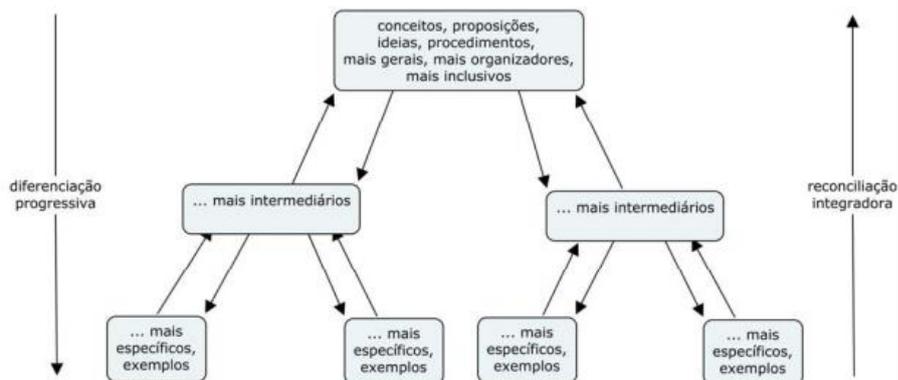
Nova ideia *A* → *B* – *C* – *D*
Ideias estabelecidas

Fonte: Ausubel (2003, p. 111).

2.7 DIFERENCIAÇÃO PROGRESSIVA E RECONCILIAÇÃO INTEGRADORA

A aprendizagem significativa de determinado saber, ou de um conjunto de saberes, é algo lento e gradual que acontece na estrutura cognitiva do aprendiz à medida que conceitos e proposições vão apresentando novos significados em razão de sucessivas exposições de novos materiais potencialmente significativos (AUSUBEL, 2003). Para Moreira (2011b), o processo de reconciliação integradora e de diferenciação progressiva de saberes é algo que acontece simultaneamente e independentemente, enquanto se consolida a aprendizagem significativa.

Figura 5 – Diagrama para diferenciação progressiva e reconciliação integradora



Fonte: Moreira (2011b, p. 44).

O processo de diferenciação progressiva é mais comum durante a aprendizagem significativa subordinada e está relacionado à aquisição de significados por um subsunçor (MOREIRA, 2011b). A Figura 5 nos mostra um esquema de diferenciação progressiva.

O processo de assimilação sequencial de novos significados, a partir de sucessivas exposições a novos materiais potencialmente significativos, resulta na *diferenciação progressiva* de conceitos ou proposições, no consequente aperfeiçoamento dos significados e numa potencialidade melhorada para se fornecer ancoragem a aprendizagens significativas posteriores. (AUSUBEL, 2003, p. 106)

Já o processo de reconciliação integradora é melhor percebido durante a aprendizagem significativa superordenada. Visa a eliminar diferenças aparentes, integrar significados e resolver inconsistências (MOREIRA, 2011b). Novas ideias significativas (conhecimentos) apresentadas ao aprendiz, por serem mais abrangentes, facilitam a generalização de conceitos e de proposições ancoradas na estrutura cognitiva.

Devido à grande quantidade de ideias (conceitos e proposições) que um estudante tem de aprender durante sua vida acadêmica, Ausubel (2003) aponta como melhor caminho para a retenção duradoura de conhecimentos a exposição verbal significativa. Diante disso, tem-se que é mais fácil para o sujeito aprender significativamente quando a organização do material a ser aprendido é feita de maneira potencialmente significativa, ou seja, quando se respeita a hierarquia natural entre os diferentes conceitos e proposições potencialmente significativos, quando se respeita a maturidade cognitiva do aprendiz, i.e., quando se proporciona condições para potencializar processos de diferenciação progressiva e de reconciliação integradora dos conhecimentos.

[...] (1) é menos difícil para os seres humanos apreenderem os aspectos diferenciados de um todo, anteriormente apreendido e mais inclusivo, do que formular o todo inclusivo a partir das partes diferenciadas anteriormente aprendidas; e (2) a organização que o indivíduo faz do conteúdo de uma determinada disciplina no próprio intelecto consiste numa estrutura hierárquica, onde as ideias mais inclusivas ocupam uma posição no vértice da estrutura e subsumem, progressivamente, proposições, conceitos e dados factuais menos inclusivos e mais diferenciados. (AUSUBEL, 2003, p. 166)

A UEPS utilizada na pesquisa buscou proporcionar, a cada encontro, a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora dos saberes, fato que se evidencia por meio da organização hierárquica do material potencialmente significativo, da forma de apresentação, das atividades e do diálogo constante entre professor e aluno.

2.8 UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS (UEPS)

Com intuito de colaborar com a promoção de aprendizagem significativa segundo parâmetros ausubelianos, Moreira (2011a) tenta corrigir, segundo ele, e pelo menos em parte, o equívoco que é compreender a aprendizagem mecânica como modelo eficiente para gerar aprendizagem, ou seja, memorização sem significado como padrão de aprendizagem. Para tal,

propõe sequências didáticas de tópicos específicos de conhecimento, declarativos e/ou procedimentais, com base na ótica ausubeliana, denominadas de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).

Para que os objetivos propostos por uma UEPS sejam alcançados, Moreira (2011a) elenca princípios que devem nortear a construção de uma sequência didática, dentre eles, podemos destacar: a importância dos conhecimentos prévios, dos sentimentos, dos pensamentos e das ações; o querer aprender por parte do aluno; a relevância dos organizadores prévios e das situações-problema; a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora; a avaliação por busca de evidências de aprendizagem significativa; a interação social e a linguagem adequada; a aprendizagem não mecânica; o papel do professor como mediador, e não como impositor do conhecimento etc.

Moreira (2011a) propõe, ainda, aspectos sequenciais, ou seja, passos que, se seguidos durante a construção da UEPS, podem colaborar na promoção da aprendizagem significativa. A sequência sugerida por Moreira (2011a) é apresentada junto à UEPS utilizada na pesquisa.

Segundo Silva Filho e Ferreira (2018, p. 108), a estrutura de uma UEPS deve conter:

- levantamento dos conhecimentos prévios;
- elaboração dos organizadores prévios;
- construção das situações-problema;
- realização da diferenciação progressiva dos conceitos;
- realização da reconciliação integradora;
- efetivação do processo de consolidação; e
- avaliação da aprendizagem significativa.

Tendo discutido os pressupostos da teoria da aprendizagem significativa, a qual será o guia para a construção do ferramental metodológico desta pesquisa, serão apresentados no próximo capítulo alguns aspectos da óptica geométrica. Esse capítulo embasou, do ponto de vista do conteúdo, o produto educacional confeccionado.

3 ÓPTICA

3.1 HISTÓRIA DA ÓPTICA

Diante das necessidades mencionadas para aquisição e retenção duradoura e significativa de conceitos e proposições, e diante da relevância histórica da óptica geométrica, da óptica física e da óptica quântica para a compreensão da luz como a temos hoje, é apresentado, a seguir, um breve levante histórico de alguns momentos e personagens que contribuíram para sua evolução. Dentre as diversas leituras que colaboram com a pesquisa, destacam-se os textos de Barros e Carvalho (1998), Hecht (2017), Bassalo (1986) e Polito (2016).

A natureza da luz não é algo trivial e intriga a humanidade desde os tempos mais remotos. Segundo Bassalo (1986), as primeiras civilizações atribuíam aos deuses a origem da luz. Para os antigos hebreus, teria sido Deus a fazer a luz, já para os antigos egípcios, a luz é Maat, filha de Rá, o Deus Sol.

Tecnologias ópticas também acompanham o homem há muitos séculos. Hecht (2017) destaca passagens do Velho Testamento que remetem ao uso de tecnologias ópticas. O autor conta em seu livro que os espelhos antigos eram feitos de cobre polido, bronze e espéculo, uma liga de cobre rica em estanho, e que um espelho em bom estado de conservação foi encontrado no vale do Nilo, próximo à pirâmide de Sesóstris II (~1900 a.C.).

Mas somente com os antigos gregos, Pitágoras, Demócrito, Empédocles, Platão, Aristóteles, dentre outros filósofos da antiguidade, foram desenvolvidas teorias sobre a natureza da luz e da visão.

Pitágoras (~580-500 a.C.) acreditava que raios visuais emergiam dos olhos, propagavam-se em linha reta e, ao se chocarem com os objetos, proporcionavam a sensação visual.

Platão (428-347 a.C.) tinha convicção de que a visão de um objeto era formada por três jatos de partículas: um primeiro partindo dos olhos, um segundo partindo do objeto percebido e um terceiro vindo das fontes luminosas. Ao chegar ao objeto observado, a combinação das partículas provenientes das fontes luminosas com as partículas que haviam partido dos olhos do observador resultava no conjunto de partículas que retornava ao observador e resultava na visão.

Aristóteles (384-322 a.C.) “defendia a hipótese de que a luz era devido a uma atividade em um determinado meio, podendo, dessa forma, tal ideia ser considerada a antecessora da teoria ondulatória” (BASSALO, 1986, p. 139).

Segundo Martins e Silva (2013), os textos mais antigos sobre óptica geométrica foram escritos há aproximadamente 300 a.C., por Euclides (~325-265 a.C.). Utilizando-se do princípio da propagação retilínea dos raios visuais e da lei da reflexão, Euclides apresentou um estudo sobre *Perspectiva* e, na obra, *Catóptrica*, estudos sobre espelhos planos e esféricos.

Já no século I d.C., Heron de Alexandria explicou a propagação retilínea da luz e formulou o princípio de que “o trajeto descrito por um raio luminoso é mínimo”. Em seu livro *Katoptrika*, ele trata de espelhos côncavos e convexos e de sua combinação (BASSALO, 1986).

Cláudio Ptolomeu, em 130 d.C., deu contribuições para o estudo da refração³.

Segundo Hecht (2017), após a queda do Império Romano, os estudos no campo da luz visível mudaram para o mundo árabe. A escola árabe (séculos IX-XI) foi pujante. Dentre árabes que contribuíram com a óptica, destacam-se: Abu Sa’d al-‘Ala ‘Ibn Sahl (940-1000 d.C.) e Alhazen (965-1039 d.C.).

Abu Sa’d al-‘Ala ‘Ibn Sahl escreveu sobre os instrumentos ardentes em 984, um estudo sobre refração. Em seus escritos, é encontrado o primeiro diagrama detalhado sobre o fenômeno físico da refração (BARROS; CARVALHO, 1998).

Alhazen complementou a lei da reflexão, estudou espelhos parabólicos, deu uma descrição detalhada do olho humano, entre outras contribuições. De acordo com Barros e Carvalho (1998), os estudos de Alhazen foram cruciais para o abandono da teoria aristotélica dos raios visuais. Em suas observações, ele usou da sensibilidade que sentimos quando olhamos para o Sol, ou outra fonte luminosa de grande intensidade, para formular sua teoria. Os raios luminosos não podiam emergir dos olhos, mas, sim, alguma coisa deveria chegar até eles. Esse fato se evidencia em razão do efeito fisiológico de ofuscamento, ou da dor que sentimos após olharmos diretamente para o Sol. Alguma coisa deveria chegar aos olhos, caso não, o que justificaria a dor? Outro argumento era o de se continuar a enxergar o disco solar, mesmo após fecharmos os olhos, logo depois de olharmos diretamente para ele. Se os raios solares emergiam dos olhos, como seria possível a visão continuar mesmo após fechá-los?

³ É a mudança de velocidade sofrida pela luz ao atravessar a superfície de separação entre dois meios materiais, podendo vir acompanhada ou não de um desvio de trajetória, a depender do ângulo de incidência da luz sobre a superfície.

Alhazen deu também uma interpretação para a formação de imagens. Segundo ele, um objeto é composto por infinitos pontos, e cada ponto emite sua imagem em infinitas direções. Isso acabava com a concepção de antigos pensadores, qual seja, de que a imagem de um objeto grande tinha que se contrair para entrar na pupila do observador.

Seus estudos também foram valiosos para a interpretação do funcionamento da câmara escura de orifício. Na Grécia antiga, a câmara que invertia imagens já era conhecida, mas seu desenvolvimento é atribuído a Alhazen, que a utilizava para observar eclipses e olhar diretamente para o Sol.

Segundo Polito (2016), os pilares para a Revolução Científica foram calçados gradativamente, passaram pela Antiguidade e pela Idade Média e não são dissociáveis de toda a transformação que ocorreu na Europa durante a Baixa Idade Média. Assim, deve-se entender a Revolução Científica como o resultado de um processo de transformação.

Polito (2016) explica que o renascimento econômico e populacional e a urbanização proporcionaram o reestabelecimento da comunicação comercial entre a Europa e o restante do mundo. A circulação de pessoas e mercadorias levou à troca de ideias e conhecimentos. Incurções militares cruzadas restabeleceram a comunicação com o mundo árabe, deles os europeus adquiriram uma vasta gama de conhecimentos, entre eles, saberes sobre óptica que os árabes adquiriram da Antiguidade grega e aperfeiçoaram. Traduzidos para o latim, os estudos de Alhazen exerceram grande influência sobre os filósofos ocidentais na Idade Média (BASSALO, 1986).

No fim da Idade Média (1280-1289), surgiram na Itália os primeiros óculos. Bassalo (1986) explica que eram muito grosseiros e somente foram aperfeiçoados durante a Renascença.

Giovanni Battista Della Porta (1535-1615) descreveu, em 1589, o funcionamento do telescópio e da câmara escura, comparando ao olho humano. Ele também fez diversos experimentos e observações com espelhos côncavos.

Com o aprimoramento de técnicas para polir vidro, surgiu o primeiro microscópio composto, em 1590. Já o primeiro telescópio surgiu em 1608.

Em 1610, Galileu Galilei fez uma série de descobertas utilizando telescópios construídos por ele mesmo, entre elas, montanhas e crateras na Lua, satélites em Júpiter, manchas solares e as fases de Vênus. Foi ele o primeiro a fazer uso científico de microscópios e telescópios (BASSALO, 1986).

De acordo com Polito (2016), Galileu Galilei foi o personagem mais importante da Revolução Científica.

[...] Além de lutar vigorosamente pela verdade absoluta do sistema copernicano, o que mais distinguiu Galileu como símbolo máximo da Revolução Científica foi o fato de nele convergirem os dois elementos que fizeram das ciências físicas o que elas são hoje: uma *metodologia* de abordagem *experimental* e *quantitativa* dos fenômenos naturais. Esse passo marcou o início do processo de desvinculação da ciência do tronco geral da filosofia e a dissolução de sua submissão à teologia. O termo final desses desenvolvimentos coube a Isaac Newton e à publicação dos *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (1687). Essa foi a primeira obra de unificação bem-sucedida da história da física, tendo reduzido os fenômenos celestes e os terrestres ao mesmo conjunto de leis gerais. (POLITO, 2016, p. 16) [grifos no original]

Johannes Kepler (1571-1630), em sua obra *Dioptrice* (1610), desenvolveu a teoria instrumental da óptica. Antes de publicá-la, Kepler fez estudos sobre câmara escura, funcionamento dos óculos, visão, lentes e cores. Ele é considerado o precursor da fotometria (BASSALO, 1986).

A lei da refração foi demonstrada experimentalmente por Harriot e também por Snell (1621). Bassalo (1986) esclarece que foi no século XVII, com a explicação correta da refração por Snell, que a óptica passou a ser tratada como ciência aplicada. Os estudos de Snell não foram publicados, mas foram conhecidos pelos físicos que o sucederam e serviram de pilar para a óptica aplicada moderna.

Coube a Descartes, em 1637, dar publicidade ao tratamento matemático, por meio de senos, para explicar a refração. Ao tentar formular uma teoria sobre a natureza da luz, Descartes propôs que a luz se propagava em um meio material perfeitamente elástico, o éter.

Segundo Polito (2016, p. 77), Descartes foi o primeiro a dissociar as cores dos corpos:

Até o início do século XVII, as cores eram consideradas propriedades reais dos corpos, e a luz, essencialmente distinta delas, servia apenas para exibi-las. Descartes foi o primeiro a estabelecer uma explicação puramente mecânica para ambas. A luz era real, pois consistia em corpúsculos. Como qualidades secundárias, as cores não eram reais, eram efeitos fisiológicos associados às velocidades de rotação dos corpúsculos sobre a retina.

Prosseguindo com nosso apanhado histórico, temos que, ainda no século XVII, em 1691, Pierre de Fermat demonstra a lei da refração de Snell utilizando o princípio do tempo mínimo, já antes especulado por Alhazen e Heron de Alexandria, mas formalizado em 1657 por Fermat.

Na segunda metade do século XVII, Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) descobriu o fenômeno físico da difração da luz⁴.

Robert Hooke (1635-1703), curador de experiências para a Royal Society em Londres, observou efeitos de interferência em filmes finos. Segundo Hecht (2017), Hooke foi o primeiro a estudar padrões de interferência de cor gerados por filmes finos, para ele, a luz era um movimento vibratório do meio que se propagava em alta velocidade. A concepção de Hooke sobre a luz deu início à teoria ondulatória.

As concepções estruturais da óptica voltariam a sofrer grande impacto com Isaac Newton (1642-1727) e Christiaan Huygens (1629-1695).

Newton publica, em 1704, sua obra *Optica*, segundo Polito (2016), resultado da elaboração de ideias que surgiram 40 anos antes. Nessa obra, Newton propõe, pela primeira vez, que a luz branca era composta de raios de diferentes cores.

Polito (2016, p. 79) ressalta que, na década de 1670, Newton desenvolveu uma teoria mecânica puramente hipotética para a luz:

No seu *modelo corpuscular*, a luz era um feixe de partículas materiais, minúsculas e que se moviam com altíssimas velocidades. O tamanho das partículas podia ser variado, e essa propriedade estaria associada à sua cor. Portanto, mesmo sem o éter, as propriedades da óptica geométrica podiam ser compreendidas em termos mecânicos – a propagação retilínea, pelo princípio de inércia; a reflexão, pelo impacto e ricocheteio; a refração, pelo impulso, embora, nesse caso, faltasse compreender a origem do impulso. Foi para completar a explicação mecânica, e incluir as propriedades periódicas, que Newton lançou mão do conceito de éter. Com efeito, ele especulou que as variações de densidade e as vibrações periódicas do éter atuavam diretamente sobre as partículas de luz, alterando suas trajetórias por meio de impactos. A partir de então, esse modelo dual também permitiu construir explicações para os processos de separação e de formação das cores no prisma e em superfícies rugosas e para a origem da refração, da difração e dos anéis de Newton. Observe-se que o éter atomizado proposto nessa primeira fase especulativa – correspondente à publicação de 1675 – não era mecanicamente diferente do éter de Descartes. [grifos no original]

A tendência à especulação e a recorrer a fatores divinos para dar explicação a alguns fenômenos físicos é notada nas obras de Newton até a publicação da segunda edição inglesa de *Optica* (1717). Nessa obra, Newton põe fim a especulações divinas argumentativas como recurso e retoma a ideia do meio material etéreo para explicar a existência de forças de ação a distância.

⁴ A difração é um fenômeno ondulatório caracterizado pela capacidade que a onda tem de contornar obstáculos, assim como a capacidade de espalhamento ou de alargamento, quando passa por uma fenda.

A reviravolta aconteceu com a publicação da segunda edição inglesa de *Optica* (1717), que representou a fase final de seu pensamento. Newton retomou a hipótese do éter, porém, com uma grande novidade: diferentemente do éter mecânico das especulações anteriores, sua nova concepção dinâmica de éter transferia a função dos “poderes ativos” imateriais – em última instância, divinos, responsáveis pela manifestação das forças de ação a distância – para um conjunto (hipotético) de forças repulsivas, agindo entre as partículas massivas que constituíam a estrutura do novo éter. Essa concepção de éter dinâmico representou, a uma só vez, o ápice da metafísica e da síntese histórica newtonianas, na medida em que realizou a unificação final, em uma mesma entidade, do par dicotômico matéria passiva/força ativa, com a consequente superação da dicotomia metafísica entre a filosofia mecânica e a física matemática. (POLITO, 2016, p. 80)

Contemporâneo de Newton, Christiaan Huygens desenvolvia seus estudos seguindo uma linha de pensamento diferente. Enquanto Newton desenvolvia um *modelo corpuscular* para explicar os fenômenos luminosos, Huygens, apoiado na filosofia mecânica cartesiana, apresentava ao mundo uma teoria ondulatória para a luz. Segundo Hecht (2017), com sua teoria, Huygens conseguiu explicar corretamente as leis da reflexão e da refração, além da dupla refração na calcita, o que o levou a descobrir o fenômeno da polarização. O resultado de seu trabalho foi publicado em 1690, na obra intitulada *Tratado da luz*. Conforme Polito (2016), a teoria ondulatória proposta por Huygens, embora muito boa, não conseguia explicar fenômenos de interferência e, por esse motivo, cedeu espaço para a teoria corpuscular newtoniana, o que levou a maioria dos cientistas do século XVIII a seguir as ideias de Newton.

Polito (2016) explica que, durante o século XVIII, a física se dividiu em duas vertentes de estudo, ambas apoiadas nas obras fundamentais de Newton: *Principia* e *Optica*.

Segundo Polito (2016), a primeira corrente de estudo era denominada de *física geral*; a segunda, direcionada pela obra newtoniana *Optica*, era denominada de *física particular*. Os adeptos da física particular concentraram seus esforços em ramos que ainda necessitavam de formalismo mecânico qualitativo (luz, calor, eletricidade e reações químicas).

Embora os estudos realizados sobre óptica tenham sido significativos no século XVIII, apenas no século XIX a teoria ondulatória da luz voltou aos holofotes, por meio de Thomas Young (1773-1829). Segundo Hecht (2017), Young leu artigos da Royal Society exaltando a teoria ondulatória e, em 1801, publicou o trabalho *Sobre a teoria da luz*.

De acordo com Polito (2016), Young criou sua própria teoria ondulatória para explicar a difração e a refração, sem as limitações da teoria de Huygens. Idealizou e realizou o experimento da dupla fenda, demonstrando que fenômenos de interferência e de difração eram observados no caso da luz e em sistemas físicos materiais, como o som sendo propagado no ar.

Inicialmente, Young creditou o movimento ondulatório como longitudinal, mas complicações para esse entendimento foram evidenciadas pelos trabalhos de Étienne Malus (1775-1812), que descobriu a polarização por reflexão, e pelo trabalho do físico experimental François Arago (1786-1853), que demonstrou a ausência de interferência entre feixes de luz perpendiculares.

Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) foi responsável pelo renascimento da teoria ondulatória na França. Desconhecendo os trabalhos de Young e de Fresnel, segundo Hecht (2017), iniciou seus trabalhos cerca de 13 anos antes.

Segundo Polito (2016), por volta de 1814, Fresnel começa a suspeitar de que calor e luz pudessem ser, os dois, fenômenos ondulatórios. Para dar parte à sua teoria, Fresnel concebeu o éter como um meio sólido elástico para poder suportar e transmitir vibrações transversais. Usando esse modelo, Fresnel descreveu com sucesso todos os fenômenos periódicos da luz.

Mas a necessidade de um meio material para suportar a propagação da luz (o éter) incorria cada vez mais em problemas que resultassem em uma explicação científica confiável. George Green (1793-1841) e James MacCullagh (1809-1847) formularam trabalhos sobre o assunto. Conforme Polito (2016), o colapso da solução mecânica para o éter chegou com os estudos de George Stokes (1819-1903).

Em 1849, Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) utilizou uma roda dentada giratória para obstruir ou deixar passar pulsos de luz enviados a um espelho que se encontrava a uma distância de 8.633 metros. Ajustada a velocidade de rotação da roda para que os pulsos de luz fossem obstruídos, ou passassem por obstáculos, Fizeau conseguiu estimar a velocidade da luz em 315 300 km/s.

Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), em 1850, apresenta em seu trabalho que a velocidade da luz no ar era maior que na água. Segundo Hecht (2017), esse resultado entrava em conflito com as formulações de Newton, que previa exatamente o contrário. A descoberta de Foucault deu grande força à teoria ondulatória.

Em 1845, o físico experimental Michael Faraday (1791-1867) descobre que a direção de polarização de feixe de luz pode ser desviada pela ação de um campo magnético, o que, segundo Hecht (2017), estabelece uma inter-relação entre o eletromagnetismo e a luz. De acordo com Polito (2016), coube a William Thomson a primeira tentativa bem-sucedida de estruturar matematicamente as ideias de Faraday.

Fortemente influenciado pelos trabalhos de Faraday e de Thomson, James Clerk Maxwell (1831-1879) estrutura com sucesso a teoria de campo e demonstra a luz como uma onda eletromagnética. Segundo Polito (2016, p. 104):

Embora defensor de uma visão geométrica e intuitiva dos fenômenos físicos, Maxwell jamais aceitou a interpretação não mecânica de Faraday. Por isso, no trabalho seguinte – Sobre as Linhas de Força Físicas (1861-1862) –, ele passou da abordagem puramente geométrica para o tratamento físico, ou seja, mecânico, do campo, adotando duas ideias já previamente utilizadas por Thomson. Primeiro, ele assumiu que a estrutura do éter material devia sustentar o campo de forças de modo análogo ao campo de tensões em um sólido elástico. Segundo, ele acoplou, a esse modelo, os vórtices de fluidos. Com isso, Maxwell foi capaz de elaborar uma teoria completa, sistemática e inteligível da transmissão local das forças elétricas e magnéticas e, a partir dele, realizou uma das mais espetaculares unificações da física do século XIX ao, finalmente, demonstrar matematicamente que a luz poderia ser uma onda eletromagnética.

Conforme Hecht (2017), brilhantemente, Maxwell resumiu e ampliou todo o conhecimento empírico em um conjunto de equações matemáticas que resultou em uma equação de onda para o campo eletromagnético capaz de prever sua velocidade no éter luminífero.

De acordo com Polito (2016, p. 107), a conexão da óptica com o eletromagnetismo foi natural:

A conexão com a óptica surgiu naturalmente, pois Maxwell já sabia que a teoria ondulatória da luz requeria que o éter luminífero fosse um sólido elástico, para permitir a existência de ondas transversais. Ao calcular a velocidade de propagação das suas ondas eletromagnéticas, ele constatou que ela era, dentro de uma margem ínfima de erro, compatível com o valor da velocidade da luz – cuja medida, à época, já apresentava excelente precisão.

O trabalho de Maxwell foi ratificado em 1888 por Rudolf Hertz (1857-1894), com a detecção experimental de ondas eletromagnéticas.

A necessidade de um meio material, o éter, para a propagação da luz foi um complicador que concentrou grande parte dos esforços dos físicos do século XIX. O problema somente foi solucionado com o advento da teoria da relatividade especial, de Albert Einstein (1879-1955), em 1905. Segundo Polito (2016), a compreensão da relatividade especial reformulou a compreensão vigente newtoniana a respeito do espaço e do tempo; na concepção einsteiniana de espaço-tempo, a noção de éter não era mais necessária.

A teoria da relatividade especial operou, com relação à mecânica newtoniana, uma profunda modificação no entendimento das categorias de espaço e de tempo, tornando-as interdependentes. A nova concepção einsteiniana de espaço-tempo implicava naturalmente abandono da noção de éter, pois era isso que a equivalência completa entre observadores inerciais exigia. No lugar da hipótese de um éter material, Einstein deixava o princípio de independência da velocidade da luz com relação ao estado de movimento de sua fonte. *Essa foi a grande contribuição de Einstein, para a epistemologia da física: construir um quadro geral que não fazia mais nenhuma referência à estrutura da matéria ou da radiação eletromagnética. A grande revolução ontológica de Einstein foi expurgar da eletrodinâmica – e da física, em geral – a noção de éter como sustentáculo da matéria e da radiação.* (POLITO, 2016, p. 117) [grifos no original]

Segundo Hecht (2017), Einstein postulou que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, c , que independe do estado de movimento do corpo emissor.

Em 1900, Max Planck (1858-1947), conforme Polito (2016), ao estudar o comportamento do corpo negro, apresenta a primeira fórmula bem-sucedida para a distribuição de energia – a lei de Planck.

Einstein deu um novo entendimento às ideias de Planck para a quantização do espectro de emissão do corpo negro, em 1905, ao considerar a luz quantizada, e não apenas a matéria, como havia suposto Max Planck. Com seu entendimento sobre a luz, Einstein explicou o efeito *fotoelétrico* dando características quânticas ao campo eletromagnético. Segundo Hecht (2017), Einstein propôs uma nova forma de teoria corpuscular, na qual a luz era composta por pacotes de energia.

Em 1913, Niels Bohr (1885-1962) utiliza a ideia de quantização da energia proposta por Planck e apresenta à comunidade científica seu modelo atômico. Com seu modelo, foi possível explicar o espectro de emissão da maioria dos elementos químicos que conhecemos.

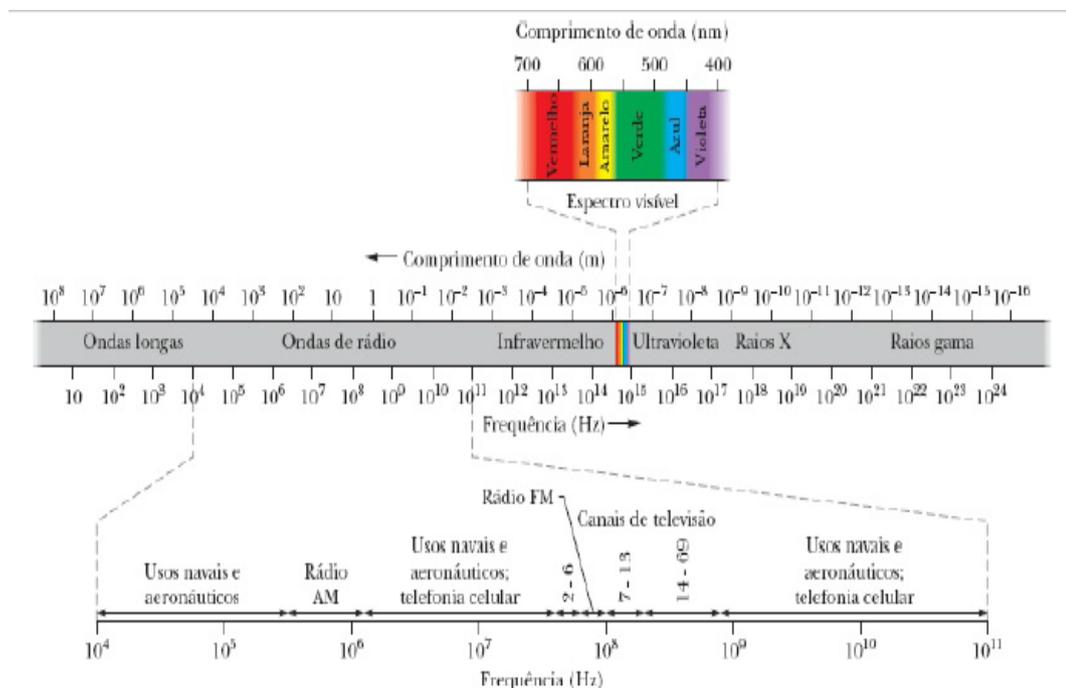
As descobertas sobre o comportamento da luz que marcaram o fim do século XIX e o início do século XX deram um entendimento totalmente novo à compreensão que se tinha a respeito da luz e abriram campo para uma série de investigações no ramo da óptica quântica. O século XX e o início do século XXI são marcados por uma evolução científica e tecnológica sem igual na história da humanidade, que, em boa parte, tem a vontade humana de entender o que é a luz como ponto de partida. Por essa razão, optou-se por iniciar este capítulo fazendo um breve apanhado histórico que aborda importantes momentos da óptica geométrica, da óptica ondulatória e da óptica quântica. O intuito não foi apresentar toda a história da óptica (isso pode ser encontrado na literatura especializada), mas proporcionar ao leitor uma breve passagem pelo tempo, a fim de fornecer o mínimo de entendimento sobre o aspecto evolutivo histórico das

ideias conceituais que culminaram no entendimento que temos hoje sobre a luz. Juntamente ao material instrucional – o produto educacional – que acompanha esta dissertação, a abordagem histórica poderá apoiar o professor que dele faça uso a revisitar ou mesmo se iniciar na evolução do pensamento ocidental sobre a óptica, o que consideramos fundamental para uma abordagem efetivamente significativa do tema.

3.2 A LUZ VISÍVEL

A luz visível é uma pequena parcela do espectro eletromagnético a que nossos olhos são sensíveis. A região do espectro capaz de sensibilizá-los e nos proporcionar a sensação visual encontra-se, aproximadamente, entre 430 e 630 nm (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Sinais de rádio, televisão, micro-ondas, celular, luz visível, dentre outros, são ondas eletromagnéticas que se diferenciam pela frequência (f) e, conseqüentemente, pelo seu comprimento de onda (λ). A Figura 6 apresenta algumas faixas de frequência e seus respectivos comprimentos de onda. É importante salientar que não há um limite para definir início ou fim do espectro eletromagnético, bem como não há lacunas entre os diferentes espectros, sendo os dados da figura apenas uma amostra, e seus limites, uma aproximação.

Figura 6 – Espectro eletromagnético

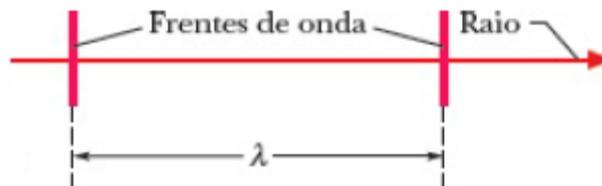


Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 31).

3.3 FRENTE DE ONDA E O RAIOS DE LUZ

Ondas eletromagnéticas são produzidas devido à aceleração de cargas elétricas livres ou a transições entre níveis de energia na eletrosfera do átomo. Quando são produzidas, ondas eletromagnéticas são tridimensionais e esféricas. À medida que se afastam da fonte, e outras ondas são produzidas, as superfícies imaginárias de separação entre ondas consecutivas dão origem a uma interpretação ideária denominada de frente de onda. Ao longo de cada uma dessas superfícies, o campo elétrico tem o mesmo módulo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). A distância entre duas frentes de onda consecutivas corresponde a um comprimento de onda (λ). Longe da fonte de emissão, um pequeno segmento de uma frente de onda pode ser considerado plano, assim como apresentado na Figura 7.

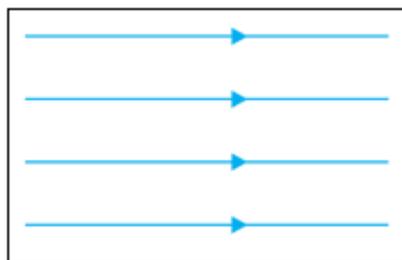
Figura 7 – Frentes de onda



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 36).

O afastamento ou a aproximação de uma frente de onda são indicados por setas orientadas, denominadas de raios luminosos. Longe da fonte emissora, seguindo o mesmo raciocínio ideário utilizando para uma frente de onda plana, consideram-se os raios luminosos paralelos, assim como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Raios de luz paralelos



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A interpretação ideária de uma onda eletromagnética se propagando no espaço na forma de frentes de onda, ou de raios luminosos orientados que caminham em linha reta, é utilizada por ser conveniente e por representar e fornecer informações básicas a respeito do fenômeno.

A ideia da luz se propagando no espaço vazio como se fosse um raio luminoso que caminha em linha reta é antiga, usada por diversos filósofos, físicos e estudiosos para dar

significado a uma infinidade de fenômenos ópticos. Em 1657, essa ideia ganhou força com Pierre Fermat, quando ele descobriu o *princípio do mínimo tempo*. Esse princípio enuncia que “de todos os possíveis caminhos que a luz pode tomar para ir de um ponto a outro, a luz escolhe o caminho que requer o tempo mais curto” (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008, p. 272).

Segundo Feynman, Leighton e Sands (2008), o princípio de Fermat tem sua importância no fato de prever coisas novas, como, por exemplo, foi capaz de prever sobre a velocidade da luz em diferentes meios materiais, além disso, contém em si a lei da reflexão e a lei da propagação retilínea da luz.

3.4 UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA

Qualquer onda eletromagnética tem a mesma velocidade de propagação no espaço livre (vácuo), $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, dada por:

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

Onde: μ_0 é a permeabilidade do vácuo e vale $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, i.e., ϵ_0 é a permissividade do vácuo e vale $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

Diferentemente de ondas mecânicas, ondas eletromagnéticas não necessitam de suporte material para se propagarem, elas se propagam no espaço livre e, também, em meios materiais, como, por exemplo: o ar, a água e o vidro.

Maxwell foi o responsável por demonstrar que a luz visível é a combinação de campos elétricos e magnéticos variáveis, que se propagam no espaço livre como uma onda eletromagnética, a uma velocidade finita c . Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), a onda eletromagnética, que se propaga ao longo de um eixo x , tem seus módulos de campos elétrico e magnético dependentes de x e t , dados por:

$$\begin{aligned} E &= E_m \text{sen}(kx - \omega t) \\ B &= B_m \text{sen}(kx - \omega t) \end{aligned} \quad 2$$

Onde: E_m e B_m são as amplitudes de E e B , i.e., ω e k são, respectivamente, a frequência angular e o número de onda.

Para compreendermos como Maxwell chegou à conclusão de que a luz é uma onda eletromagnética, será apresentado a seguir, a partir de suas equações, o tratamento matemático que evidencia a onda tridimensional.

De acordo com Feynman, Leighton e Sands (2008, p. 242), as equações de Maxwell que explicam o comportamento de campos elétricos e magnéticos que podem estar variando no tempo são dadas por:

$$\begin{aligned}
 I - \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & II - \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\
 III - \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & IV - c^2 \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Onde: \mathbf{B} é o vetor indução magnética, \mathbf{E} é o vetor campo elétrico, ϵ_0 é uma constante que depende do meio, ρ é a densidade de carga elétrica, c é a velocidade da luz, \mathbf{j} é a densidade de corrente elétrica, e ∇ é um operador vetorial definido, em coordenadas cartesianas, por $\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$.

Se considerarmos uma região do espaço livre (vácuo) onde não exista densidade de carga elétrica (ρ) ou densidade de corrente elétrica (\mathbf{j}), as equações de Maxwell apresentam-se:

$$\begin{aligned}
 I - \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 & II - \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\
 III - \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & IV - c^2 \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Segundo Feynman, Leighton e Sands (2008, p. 275), tem-se que o vetor \mathbf{E} satisfaz a equação da onda. Para demonstrar, primeiramente, toma-se o rotacional nos dois lados da segunda equação de Maxwell para o espaço livre:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{B}) \tag{5}$$

Sabe-se que o rotacional do rotacional de qualquer vetor pode ser escrito como a soma de dois termos que envolvem o divergente e o laplaciano. Assim, tem-se que:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \tag{6}$$

Como o divergente de \mathbf{E} é zero no vácuo, tem-se que:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla^2 \mathbf{E} \tag{7}$$

Derivando os dois lados da quarta equação de Maxwell no espaço livre, tem-se que:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{B}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \tag{8}$$

Isso implica que a derivada de $c^2 \nabla \times \mathbf{B}$ em relação a t é igual à derivada segunda de \mathbf{E} em relação a t .

Igualando as equações 5 e 7, chega-se a:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad 9$$

Entrando com 8 em 9,

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \Rightarrow \text{equação da onda no espaço livre.} \quad 10$$

Retomando a mesma demonstração para o campo magnético \mathbf{B} , com a quarta equação de Maxwell, chega-se ao mesmo resultado:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \Rightarrow \text{equação da onda no espaço livre.} \quad 11$$

Como as equações 10 e 11 são equações de onda tridimensional e $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ é a velocidade da luz no espaço livre, Maxwell demonstrou que a onda eletromagnética viaja no espaço livre à velocidade da luz e, como consequência, seria a luz visível uma onda eletromagnética.

Maxwell havia realizado uma das grandes unificações da física. Antes dele, havia luz, eletricidade e magnetismo. Os dois últimos haviam sido unificados através do trabalho experimental de Faraday, Oersted e Ampère. E então, de repente, a luz não era mais uma “outra coisa”, mas era simplesmente eletricidade e magnetismo nesta nova forma – pequenos pedaços de campos elétricos e magnéticos que se propagam sozinhos pelo espaço. (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008, p. 249)

3.5 A ÓPTICA QUÂNTICA

Após Maxwell, um novo entendimento sobre a natureza da luz só foi ocorrer em 1905, quando Albert Einstein, para explicar o efeito fotoelétrico, retomou o modelo corpuscular e apresentou à comunidade científica seus estudos sobre a ejeção de fotoelétrons de certos metais quando bombardeados por radiação eletromagnética. Partindo das ideias propostas por Max Planck sobre a emissão de radiação por um corpo negro em 1900, Einstein deu um tratamento quantizado à luz e a outras formas de energia radiante para explicar o fenômeno do efeito fotoelétrico. Ele concebeu a onda eletromagnética como um fragmentado de partículas dotadas de quantidades discretas de energia, seria, então, a interação dessas “partículas” de luz com os elétrons do material a fornecer energia para a ejeção de determinados fotoelétrons. De acordo com sua teoria, o campo eletromagnético tem sua energia quantizada em pacotes discretos. Posteriormente, esses pacotes de energia foram chamados de fótons.

A energia de um fóton é proporcional à sua frequência de oscilação ($E \sim f$). Introduzindo a constante de Planck (h) à proporcionalidade, chega-se à equação que fornece a energia que cada fóton carrega:

$$E = hf \quad 12$$

Onde: $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ é a constante de Planck.

O caminho pavimentado por Rutherford, Planck e Einstein levou Niels Bohr a criar um modelo atômico que, enfim, explicou a natureza quântica do espectro de emissão da luz. A explicação, segundo a óptica quântica, dá-se em razão da absorção da energia de um fóton por um elétron, e sua reemissão quando da transição desse elétron de um nível de maior energia para um nível de menor energia, na eletrosfera do átomo.

Quando um elétron recebe a energia de um fóton e salta para um nível de maior energia, é dito que o elétron, nesse nível mais energético, encontra-se em um estado excitado. O processo dura pouco tempo, e logo o elétron retorna para uma camada menos energética (relaxamento). Quando retorna, o elétron emite um pulso de radiação eletromagnética, um fóton (luz). Um fóton é um pacote de energia que ora se comporta com uma onda eletromagnética, ora como uma partícula, isso depende da condição a qual ele é submetido. Logo, a luz não é onda nem partícula, tem ela um comportamento peculiar que, posteriormente, foi estendido às partículas em escala atômica (elétrons, prótons, nêutrons etc.). O estudo da matéria em escala atômica é feito pela mecânica quântica.

O caminho para a compreensão sobre o que é a luz é longo e remete a tempos tão remotos que seria grosseiro estabelecer um marco inicial. Mesmo diante do conhecimento que temos hoje e do avanço científico e tecnológico que seu entendimento nos proporcionou, ainda há lacunas a preencher. O que se sabe é que sua interação com a matéria remete à forma com que uma partícula interage, e sua propagação se dá a mesma velocidade que qualquer outra onda eletromagnética no espaço livre, $c = 300.000 \text{ km/s}$. Então, qual é a compreensão que se tem hoje sobre a luz? Compreende-se que a luz não é onda nem partícula, mas apresenta comportamento ondulatório e corpuscular, ou seja, tem um comportamento dual.

3.6 A REFLEXÃO DA LUZ

Como apresentado no tópico anterior, a reflexão da luz é um processo complexo que tanto pode ser interpretado pelas suas características ondulatórias quanto no domínio do mundo quântico, por fenômenos de absorção e de reemissão de fótons por elétrons em trânsito entre os níveis de energia na eletrosfera dos átomos, das camadas mais externas que compõem o material.

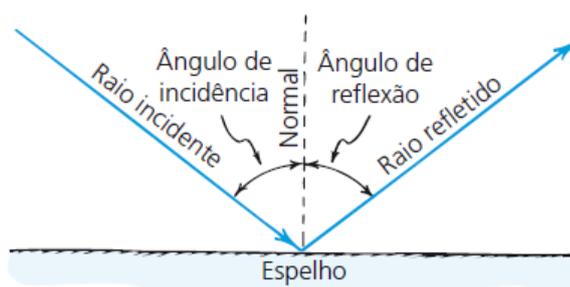
Esse fenômeno bastante complexo ganha contorno um pouco mais simples se o interesse investigativo é no resultado do fenômeno, e não no processo físico que originou o fenômeno. Quando da simplificação sugerida, tem-se que as leis de domínio do fenômeno estão no campo da óptica geométrica. “A óptica geométrica é um tratamento aproximado da luz no qual as ondas luminosas são representadas por linhas retas” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 60).

Considerando a luz como um raio que se propaga em linha reta, é certo que a luz que incide em uma superfície, e é refletida, retornará ao meio de origem também em linha reta, tal que o ângulo de incidência seja igual ao ângulo de reflexão, em relação à linha imaginária normal, perpendicular à superfície.

Segundo a lei da reflexão, o ângulo de incidência da luz é igual ao ângulo de reflexão.

A reflexão da luz em uma superfície lisa, como a da Figura 9, é do tipo especular. Segundo essa lei, o raio incidente, o raio refletido e a normal a superfície estão no mesmo plano.

Figura 9 – Reflexão especular

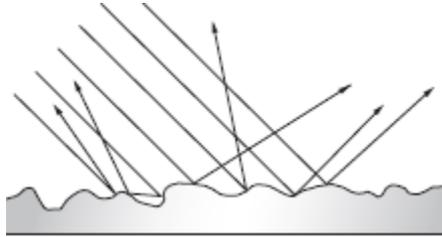


Fonte: Hewitt (2015, p. 522).

Quanto à reflexão que ocorre em uma superfície rugosa, como a da Figura 10, Hewitt (2015) explica que a reflexão luminosa será difusa se o comprimento de onda da luz que atinge a superfície for maior que um oitavo das distâncias sucessivas entre as elevações que existirem na superfície material. Na reflexão difusa, cada pequeno pedaço da superfície é como se fosse

uma pequena superfície plana a refletir a luz, isso faz com que a luz seja irradiada em todas as direções.

Figura 10 – Reflexão difusa



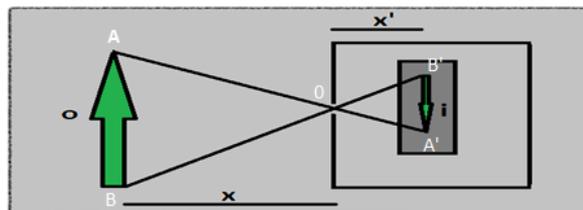
Fonte: Hecht (2017, p. 108).

3.7 A CÂMARA ESCURA E A CÂMERA PINHOLE

Uma câmara escura é um compartimento fechado e oco, dotado de um pequeno orifício para entrada de luz proveniente de uma fonte luminosa; já a câmera pinhole é a aplicação direta da câmara escura para captura de imagens com filmes e papéis fotossensíveis.

Considerando o princípio da óptica geométrica de que em meios homogêneos e transparentes a luz se propaga em linha reta, tem-se que, colocado à frente do orifício de uma câmara escura um objeto que emita luz, seja ele uma fonte primária ou secundária, parcela da luz proveniente do objeto se propagará em linha reta, passará pelo orifício e formará na superfície interna oposta, ou em um anteparo que se encontre em seu interior, a imagem invertida do objeto. Vejamos a Figura 11.

Figura 11 – Ilustração esquemática do funcionamento de uma câmara escura



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Onde: o é a altura do objeto, i é o tamanho de sua imagem, x é a distância entre o objeto e o orifício, e x' é a distância entre o orifício e a imagem.

A relação entre o tamanho do objeto (o) e o tamanho da imagem (i) é obtida em função da semelhança entre os triângulos OAB e $OA'B'$. Assim, tem-se que:

$$\frac{i}{o} = \frac{x'}{x}$$

Já a câmera fotográfica pinhole é a aplicação da câmara escura para a fotografia, colocando-se do lado oposto ao orifício da câmera pinhole um filme ou papel fotográfico, bastando que a entrada de luz seja adequada e delimitada pelo tempo sugerido na especificação do material fotossensível para que a imagem do objeto luminoso seja capturada.

Segundo Bôas, Doca e Biscuola (2013), para que a imagem tenha uma boa nitidez, o orifício da câmara escura deve ser menor que 2 mm; quanto menor o orifício para entrada da luz, melhor a qualidade da imagem. Quanto a efeitos indesejáveis relacionados ao fenômeno físico da difração para a nitidez da imagem, esses são pouco significativos para aberturas que tenham diâmetros próximos àqueles produzidos por uma agulha. No entanto, a literatura especializada na técnica pinhole elenca uma infinidade de fórmulas matemáticas para otimizar a qualidade da fotografia.

Tendo discutido neste capítulo a natureza da luz nas mais diversas abordagens e suas propriedades, é certo que o arcabouço teórico outrora apresentado servirá como embasamento na compreensão do produto educacional confeccionado nesta pesquisa, bem como na sua aplicação. Nesse sentido, no próximo capítulo, será elencado o percurso metodológico trilhado.

4 METODOLOGIA

4.1 PROPOSTA METODOLÓGICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar a proposta metodológica utilizada para investigar se uma sequência didática, no formato de uma UEPS, tal como sugerido por Moreira (2011a), é válida para a aquisição e a retenção duradoura de conceitos e proposições introdutórios de óptica geométrica.

Para a validação da sequência didática, foram utilizadas informações fornecidas por questionários de sondagem e anotações do professor pesquisador. Destaca-se a participação do docente, junto aos alunos, no levantamento de conhecimentos prévios por meio de questionários de sondagem e de diálogos com os estudantes, i.e., levantamento de indícios de aprendizagem significativa observados durante e após a aplicação da UEPS.

Nas seções 4.2 a 4.5, temos, respectivamente, a apresentação do contexto de aplicação da UEPS; a organização da sequência didática; as orientações de execução; e a apresentação da aplicação da UEPS, segundo os parâmetros e passos estabelecidos por Moreira (2011a).

4.2 CONTEXTO DA APLICAÇÃO

A opção por, no decorrer da aplicação da UEPS, visitar uma câmara escura e fotografar com câmeras fotográficas pinhole deu-se em razão do grande apelo entre os adolescentes por instrumentos de captura e de projeção de imagens (máquinas fotográficas, *tablets*, celulares, entre outros). No entanto, é preciso ressaltar que a visita à câmara escura, assim como a ação de fotografar e revelar as fotografias tiradas com câmeras fotográficas pinhole, não foram as atividades-fim, mas apenas o meio para se criar um ambiente dotado de problemas e situações potencialmente significativas, voltados à investigação de fenômenos ópticos.

A UEPS foi concebida e aplicada pelo autor deste trabalho no mês de outubro de 2019, em duas turmas do 9º ano do Colégio Estadual Delfino Oclécio Machado, localizado no Jardim Ingá, distrito do município de Luziânia, estado de Goiás, distante 43 km do centro de Brasília.

Na escola, funcionam quatro modalidades de ensino, em quatro turnos – matutino, intermediário, vespertino e noturno. A unidade de ensino acolhe estudantes do ensino fundamental, do ensino médio e apenas do 1º ano da Educação de Jovens e Adultos (EJA). Ainda, apresenta como opção uma modalidade denominada Novo Ensino Médio (NEM).

Em razão do funcionamento em quatro turnos, as aulas são de apenas 40 minutos, o que faz da escola a maior unidade de ensino em número de alunos do estado de Goiás.

As séries iniciais do ensino fundamental são oferecidas no período matutino; já as séries finais do ensino fundamental, no período intermediário, à exceção do 9º ano, que é oferecido no mesmo turno do primeiro ano do ensino médio, no período vespertino. A Educação de Jovens e Adultos (EJA) e o Novo Ensino Médio (NEM) são oferecidos no período noturno.

A escola tem nove turmas cursando o 9º ano do ensino fundamental, sendo cada uma composta de 38 a 45 alunos. Tem uma quadra poliesportiva, vestiário masculino e feminino, banheiros coletivos, sendo dois masculinos e dois femininos. Ainda, tem uma sala de vídeo com projetor multimídia e outro reserva, além de cantina, biblioteca, pátio, sala de professores, sala de direção, secretaria, laboratório de informática e espaço multiuso (que não tem equipamentos nem insumos laboratoriais, mas é utilizado como laboratório).

O vestiário feminino da escola, com área aproximada de 24,73 m², foi o local escolhido para ser adaptado a funcionar como câmara escura e laboratório fotográfico.

Apesar do grande número de turmas de 9º ano, apenas nas turmas A e B foi aplicada a pesquisa.

4.3 ORGANIZAÇÃO DA UEPS

Para execução da UEPS, que teve por intuito potencializar as chances de aprendizagem de tópicos específicos introdutórios da óptica geométrica, foi necessário interditar o vestiário feminino durante cinco dias. Para isso, primeiramente, todas as janelas e entradas de luz foram vedadas com papelão ondulado⁵. Nos dias subsequentes, se deu a aplicação da prática pedagógica.

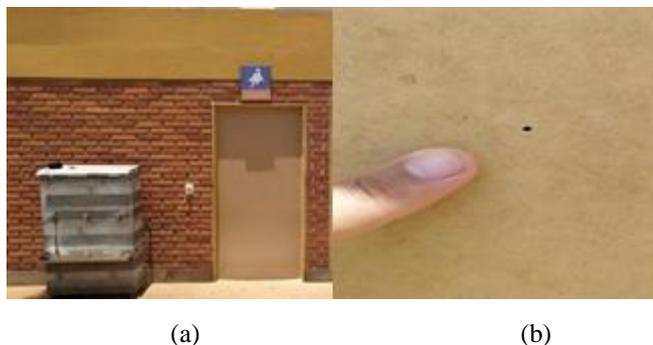
Para transformar o vestiário em uma câmara escura de orifício, a porta metálica de entrada foi substituída por uma placa de madeira MDF⁶, de espessura de 0,3 cm e com as seguintes dimensões: 211,5 cm × 90 cm. Nela, foi feito um orifício de entrada para luz utilizando uma furadeira e uma broca para madeira com espessura de 1 mm. A placa de madeira

⁵ Papelão ondulado é um tipo de papelão facilmente encontrado em lojas que vendem materiais para construção. Esse material é opaco e bastante versátil; sua utilização proporciona boa vedação à entrada de luz no laboratório e na câmara escura. Uma bobina de 1,20m x 10 m desse tipo de papelão custa, em média, 25 reais.

⁶ Placa de madeira MDF (Medium-Density Fiberboard) é uma placa de fibra de madeira de média densidade, facilmente encontrada em lojas que vendem materiais para construção. Seu preço médio é de 35 reais o m².

MDF instalada no local da porta metálica e o orifício de entrada para luz são apresentados na Figura 12, a seguir.

Figura 12 – Placa de MDF substituindo a porta metálica (a) e orifício de entrada de luz (b)



Fonte: Fotografias tiradas pelo autor (2020).

No decorrer das atividades, o vestiário foi adaptado para servir como um laboratório fotográfico. A adaptação consistiu em retirar a placa de MDF, vedar as entradas de luz da porta metálica com uma cortina feita de papelão ondulado e substituir as lâmpadas do interior por uma única lâmpada de LED de luz vermelha. Na Figura 13, é possível ver a bancada de trabalho para a revelação das fotografias e a lâmpada de LED de luz vermelha iluminando o local.

Figura 13 – Bancada de revelação (a) e luz vermelha no laboratório fotográfico (b)



Fonte: Fotografias tiradas pelo autor (2020).

As razões da adaptação do vestiário para servir como uma câmara escura de orifício e um laboratório fotográfico foram:

- criar um ambiente em que os estudantes pudessem investigar o processo de formação de imagens dentro de uma câmara escura;
- revelar fotografias tiradas com uma máquina pinhole;
- discutir em pares o processo experimental; e

- levantar hipóteses e compará-las ao exposto teórico referente à propagação retilínea da luz e à reflexão.

Durante a execução da sequência didática, foi possível:

- levantar conhecimentos prévios específicos relacionados à óptica geométrica (subsunçores);
- levantar hipóteses sobre a formação de imagens em razão da propagação retilínea da luz em meios homogêneos e isotrópicos;
- abordar princípios ópticos relacionados à reflexão da luz; e
- levantar dados para avaliar o quanto foi efetiva a sequência didática para a promoção de aprendizagem significativa de tópicos específicos da óptica geométrica.

A sequência didática é disponibilizada no Apêndice A, sob o formato de planos de aula, conforme proposto por Ferreira e Silva Filho (2019).

Adiante, tem-se um breve resumo das atividades desenvolvidas.

Primeira aula – levantamento de conhecimentos prévios (subsunçores) – apresentação da UEPS, formação dos grupos, visita à câmara escura para visualização e levantamento de hipóteses sobre a formação de imagens em seu interior.

Segunda aula – registro em grupo de um questionário impresso em folha A4 das hipóteses para formação de imagens em diversas situações e elaboração de um desenho como hipótese para formação da imagem no anteparo.

Terceira aula – oficina pinhole: os alunos são convidados a fotografar com a latinha (câmera pinhole) e revelar as fotografias no laboratório fotográfico.

Quarta aula – aula mista com maior grau de complexibilidade (aula expositiva, dialogada e experimental): demonstração do espalhamento sofrido pela luz ao passar por um prisma, levantamento de subsunçores sobre o porquê das cores dos objetos e sobre a formação de imagens no interior da câmara escura.

Quinta aula – aula expositiva verbal e apresentação no quadro de modelos para retratar: o princípio da propagação retilínea da luz, o espalhamento sofrido pela luz ao passar por um prisma, o porquê das cores, a formação de imagens no interior do globo ocular e as relações métricas matemáticas que relacionam o tamanho de imagens e objetos em câmaras escuras.

Sexta aula – sondagem final e avaliação: os alunos são convidados a refletir sobre os fenômenos ópticos investigados, em particular, sobre a formação de imagens no interior da câmara escura e a formação de imagens em câmaras fotográficas.

Em seguida, é distribuída aos estudantes uma atividade em folha A4 com questões abertas para serem respondidas individualmente.

Avaliação da UEPS – análise dos dados e comparação das sondagens oral e escrita; o processo tem o intuito de buscar evidências de aprendizagem significativa ao longo da aplicação da UEPS.

4.4 ORIENTAÇÕES PARA EXECUÇÃO DA UEPS

As orientações de execução contemplam seis aulas hierarquicamente organizadas para proporcionar, a alunos do 9º ano do ensino fundamental, situações que colaborem para elevar as possibilidades de aprendizagem significativa de conceitos introdutórios de óptica geométrica. Para tal, foi utilizada como referencial prescritivo a teoria da aprendizagem significativa, de autoria de David Ausubel (2003).

As Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), segundo Moreira (2011a), são sequências didáticas de tópicos específicos do conhecimento, declarativo e/ou procedimental, baseadas na ótica ausubeliana e fundamentadas para colaborar com a promoção da aprendizagem significativa, segundo parâmetros elaborados por Ausubel (2003). Moreira (2011a) propõe, a partir de seus modelos sobre unidades de ensino, corrigir, segundo ele, e pelo menos em parte, o equívoco que é compreender a aprendizagem mecânica como um modelo eficiente para gerar aprendizagem, ou seja, memorização sem significado como padrão de aprendizagem.

Para viabilizar a UEPS e potencializar as chances de êxito, são propostos na sequência do trabalho:

- a adaptação de uma estrutura física da escola para servir como uma câmara escura, em tamanho suficiente a comportar grupos de, no mínimo, cinco alunos;
- a investigação de fenômenos ópticos associados à formação de imagens;
- a readaptação dessa estrutura para servir como um laboratório fotográfico;
- a oferta de uma oficina de fotografia utilizando câmaras fotográficas pinhole; e
- a ministração de aulas expositivas verbais potencialmente significativas.

A sequência didática tem como expectativa a promoção de aprendizagem significativa; logo, parte da premissa de que materiais potencialmente significativos, a predisposição do sujeito para aprender e aquilo que o aprendiz já sabe são fatores fundamentais para aquisição e retenção duradoura da informação (MOREIRA, 2011b). Por essa razão, faz-se uma mescla entre atividades investigativas e atividades teóricas para facilitar a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora de saberes, com intuito de promover a aprendizagem significativa de conceitos relacionados à óptica geométrica.

No primeiro encontro, os alunos são convidados a investigar a formação de imagens projetadas em um anteparo translúcido, dentro da câmara escura.

O professor procura, por meio do diálogo com os alunos, verificar a existência de conhecimentos prévios relevantes na estrutura cognitiva dos estudantes (subsunçores) e necessários à aprendizagem dos princípios ópticos geométricos relacionados à formação de imagens.

A projeção da imagem externa no anteparo translúcido, junto ao diálogo entre professor e alunos, serve ainda como organizador prévio, em razão do grau de complexibilidade e de profundidade que a discussão pode tomar.

No segundo encontro, os estudantes são convidados a formar grupos de até cinco pessoas, para, colaborativamente, responderem a um questionário de registro de hipóteses sobre a formação de imagens em diversas situações e elaborarem um desenho como hipótese para formação da imagem no anteparo.

Após a aplicação do questionário, será proposto um debate a respeito das questões abordadas para ajudar na promoção da aquisição e da reestruturação cognitiva de subsunçores de forma não impositiva e não literal.

Acredita-se que a interação dos alunos em grupos colaborativos sirva, de maneira não impositiva, para trocar conhecimentos e colaborar na aquisição de subsunçores adequados por estudantes que ainda não os tenham. Além disso, a troca de ideias serve para colaborar com a reestruturação de conceitos e de proposições existentes na estrutura cognitiva dos alunos.

No terceiro encontro, os estudantes são convidados a fotografar com a latinha e revelar suas fotografias no laboratório fotográfico.

A atividade parece lúdica, mas, na verdade, visa a aguçar o senso crítico dos alunos e estabelecer uma relação de intimidade entre os discentes e a luz visível. A câmera pinhole

(latinha fotográfica) oferece apenas uma possibilidade de sucesso a cada vez em que é utilizada. Acredita-se que a limitação de possibilidades leve o aprendiz a prestar mais atenção ao seu redor para, então, fotografar. O tempo para que se estabeleça a grafia no papel fotográfico também é um fator importante: a fotografia com a câmera pinhole “obriga” o aluno a prestar atenção em fatores como intensidade e exposição luminosa. Com a prática, o aprendiz aumenta a intimidade e a sensibilidade em relação à energia radiante, visto que não há um tempo exato para exposição do papel fotográfico à luz para a grafia da foto, sendo necessários intimidade com a técnica e senso crítico para, como resultado, se ter uma boa fotografia.

É de se esperar que a limitação das possibilidades desperte uma maior atenção dos alunos, tanto para o processo quanto para a interpretação física de um fenômeno natural. Também visa a auxiliar em futura problematização, para validar, por meio de método matemático, o princípio da propagação retilínea da luz.

O processo físico que envolve o caminhar da luz até a grafia do papel fotográfico será abordado, em momento posterior, a fim de dar sentido ao artifício matemático que faz uso da semelhança de triângulos para calcular a relação entre a altura de um objeto fotografado e a altura da imagem desse objeto no papel fotográfico. A atividade visa, ainda, a ajudar a quebrar concepções empírico-indutivistas que, por ventura, os estudantes venham a postular sobre a projeção de imagens e trazer à luz a importância do método matemático para fundamentar a investigação racional dos fenômenos físicos. Segundo Carvalho (2010, p. 59):

Uma consequência importante para o ensino e principalmente para as aulas de laboratório é o entendimento de que as observações e o experimento não são a rocha sobre a qual a ciência está construída; essa rocha é a atividade racional de geração de argumentos com base nos dados obtidos. E é essa a meta do nosso ensino: criar um ambiente de aprendizagem de modo que os nossos alunos adquiram habilidade de argumentar a partir dos dados obtidos, procurando a construção de justificativas.

A lata sendo utilizada como máquina fotográfica tem um grande poder de encantamento sobre as pessoas, tanto que é comum a câmera fotográfica pinhole receber o nome de “lata mágica”. Proporcionar aos alunos o processo de investigação sobre como ocorre a formação da imagem no interior da lata pode potencializar o interesse racional do aprendiz pela investigação de fenômenos físicos e colaborar para a aquisição de habilidades argumentativas fundadas em dados.

No quarto encontro, o objetivo é proporcionar uma nova situação-problema, em nível mais complexo.

O intuito da aula mista (expositiva, dialogada e experimental) é ajudar os estudantes a construir, diferenciar e reorganizar conceitos e proposições sobre a luz visível, além de sondar a existência de subsunçores sobre: a luz branca, as cores dos objetos e o fenômeno físico de espalhamento, da reflexão e da absorção da luz.

Por meio da exposição oral verbal significativa, espera-se que o aluno que ainda não tenha subsunçores venha a adquiri-los – ou, tanto melhor, que substitua aqueles de significação inferior ao esperado, de maneira não mecânica, literal ou impositiva. Ou, ainda, seja ao aluno proporcionado um momento reflexivo para que processos de diferenciação progressiva e de reconciliação integradora ajudem sua estrutura cognitiva a reorganizar e diferenciar subsunçores.

Subsunçores não são estruturas rígidas, ao contrário, estão em constante reorganização, isto é, são flexíveis de tal forma que se moldam conforme são apresentados a novas situações-problema e adquirem maior estabilidade à medida que se maturam novos conhecimentos (MOREIRA, 2011b).

Nessa aula, com o auxílio de um prisma, os alunos são convidados a observar o fenômeno de espalhamento sofrido pela luz ao passar por meios materiais com índice de refração diferente.

Por meio do diálogo com os estudantes, é feita uma série de indagações para tentar realizar o levantamento de possíveis subsunçores que colaborem a dar sentido ao entendimento do porquê da luz branca se dividir em diferentes cores ao passar pelo prisma e do porquê das cores dos objetos. É explorado o conceito físico acerca da reflexão e da absorção da luz, e os alunos são instigados a levantar hipóteses sobre como se dá a projeção da imagem externa colorida no anteparo dentro da câmara escura.

No quinto encontro, a aula é expositiva e apresentada oralmente, por meio de argumentos matemáticos e de modelos no quadro.

É apresentado formalmente aos estudantes o princípio da propagação retilínea da luz, explicando-se o porquê de a luz branca ser refratada ao passar pelo prisma, o porquê das cores dos objetos e a concepção geométrica para a formação de imagens externas no interior do olho humano.

Em um segundo momento, são revisadas as relações métricas matemáticas em triângulos semelhantes. Ainda, são comparadas as relações métricas entre a altura de um modelo externo à câmara escura e o tamanho de sua imagem no interior desta. Por fim, é

levantado um breve debate sobre a validade do aporte teórico matemático com relação ao princípio físico da propagação retilínea da luz.

Após esse momento, é investigado se os discentes conseguem ver alguma relação entre o argumento matemático apresentado, o princípio da propagação retilínea da luz e a explicação para a formação de imagens no interior da câmera fotográfica pinhole.

Nessa aula, surgem novos problemas, em maior nível de complexibilidade. Assim, é verificado se o processo de reconciliação integradora dos saberes está ocorrendo. A sondagem é oral, dialogada e depende da observação do professor para aferir como os alunos estão lidando com a informação.

No sexto encontro, espera-se verificar se os processos de reconciliação integradora e de diferenciação progressiva já resultam em estruturas cognitivas prontas a ancorar saberes mais complexos. A aula é dividida em dois momentos.

No primeiro momento, é feita a comparação entre o aporte teórico e o aporte experimental para a reflexão da luz e a propagação retilínea em meios homogêneos e isotrópicos, por meio de exposição oral e do diálogo com os alunos.

Já no segundo momento, é aplicado um questionário por meio do qual os estudantes são convidados a fazer uma reflexão sobre os fenômenos ópticos investigados. É distribuída aos alunos uma atividade em folha A4, para ser respondida individualmente, pois visa a uma última sondagem.

A avaliação da UEPS é feita ao longo de todo o processo, e esta última sondagem tem apenas o intuito de verificar se há indícios de aprendizagem significativa.

4.5 APLICAÇÃO DA UEPS SEGUNDO PARÂMETROS PROPOSTOS POR MOREIRA (2011a)

Moreira (2011a) sugere em seu trabalho alguns passos para a elaboração de uma UEPS. Seguindo suas orientações, é apresentada neste tópico uma sequência didática fundamentada na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003), tal como proposto por Moreira (2011a).

1 – Situação inicial: na primeira aula, inicialmente, foi realizada uma breve apresentação da UEPS, para que os alunos tomassem ciência do trabalho a ser feito. Posteriormente, solicitou-se aos estudantes que formassem grupos de até cinco integrantes para visitar a câmara escura de orifício.

Antes de entrar na câmara escura com o primeiro grupo, foi solicitado que um aluno de outro grupo ficasse à frente do orifício de entrada de luz, mantendo uma distância entre 2,0 e 2,5 metros da placa de madeira MDF.

Já dentro da câmara escura, foram feitos os seguintes questionamentos aos integrantes do grupo:

I – Será possível visualizar o que se encontra fora desse local?

Objetivo: verificar se os estudantes estão atentos à pequena entrada de luz, uma vez que essa é a única forma de olhar diretamente o meio externo.

II – Utilizando esse pequeno orifício (momento em que o professor aponta para a pequena entrada de luz), mas sem olhar diretamente por ele, será possível visualizar o que se encontra fora desse local?

Objetivo: verificar a existência de conhecimentos prévios relevantes na estrutura cognitiva dos discentes, necessários à aprendizagem dos princípios ópticos relacionados à formação de imagens, subsunçores.

Aguardar e anotar as respostas relevantes para, em momento futuro, levantar se há indícios de subsunçores.

Logo em seguida, um anteparo translúcido feito com papel de seda e papelão foi posicionado à frente do orifício de entrada de luz, para que os alunos pudessem visualizar a projeção da imagem externa no anteparo. Vejamos a Figura 14.

Figura 14 – Projeção da imagem invertida em um anteparo translúcido no interior da câmara escura



Fonte: Fotografia tirada pelo autor (2020).

Esperou-se a reação dos estudantes, e os questionamentos continuaram:

I – Como é possível visualizarmos a imagem externa no anteparo?

Objetivo: verificar novamente a existência de conhecimentos prévios relevantes na estrutura cognitiva dos discentes, necessários à aprendizagem dos princípios ópticos relacionados à formação de imagens, subsunçores.

II – Girando o anteparo, a imagem continua invertida?

Objetivo: além de verificar a existência de conhecimentos prévios relevantes, fazer uso do momento e do diálogo com os alunos como organizador prévio, tendo em vista a complexibilidade e a profundidade que a discussão pode tomar.

III – Afastando o anteparo do orifício, o que acontece com a imagem? E aproximando o anteparo, o que acontece?

Objetivo: além de verificar a existência de conhecimentos prévios relevantes, fazer uso do momento e do diálogo com os alunos como organizador prévio, tendo em vista a complexibilidade e a profundidade que a discussão pode tomar.

2 – Situação-problema: na aula seguinte, primeiramente, foi solicitado que os alunos formassem novamente os grupos da aula anterior e foi delegado, a cada grupo, para que, de forma colaborativa, os integrantes respondessem a um questionário de sondagem (questionário de sondagem inicial). No questionário, foram abordadas questões sobre a visão humana, o porquê da inversão da imagem no anteparo e o funcionamento das máquinas fotográficas, em particular, as que usam filme fotográfico. A última questão solicitou que os estudantes elaborassem um desenho para explicar a formação da imagem no anteparo.

O intuito foi verificar a existência de subsunçores, a necessidade de uma proposta mecânica introdutória e a coleta de dados para busca de indícios de aprendizagem significativa.

Após a aplicação do questionário, foi proposto um debate a respeito das questões abordadas. O objetivo foi ajudar na promoção da aquisição de subsunçores de forma não impositiva e não literal, ou seja, fazer da discussão, com a mediação do professor, um novo organizador prévio, em razão de intervenções construtivas e de esclarecimentos de dúvidas.

3 – Oficina pinhole: na terceira aula, os alunos foram convidados a formar novamente os grupos da aula anterior, para tirar fotos com a câmera fotográfica pinhole e revelá-las no laboratório fotográfico.

O vestiário feminino, que, anteriormente, foi utilizado como câmara escura, agora adaptado, foi usado como laboratório fotográfico.

I – Primeiramente, a máquina fotográfica pinhole (latinha fotográfica) foi apresentada aos alunos. Os detalhes físicos sobre seu funcionamento foram suprimidos, para, em momento oportuno, serem retomados, mas os estudantes foram instruídos sobre como fotografar com a câmera fotográfica pinhole.

Figura 15 – Alunos fotografando com a câmera fotográfica pinhole



Fonte: Fotografia tirada pelo autor (2020).

Em seguida, foi distribuída uma máquina fotográfica pinhole a cada grupo, e os alunos foram convidados a fotografar. Na Figura 15, é observado um grupo fotografando. Depois de produzidas as fotografias, um grupo por vez foi convidado a retornar ao laboratório para acompanhar o processo de revelação. Na Figura 16, é possível ver alguns negativos revelados.

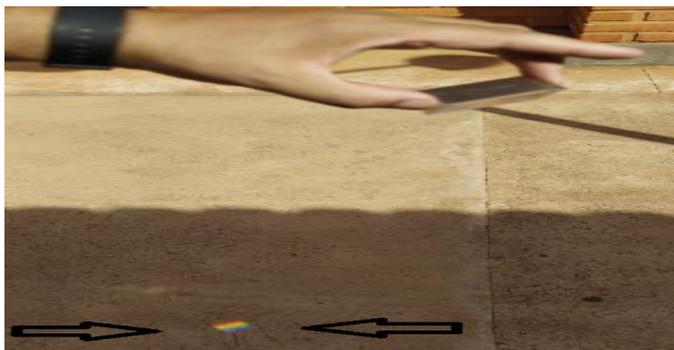
Figura 16 – Negativos descansando em água após a revelação



Fonte: Fotografia tirada pelo autor (2020).

4 – Nova situação-problema, em nível mais alto de complexidade: na quarta aula, os estudantes foram convidados a observar o fenômeno de espalhamento sofrido pela luz ao passar por um prisma. Na Figura 17, tem-se o momento de apresentação do fenômeno a um grupo de alunos.

Figura 17 – Espalhamento da luz branca ao passar por um prisma de vidro



Fonte: Fotografia tirada pelo autor (2020).

Para a sondagem de conhecimentos prévios sobre o fenômeno e a apropriação cognitiva de conceitos e proposições pelos estudantes, foi estimulada uma roda de conversa, com as seguintes questões:

I – Como se forma um arco-íris?

Objetivo: verificar a existência de subsunçores que interpretem a luz branca como sendo a junção de todas as cores.

II – A visão, ou seja, processo que nos permite enxergar, ele acontece de dentro para fora, ou de fora para dentro de nós?

Objetivo: verificar se há alunos com subsunçores prontos a se relacionar ao fenômeno da reflexão luminosa e retomar a concepção para a formação de imagens no olho humano.

No decorrer da roda de conversa, foi abordado o conceito sobre reflexão luminosa regular e difusa. Para complementar a explicação do conceito, foram desenhados diagramas na lousa. Em seguida, foi lançada a próxima questão.

III – Por que os objetos têm cores diferentes?

Objetivo: apresentado o conceito sobre reflexão, verificar se os alunos fazem alguma correlação entre o fenômeno da reflexão luminosa e o da absorção para explicar a cor dos objetos.

IV – Os estudantes foram lembrados de que a imagem projetada no anteparo dentro da câmara escura, no primeiro encontro, era colorida. Assim, foram questionados se existe alguma relação direta entre o processo de reflexão e a projeção da imagem no anteparo.

Objetivo: verificar se a discussão e o diálogo levam os alunos a compreender o fenômeno da reflexão luminosa e o fenômeno da absorção como necessários para a formação da imagem e para explicar a cor dos objetos.

V – O fenômeno de espalhamento sofrido pela luz, ao passar pelo prisma, voltou a ser discutido por meio de diagramas no quadro.

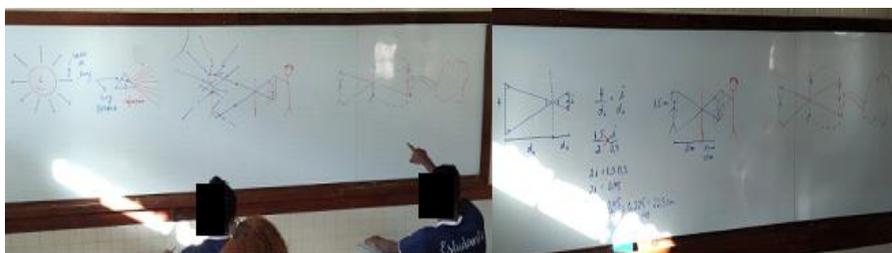
Objetivo: mostrar que a luz branca é a junção de todas as cores, a fim de discutir o fenômeno da absorção e fornecer ao estudante saberes que deem sentido ao entendimento físico sobre a possibilidade de a luz sofrer um desvio angular, ao mudar de meio material.

5 – Aula expositiva dialogada integradora: nessa aula, conceitos e proposições sobre óptica geométrica foram revisados. Avaliou-se, por meio do diálogo com os alunos, a interpretação a respeito dos fenômenos físicos que foram estudados; subsunçores foram reavaliados e testados quanto à sua estabilidade, assim como as relações métricas matemáticas entre a imagem e objeto foram testadas. Para tal, o professor apresentou, na lousa e verbalmente, modelos e exemplos:

- do princípio da propagação retilínea da luz;
- da dispersão da luz branca ao passar por um prisma;
- do porquê das cores dos objetos;
- da formação de imagens no interior do olho humano; e
- das relações métricas matemáticas em triângulos semelhantes para solucionar problemas que envolvam câmaras escuras.

Na Figura 18, é possível ver os estudantes interagindo com o professor durante a aula.

Figura 18 – Lousa durante a aula expositiva dialogada e integradora



Fonte: Fotografia tirada pelo autor (2020).

Em seguida, foi realizado um breve debate sobre a efetividade do método matemático para validar o princípio físico da propagação retilínea da luz. O professor mediou a discussão, com objetivo de que os alunos percebessem a importância da matemática para a ruptura empírico-indutivista dos conceitos.

Objetivo: oferecer um momento de estudo diferenciado e propício para que processos de reconciliação integradora e de diferenciação progressiva ocorram, apresentar conteúdos em níveis crescentes de dificuldade, retomar aspectos gerais e estruturais do conteúdo, destacar semelhanças e diferenças entre os tópicos de óptica geométrica estudados.

6 – Sondagem final: foi investigado, com perguntas simples, se os discentes observaram alguma semelhança entre o processo de formação de imagens no interior da câmara escura e dentro da máquina pinhole. Vejamos as perguntas:

I – O princípio da propagação retilínea da luz fornece uma explicação lógica para a formação de imagens no interior da câmara fotográfica pinhole?

II – O princípio da propagação retilínea da luz dá uma explicação lógica para a formação de imagens no interior da câmara escura?

III – A relação matemática apresentada para relacionar o tamanho do objeto e sua imagem ajuda a comprovar a validade do princípio da propagação retilínea da luz?

Objetivo: verificar se novos problemas, em maior nível de complexibilidade, são compreendidos e explicados utilizando-se argumentos não indutivistas, verificar se processos de diferenciação progressiva e de reconciliação integradora estão ocorrendo.

A sondagem foi oral e dialogada, e teve o professor como figura ativa na mediação e na observação para aferir como os alunos estavam lidando com a informação. Os indícios de aprendizagem significativa foram anotados para análise futura.

7 – Avaliação final: foi aplicado o questionário de sondagem final em folha A4, que visou a aferir a interpretação conceitual dos estudantes sobre os fenômenos ópticos investigados, em particular, os fenômenos da reflexão luminosa, da propagação retilínea da luz em meios isotrópicos e homogêneos e da formação de imagens no interior da câmara escura e da câmara pinhole.

A avaliação da UEPS foi feita ao longo de todo o processo, e esta última sondagem teve o intuito apenas de verificar a existência de indícios de aprendizagem significativa.

8 – Avaliação da própria UEPS: foram feitas a análise global dos dados das sondagens inicial e final, a análise de anotações e falas dos estudantes durante as atividades realizadas, e a análise dos desenhos que evidenciam a interpretação dos fenômenos ópticos nas sondagens inicial e final. Todas com intuito de verificar indícios de aprendizagem significativa.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados obtidos pela aplicação das etapas definidas no percurso metodológico adotado, bem como serão realizadas as análises de tais resultados.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo é dedicado à apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos durante a aplicação da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). Para tal, foram consideradas as anotações e a crítica do professor, o qual, durante a execução das atividades, procurou o diálogo e incentivou o debate entre os alunos. Também foram utilizados os questionários de sondagem inicial e final.

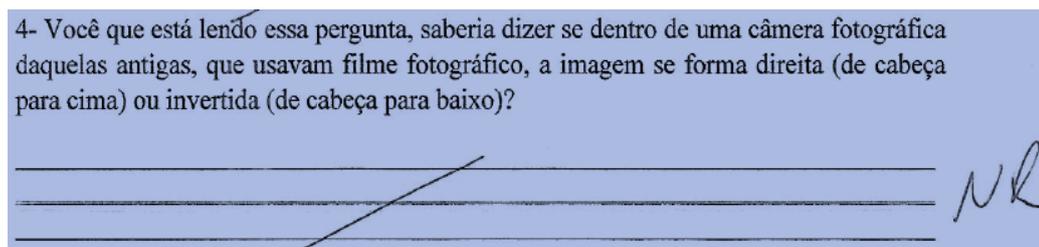
Para análise qualitativa das respostas dos questionários de sondagem inicial e final, foi utilizada a categorização apresentada por Ferreira *et al.* (2018). A categorização mencionada elenca cinco possibilidades de categorização para as respostas dos estudantes e tem o intuito de auxiliar na busca por indícios de aprendizagem significativa, segundo parâmetros ausubelianos (FERREIRA *et al.*, 2018, p. 10-11):

- Não Responderam (NR): são questões a que os alunos não responderam.
- Fuga do Tema (FT): são consideradas respostas cuja essência não se relaciona de maneira alguma com o tema abordado.
- Incoerente (IN): são respostas em que aparecem elementos relacionados ao tema, porém abordadas com pouco ou nenhum rigor técnico científico.
- Coerente (CO): são respostas que se relacionam com o tema, porém com pouco ou nenhum detalhamento.
- Resposta Adequada (RA): são respostas coerentes e que contêm riquezas de detalhes do tema abordado.

Para melhor compreensão da categorização utilizada na pesquisa, a seguir são apresentados recortes dos questionários de sondagem inicial e final, com respostas e análise segundo parâmetros estabelecidos por Ferreira *et al.* (2018).

Não Responderam (NR): são questões em que os alunos deixaram o campo para resposta em branco. A Figura 19 traz um exemplo desse quesito:

Figura 19 – Exemplo de questões não respondidas – NR

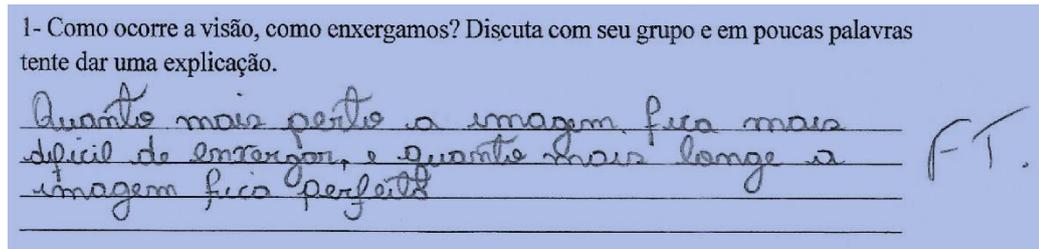


Fonte: Dados da pesquisa (2020).

São consideradas questões não respondidas aquelas em que o aluno deixou o campo para respostas inteiramente em branco. O esclarecimento faz-se necessário para a correta diferenciação entre as categorizações.

Fuga do Tema (FT): respostas cuja essência não se relaciona de maneira alguma com o tema abordado. A Figura 20 traz um exemplo desse quesito:

Figura 20 – Exemplo de questão que fugiu ao tema – FT

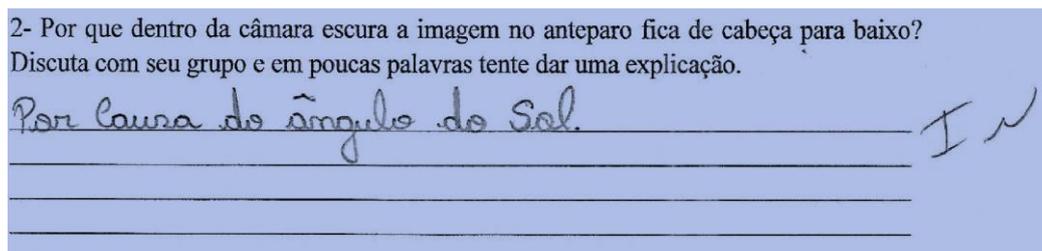


Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Essa resposta foi produzida por um grupo colaborativo. Deve-se notar que o grupo não compreende o questionamento feito pelo professor e direciona a resposta para a nitidez com que enxergamos as coisas. Nesse caso, a resposta foge ao tema e impossibilita sua avaliação.

Incoerente (IN): são respostas em que aparecem elementos relacionados ao tema, porém abordados com pouco ou nenhum rigor técnico científico. A Figura 21 traz um exemplo desse quesito:

Figura 21 – Exemplo de resposta incoerente – IN

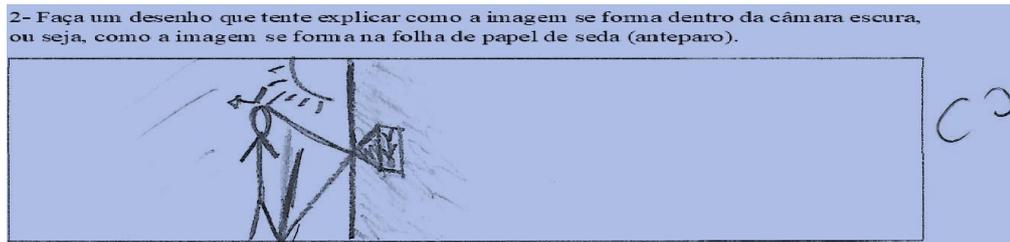


Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Na resposta a essa questão, os estudantes compreendem o questionamento e tentam dar uma resposta lógica para o porquê da inversão da imagem dentro da câmara escura, mas falham quanto ao rigor técnico científico.

Coerente (CO): são respostas que se relacionam com o tema, porém com pouco ou nenhum detalhamento. A Figura 22 traz um exemplo desse quesito:

Figura 22 – Exemplo de resposta coerente – CO



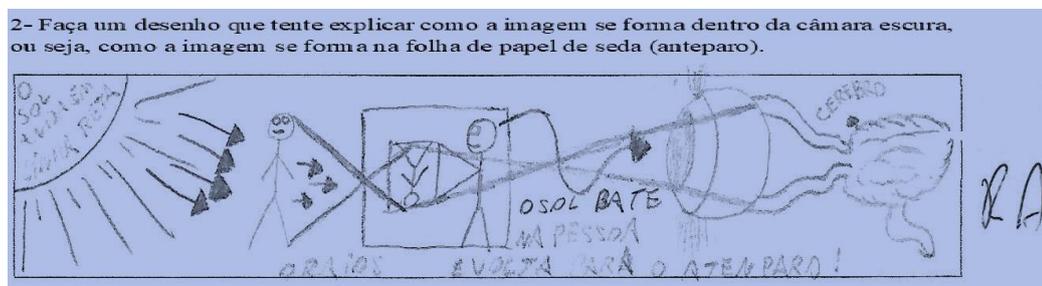
Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Na resposta à questão, o aluno usa de conhecimentos físicos abordados durante a aplicação da UEPS.

Pelo ângulo que ele desenha o Sol, é possível inferir sua compreensão a respeito da necessidade do processo de reflexão da luz solar para a formação da imagem no anteparo dentro da câmara escura. Percebe-se, ainda, que o princípio da propagação retilínea da luz já integra sua estrutura cognitiva. A resposta tem relação íntima com o tema abordado, só não é completa em razão de o estudante não apresentar a direção dos raios luminosos.

Resposta Adequada (RA): são respostas coerentes e que contêm riquezas de detalhes do tema abordado. A Figura 23 traz um exemplo desse quesito:

Figura 23 – Exemplo de resposta coerente – CO



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Nessa resposta, categorizada como RA, o aluno faz um grande esforço intelectual para usar de princípios físicos abordados durante a execução da UEPS e, com rigor técnico e científico, usa do conhecimento para dar uma explicação física e lógica ao fenômeno em questão, ou seja, a formação de imagens no interior de uma câmara escura. Não satisfeito, o estudante vai além e procura fornecer informações sobre como a imagem se forma no interior do globo ocular. A riqueza de detalhes evidencia uma resposta que vai além da categorização coerente (CO).

5.1 DADOS DA APLICAÇÃO DA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

O produto educacional foi aplicado em duas turmas do 9º ano do ensino fundamental, as quais, no decorrer do texto, serão denominadas de turma A e de turma B, do Colégio Estadual Delfino Oclécio Machado, localizada no Jardim Ingá, distrito do município de Luziânia, no estado de Goiás. As turmas A e B somam, juntas, um total de 75 alunos, mas, devido à frequência nos dias de aplicação do produto educacional, apenas 52 alunos responderam ao questionário de sondagem inicial, e 51 alunos ao questionário de sondagem final. Para aplicação do questionário de sondagem inicial, os estudantes foram organizados em grupos de, no máximo, cinco pessoas; já o questionário de sondagem final foi aplicado para os alunos, individualmente. Os questionários de sondagem diferem em sua essência de um pré-teste e de um pós-teste, pois apenas auxiliam a busca por índicos, ou não, de aprendizagem significativa.

Aplicado o questionário de sondagem inicial, as respostas às questões foram categorizadas e tabuladas. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Tabulação do questionário, sondagem inicial – Turma A

| Grupo | Nº de alunos | Questões | | | |
|---------|--------------|----------|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Grupo 1 | 4 | FT | IN | IN | CO |
| Grupo 2 | 5 | IN | IN | CO | IN |
| Grupo 3 | 4 | IN | IN | IN | CO |
| Grupo 4 | 4 | FT | IN | IN | IN |
| Grupo 5 | 5 | FT | IN | CO | CO |
| Grupo 6 | 5 | FT | IN | IN | IN |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Tabela 2 – Tabulação do questionário, sondagem inicial – Turma B

| Grupo | Nº de alunos | Questões | | | |
|---------|--------------|----------|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Grupo 1 | 4 | IN | IN | CO | CO |
| Grupo 2 | 4 | CO | IN | IN | IN |
| Grupo 3 | 5 | IN | IN | IN | CO |
| Grupo 4 | 4 | IN | IN | IN | CO |
| Grupo 5 | 4 | IN | IN | FT | IN |
| Grupo 6 | 4 | IN | IN | IN | IN |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os números de respostas segundo a categorização utilizada. A Tabela 3 corresponde à turma A, e a Tabela 2 corresponde à turma B.

Tabela 3 – Números de respostas por categoria, sondagem inicial – Turma A

| Questão | Respostas | | | | |
|---------|-----------|----|----|----|----|
| | NR | FT | IN | CO | RA |
| 1 | 0 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 4 | 2 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| Total | 0 | 4 | 15 | 5 | 0 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Tabela 4 – Números de respostas por categoria, sondagem inicial – Turma B

| Questão | Respostas | | | | |
|---------|-----------|----|----|----|----|
| | NR | FT | IN | CO | RA |
| 1 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 4 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| Total | 0 | 1 | 18 | 5 | 0 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A Tabela 5 apresenta os números totais de respostas por categoria, ou seja, a somatória de respostas apresentadas pelas turmas A e B, segundo a categorização utilizada.

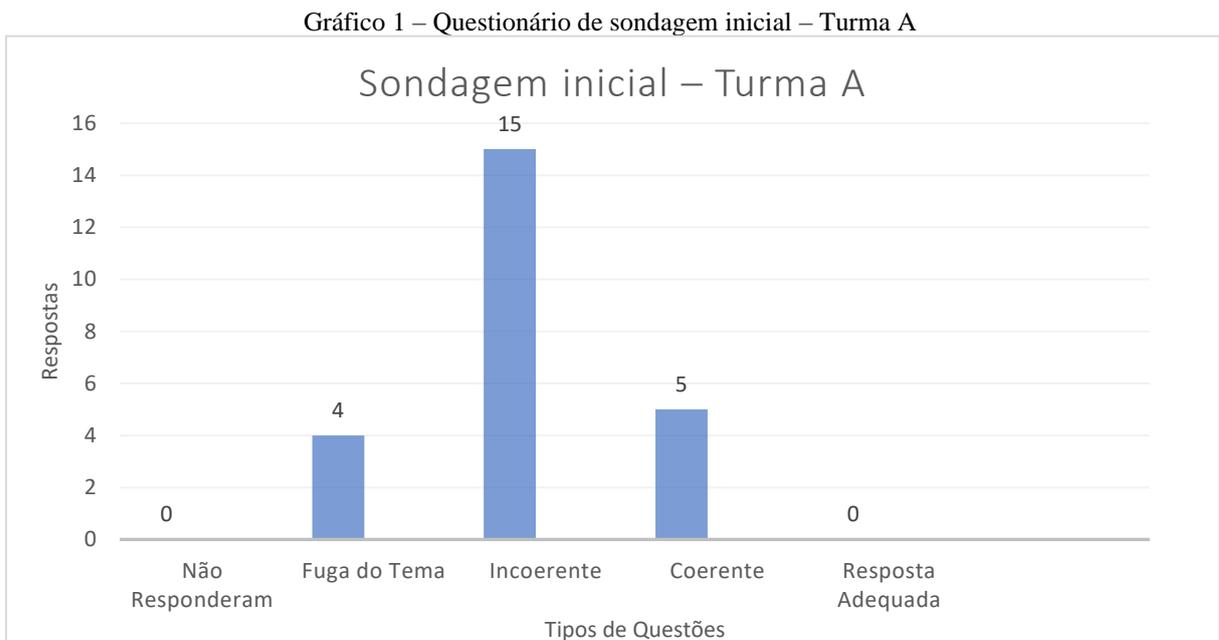
Tabela 5 – Números de respostas por categoria, sondagem inicial – Turmas A e B

| Questão | Respostas | | | | |
|---------|-----------|----|----|----|----|
| | NR | FT | IN | CO | RA |
| 1 | 0 | 4 | 7 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 8 | 3 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 |
| Total | 0 | 5 | 33 | 10 | 0 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Para auxiliar a compreensão dos dados das tabelas 3, 4 e 5, foram plotados os gráficos apresentados a seguir.

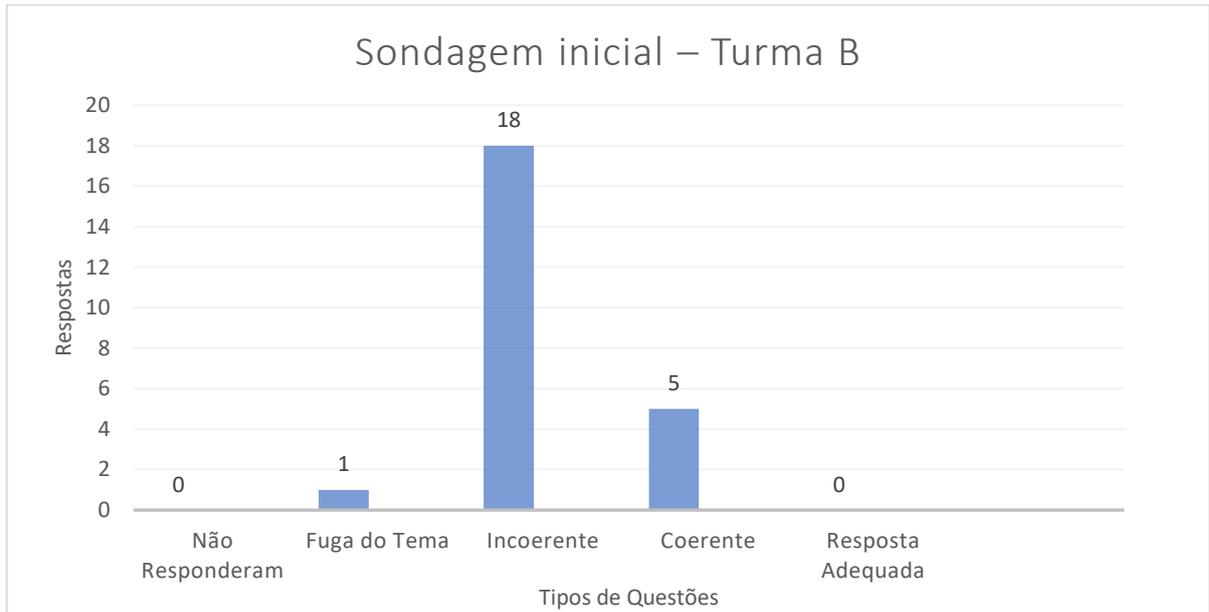
O Gráfico 1 corresponde aos dados da Tabela 3, que faz referência ao número de respostas, segundo a categorização atribuída a cada questão, no questionário de sondagem inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Gráfico 2 corresponde aos dados da Tabela 4, e tal como o anterior, faz referência ao quantitativo de respostas segundo a categorização, para cada questão, no questionário de sondagem inicial.

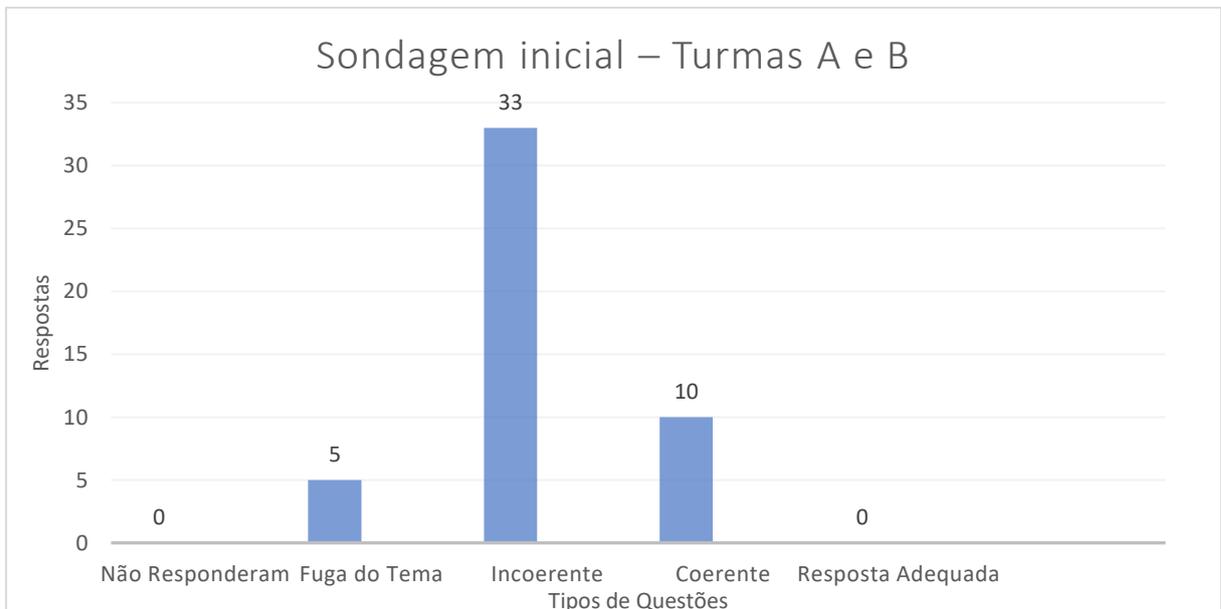
Gráfico 2 – Questionário de sondagem inicial – Turma B



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Gráfico 3 corresponde aos dados da Tabela 5. Apresenta o quantitativo total de respostas segundo a categorização atribuída a cada questão, no questionário de sondagem inicial.

Gráfico 3 – Questionário de sondagem inicial – Turmas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Finalizadas a tabulação e a plotagem dos dados para o questionário de sondagem inicial, foi dado início a um tratamento semelhante para o questionário de sondagem final.

Primeiramente, é apresentada a tabulação das respostas dos alunos ao questionário de sondagem final, segundo a categorização proposta por Ferreira *et al.* (2018); depois, o quantitativo de respostas por categoria é tabulado; e, posteriormente, os gráficos que comparam a categorização das respostas é apresentado.

O questionário de sondagem final foi aplicado a todos os estudantes, para que a busca por indícios de aprendizagem significativa fosse mais efetiva.

Da categorização das respostas apresentadas pelos alunos às questões do questionário de sondagem final, resultou a tabulação apresentada nas Tabelas 6 e 7.

A Tabela 6 corresponde à turma A, e a Tabela 7 corresponde à turma B.

Tabela 6 – Tabulação do questionário, sondagem final – Turma A

| Aluno | Questões | | | |
|-------|----------|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | RA | CO | CO | IN |
| 2 | IN | NR | NR | NR |
| 3 | IN | IN | FT | RA |
| 4 | CO | CO | FT | RA |
| 5 | IN | IN | IN | IN |
| 6 | CO | CO | CO | RA |
| 7 | CO | CO | CO | CO |
| 8 | IN | IN | CO | IN |
| 9 | CO | CO | IN | NR |
| 10 | IN | IN | IN | RA |
| 11 | IN | IN | IN | RA |
| 12 | IN | IN | CO | RA |
| 13 | NR | IN | FT | RA |
| 14 | NR | NR | NR | NR |
| 15 | IN | NR | NR | RA |
| 16 | IN | RA | IN | RA |
| 17 | IN | CO | CO | RA |
| 18 | IN | IN | CO | RA |
| 19 | IN | IN | IN | RA |
| 20 | IN | IN | IN | RA |
| 21 | IN | CO | CO | IN |
| 22 | NR | IN | NR | RA |

| | | | | |
|----|----|----|----|----|
| 23 | IN | IN | CO | IN |
| 24 | IN | IN | IN | IN |
| 25 | CO | CO | FT | RA |
| 26 | CO | CO | CO | RA |
| 27 | IN | CO | IN | RA |
| 28 | IN | CO | IN | RA |
| 29 | IN | CO | IN | RA |
| 30 | IN | IN | FT | FT |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Tabela 7 – Tabulação do questionário, sondagem final – Turma B

| Aluno | Questões | | | |
|-------|----------|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | NR | CO | CO | RA |
| 2 | CO | CO | CO | IN |
| 3 | CO | IN | IN | RA |
| 4 | CO | CO | CO | RA |
| 5 | CO | RA | RA | IN |
| 6 | NR | RA | CO | IN |
| 7 | IN | RA | NR | NR |
| 8 | NR | NR | CO | RA |
| 9 | IN | IN | IN | NR |
| 10 | NR | RA | CO | IN |
| 11 | CO | CO | NR | NR |
| 12 | IN | CO | NR | NR |
| 13 | IN | IN | IN | RA |
| 14 | IN | IN | IN | IN |
| 15 | IN | IN | IN | CO |
| 16 | RA | RA | IN | RA |
| 17 | IN | IN | IN | RA |
| 18 | CO | CO | CO | RA |
| 19 | CO | IN | IN | IN |
| 20 | CO | CO | RA | RA |
| 21 | FT | FT | IN | RA |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

As Tabelas 8 e 9 apresentam o quantitativo de respostas por categoria, observado a partir do questionário de sondagem final, sendo que a Tabela 8 corresponde à turma A, e a Tabela 9 corresponde à turma B.

Tabela 8 – Quantitativo de respostas por categoria, sondagem final – Turma A

| Questão | Respostas | | | | |
|---------|-----------|----|----|----|----|
| | NR | FT | IN | CO | RA |
| 1 | 3 | 0 | 20 | 6 | 1 |
| 2 | 3 | 0 | 14 | 12 | 1 |
| 3 | 4 | 5 | 11 | 10 | 0 |
| 4 | 3 | 1 | 6 | 1 | 19 |
| Total | 13 | 6 | 51 | 29 | 21 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Tabela 9 – Quantitativo de respostas por categoria, sondagem final – Turma B

| Questão | Respostas | | | | |
|---------|-----------|----|----|----|----|
| | NR | FT | IN | CO | RA |
| 1 | 4 | 1 | 7 | 8 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 7 | 7 | 5 |
| 3 | 3 | 0 | 9 | 7 | 2 |
| 4 | 4 | 0 | 6 | 1 | 10 |
| Total | 12 | 2 | 29 | 23 | 18 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A Tabela 10 apresenta o quantitativo total de respostas por categoria para a sondagem final, ou seja, a somatória de respostas apresentadas pelas turmas A e B, segundo a categorização utilizada.

Tabela 10 – Quantitativo total de respostas por categoria, sondagem final – Turmas A e B

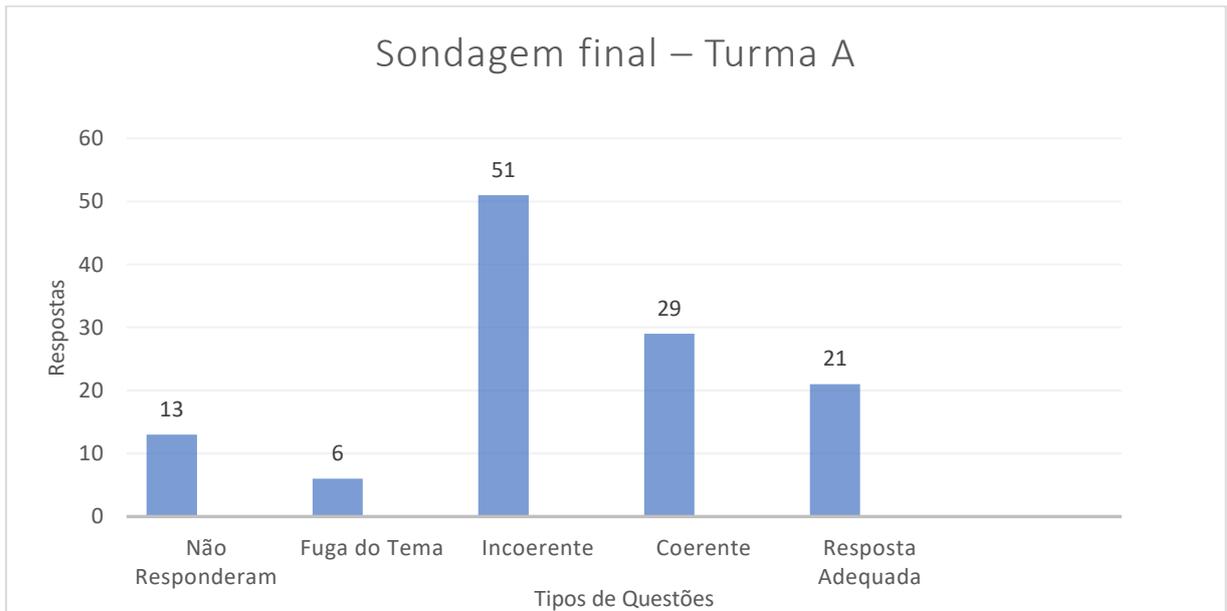
| Questão | Respostas | | | | |
|---------|-----------|----|----|----|----|
| | NR | FT | IN | CO | RA |
| 1 | 7 | 1 | 27 | 14 | 2 |
| 2 | 4 | 1 | 21 | 19 | 6 |
| 3 | 7 | 5 | 20 | 17 | 2 |
| 4 | 7 | 1 | 12 | 2 | 29 |
| Total | 25 | 8 | 80 | 52 | 39 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

De posse dos dados das Tabelas 8, 9 e 10, foram plotados os gráficos apresentados a seguir.

O Gráfico 4 corresponde aos dados da Tabela 8 e faz referência ao quantitativo de respostas por categoria extraído do questionário de sondagem final aplicado na turma A.

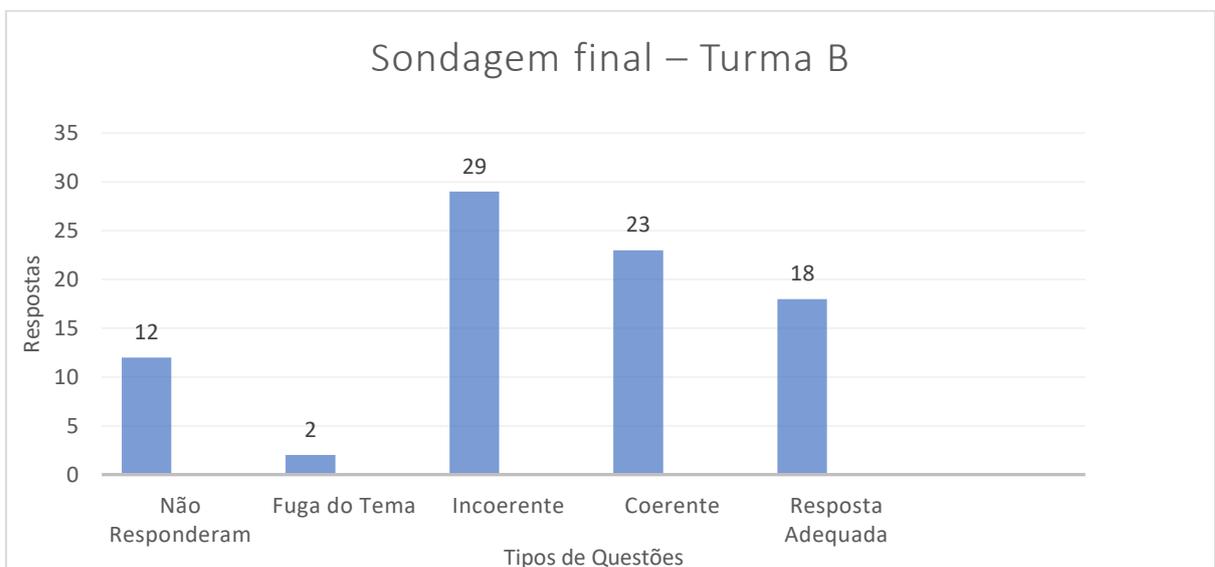
Gráfico 4 – Questionário de sondagem final – Turma A



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Gráfico 5 corresponde aos dados da Tabela 9 e faz referência ao quantitativo de respostas por categoria extraído do questionário de sondagem final, aplicado na turma B.

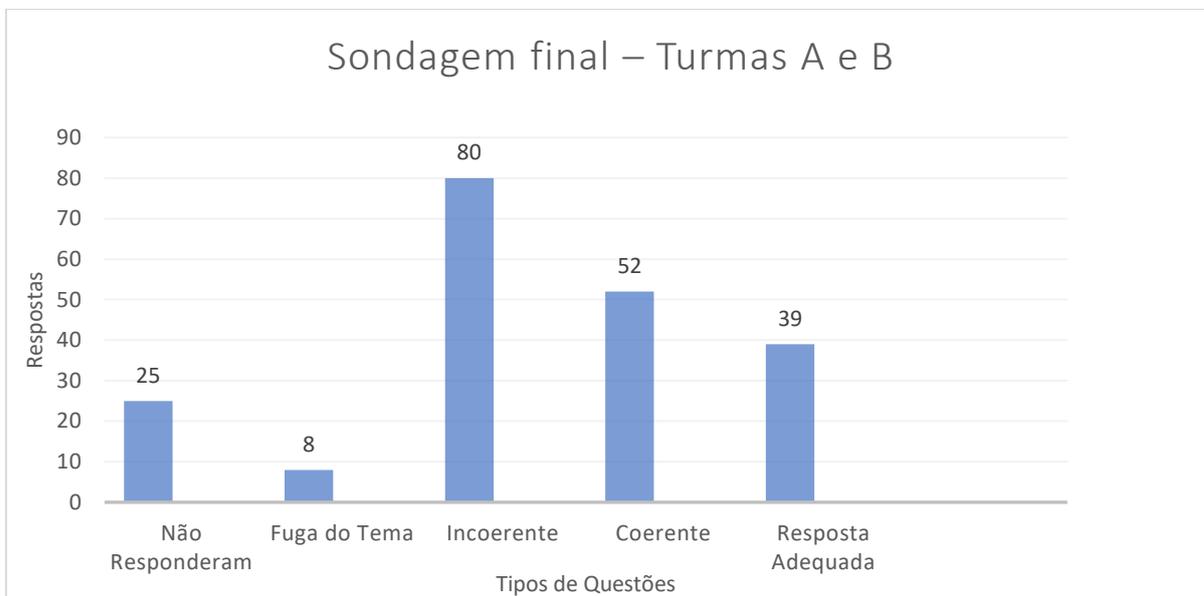
Gráfico 5 – Questionário de sondagem final – Turma B



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Gráfico 6 corresponde aos dados da Tabela 10 e faz referência ao quantitativo total de respostas por categoria, extraídas do questionário de sondagem final aplicado nas turmas A e B.

Gráfico 6 – Questionário de sondagem final – Turmas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.2 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DA UEPS

Aplicado o questionário de sondagem inicial, feitas a categorização das respostas, a tabulação e a plotagem dos gráficos, deu-se início à análise das tabelas 3, 4 e 5, e dos gráficos 1, 2 e 3, em busca de subsunçores relacionados aos tópicos de óptica geométrica abordados.

Sendo a Tabela 5 um compilado das tabelas 3 e 4, e nela apresentado o total do quantitativo de respostas por categoria e por questão para os grupos colaborativos das turmas A e B, concentrou-se, nessa tabela, a busca por informações. Os gráficos 1, 2 e 3 auxiliam o entendimento do tabulado nas tabelas mencionadas.

A questão 1 do questionário de sondagem inicial tem como objetivo levantar informações sobre a existência, na estrutura cognitiva dos alunos, de subsunçores prontos a ancorar princípios da óptica geométrica, que explicam o fenômeno físico da formação de imagens no interior do olho humano.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5, questão 1, é possível verificar que 8,33% das respostas foram categorizadas como coerentes (CO) e que nenhuma resposta foi categorizada como resposta adequada (RA), números que apontam um baixo conhecimento de

princípios da óptica geométrica, por parte dos estudantes, para a compreensão de processos físicos que resultam na sensação visual. Por outro lado, 58,33% das respostas dos grupos colaborativos foram categorizadas como incoerentes (IN), dado que aponta o entendimento do solicitado na questão 1 e que atesta a vontade dos estudantes em dar respostas com algum rigor técnico científico, mas ainda aquém do esperado pelo pesquisador. Nas respostas categorizadas como incoerentes (IN), percebe-se a presença de subsunçores, mas pouco efetivos para a ancoragem estável de conhecimentos físicos sobre óptica geométrica.

Já 33,3% das respostas foram categorizadas como fuga do tema (FT), o que leva a crer que boa parte dos alunos tiveram uma interpretação errônea do solicitado pelo pesquisador no item 1, ou mesmo falta de atenção para atender àquilo que foi pedido.

Na questão 2 do questionário de sondagem inicial, buscaram-se evidências de subsunçores necessários à compreensão da necessidade de propagação retilínea da luz para o entendimento físico do fenômeno de formação de imagens no interior de uma câmara escura de orifício.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5, questão 2, aponta que 100% dos grupos tiveram a resposta ao item 2 categorizada como incoerente (IN). Os dados apontam o entendimento do solicitado pelo professor na questão e a existência de subsunçores de baixa efetividade ou pouco recurso conceitual para o entendimento do processo físico que resulta na projeção invertida da imagem no anteparo.

A questão 3 do questionário de sondagem inicial investiga a compreensão dos alunos a respeito do funcionamento de máquinas fotográficas analógicas e da necessidade de essas máquinas fazerem uso de filmes fotossensíveis para a captura de imagens.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5, questão 3, é possível observar que 25% dos grupos deram respostas coerentes (CO) em relação ao entendimento sobre a necessidade do uso de filme fotográfico em uma câmera fotográfica analógica, ao passo que 66,3% deram respostas categorizadas como incoerentes (IN), o que aponta baixo entendimento ou interpretação errada do processo físico que resulta na captura de imagens por meio de filmes fotossensíveis, e 8,3% dos grupos deram respostas totalmente desconexas com o tema e tiveram suas respostas categorizadas como fuga do tema (FT). Todos os grupos responderam à questão, e não foram observadas respostas adequadas (RA).

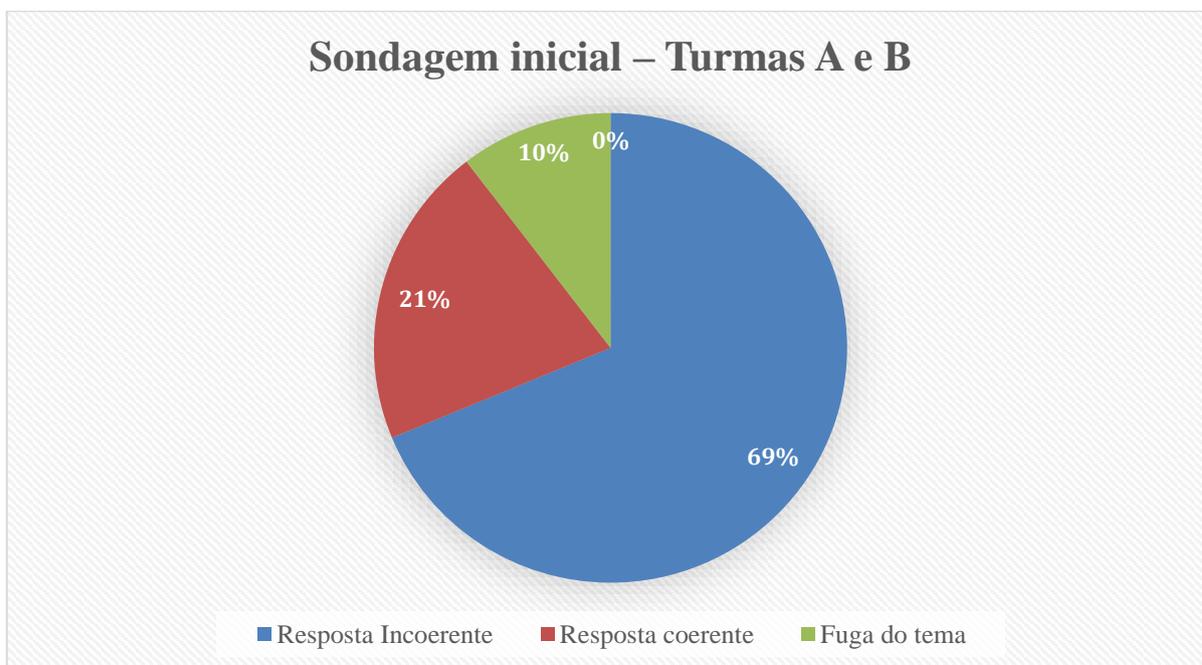
Na questão 4 do questionário de sondagem inicial, cada um dos grupos colaborativos foi instruído a fazer um desenho para tentar explicar a formação da imagem no anteparo

translúcido dentro da câmara escura. A proposta visou a verificar se a abordagem verbal inicial da primeira aula já apresentava resultados. Assim, buscou-se evidências de subsunções preestabelecidos ou que pudessem subsidiar a proposição da necessidade de reflexão da luz em um objeto para a projeção de sua imagem.

Na Tabela 5, verifica-se que 50% dos grupos tiveram a questão 4 categorizada como coerente (CO), e os outros 50% como incoerente (IN). Todos os grupos responderam à questão, sem fuga ao tema, mas não houve respostas adequadas para o solicitado. Como o trabalho foi realizado em grupo, não é possível afirmar que 50% dos alunos tiveram um entendimento aceitável da necessidade de reflexão da luz em um objeto para a projeção da imagem em um anteparo, mas é possível afirmar que existem, nos grupos, estudantes com um entendimento aceitável do fenômeno em questão.

Analisando-se o total do apresentado na Tabela 5, é possível verificar que 68,75% das respostas foram categorizadas como incoerentes (IN), e 10,42% fugiram do tema (FT), enquanto 20,83% dos alunos apresentaram respostas coerentes (CO), ou seja, em 20,83% dos grupos colaborativos, são encontrados estudantes com algum conhecimento físico, mesmo que não formal, sobre óptica geométrica.

Gráfico 7 – Sondagem inicial – Turmas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Terminada a análise de dados do questionário de sondagem inicial, deu-se início à análise de dados do questionário aplicado para sondagem final. Diferentemente do questionário de sondagem inicial, o questionário de sondagem final foi aplicado a todos os alunos, com objetivo de buscar indícios de aprendizagem significativa dos princípios ópticos abordados na UEPS.

Feitas a categorização das respostas apresentadas no questionário de sondagem final, a tabulação e a plotagem dos gráficos, deu-se início à análise das tabelas 9, 8, 10, e dos gráficos 4, 5 e 6, em busca de indícios de aprendizagem significativa.

Sendo a Tabela 10 um compilado das tabelas 8 e 9, e nela apresentado o total do quantitativo de respostas por categoria e por questão dos alunos das turmas A e B, concentrou-se, nessa tabela, a busca por indícios de aprendizagem significativa.

Os gráficos 1, 2 e 3 auxiliam no entendimento do tabulado nas tabelas supramencionadas.

A questão 1 do questionário de sondagem final auxilia a investigar se, após a aplicação da UEPS, os alunos conseguem aplicar a situações novas, de forma não arbitrária e não literal, o princípio da propagação retilínea da luz.

Para auxiliar o pesquisador na busca de indícios de aprendizagem significativa, a questão convida os estudantes a elaborar um desenho para tentar explicar como é a formação da imagem no interior da câmera fotográfica pinhole.

Uma vez que o fenômeno correspondente à formação de imagens foi abordado, durante a aplicação da UEPS, de forma verbal, experimental e não arbitrária, espera-se que, ocorrida a aprendizagem significativa, os alunos consigam acionar subsunçores e fazer a devida correspondência entre a formação de imagens no interior de uma câmara escura e dentro da câmera pinhole, já que o processo físico de formação da imagem no interior desta última é igual ao apresentado na câmara escura.

Analisando-se a Tabela 10, os dados mostram que 27,45% dos estudantes que participaram da aplicação da UEPS tiveram as respostas à questão 1 do questionário de sondagem final categorizadas como coerentes (CO), e 3,70% das respostas foram categorizadas como adequadas (RA), indicadores que apontam indícios de aprendizagem significativa.

A porcentagem de alunos que responderam à questão 1 e tiveram a resposta categorizada como incoerente ficou em 52,94%. Diante do percentual apresentado, cabe destacar o fato de

muitos estudantes não apresentarem respostas corretas do ponto de vista epistemológico, mas foram observadas respostas convergentes com o tema, que norteiam uma próxima aplicação do produto educacional e ajudam o pesquisado a considerar a necessidade de reavaliar o processo de instrução, ou até mesmo a necessidade de uma proposta interventiva mecânica ao longo da UEPS.

A questão 2 do questionário de sondagem final buscou evidências que pudessem assegurar a existência de subsunçores para que os alunos conseguissem responder de forma adequada à questão 1. Para isso, os estudantes tiveram como desafio fazer um desenho que retratasse o processo de formação de imagens observado na câmara escura. Apenas faz sentido pensar em transposição de um saber para uma situação-problema diferente, mais complexa e abrangente, como é o caso da questão 1, se o aluno tiver subsunçores que vão interagir com a nova situação-problema de maneira não arbitrária e não literal, logo, faz-se necessário verificar a existência de subsunçores para a correta análise de dados. Somente após a validação da existência de subsunçores correspondentes à necessidade de entendimento do processo de reflexão da luz e de propagação retilínea é que a análise de dados feita na questão 1 foi concluída.

Da Tabela 10, questão 2, observa-se que 92,2% dos estudantes responderam à questão, sendo que, destes, 37,3% deram respostas categorizadas como coerentes (CO), e 11,76% como adequadas (RA), percentuais que indicam a existência de subsunçores adequados para o exigido na questão 1. Por outro lado, 41,2% dos estudantes tiveram as respostas categorizadas como incoerentes (IN). A porcentagem de alunos que tiveram suas respostas categorizadas como incoerentes chama atenção e aponta para a falta de subsunçores adequados, ou mesmo para a falta de interesse de parcela significativa dos estudantes para com a questão. Essa alta porcentagem de alunos que tiveram suas respostas categorizadas como incoerentes dá indícios do porquê do alto índice de estudantes que tiveram as respostas à questão 1 categorizadas como incoerentes (IN).

A questão 3, ao questionar o aluno sobre “como ocorre a visão”, segue o mesmo raciocínio da questão 1, isto é, busca verificar se os estudantes têm elementos em sua estrutura cognitiva que os levem a acionar subsunçores construídos ou refinados durante a aplicação da UEPS. Acredita-se que, uma vez entendida a necessidade da reflexão da luz e do princípio da propagação retilínea para a formação de imagens, o aluno apresente respostas convergentes com essas leis físicas. O fato de um estudante conseguir, a partir de um conhecimento anterior,

ver relação com outro fenômeno (formação de imagem no olho humano), ou seja, perceber a abrangência dos princípios físicos estudados, é um indício de aprendizagem significativa.

Na Tabela 10, questão 3, verifica-se que 33,33% dos alunos tiveram a resposta à questão categorizada como coerente (CO) e 3,92% como resposta adequada (RA). Os dados apontam o correto acionamento de subsunçores e dá indícios de aprendizagem significativa.

Já 39,22% dos estudantes tiveram suas respostas categorizadas como incoerentes, percentual que aponta para um número significativo de alunos nos quais a subsunção de conhecimentos ainda é instável e pouco efetiva. Para essa questão, ainda é verificado que 9,8% dos estudantes tiveram a resposta categorizada como fuga do tema (FT) e mais 13,7 % não responderam à questão, números que levam o pesquisador a refletir sobre a clareza da apresentação da questão e o interesse dos alunos.

A questão 4 testa a estabilidade e a ancoragem dos princípios ópticos estudados, ao verificar se o fenômeno de inversão da imagem observado na câmara escura é também notado pelo aluno em uma câmera fotográfica analógica. A questão visa a verificar a abrangência dada pelo estudante ao princípio da propagação retilínea da luz e ao fenômeno da formação de imagens.

Analisando-se a Tabela 10, questão 4, é possível verificar que 56,9% dos alunos tiveram suas respostas categorizadas como resposta adequada (RA) e 3,92% como coerente (CO), percentuais bastante expressivos quando comparados aos percentuais apresentados na questão 1, que, de forma menos direta, buscou indícios da compreensão dos estudantes sobre a necessidade de propagação retilínea da luz para a formação de imagens. Os percentuais verificados para a categorização de resposta adequada (RA) e de resposta coerente (CO) apontam indícios de aprendizagem significativa, já que, em uma situação diferente, os alunos fizeram a correta transposição do saber científico outrora estudado.

Quando se busca indícios de aprendizagem significativa, ao analisar o quantitativo total de respostas por categoria na Tabela 10, observa-se que 25,49% dos estudantes tiveram suas respostas categorizadas como coerentes (CO) e 19,12% como resposta adequada.

Comparando os resultados do total de respostas por categoria para a sondagem final com os resultados do total de respostas por categoria para a sondagem inicial, é possível verificar um aumento na frequência de respostas categorizadas como respostas adequadas (RA). Essa conclusão pode causar confusão ao leitor, visto que, como já observado, o questionário de sondagem inicial difere na forma com que foi aplicado do questionário de sondagem final –

enquanto o primeiro foi aplicado a grupos colaborativos, o segundo foi aplicado a todos os estudantes –, no entanto, a Tabela 5, que se refere ao questionário de sondagem inicial, aponta que o quantitativo de respostas categorizadas como resposta adequada (RA) foi de 0%, percentual que viabiliza e valida a análise entre as Tabelas 5 e 10.

Somado o total de respostas categorizadas como respostas coerentes (CO) e de respostas adequadas (RA) para o questionário de sondagem final na Tabela 10, tem-se que 44,61% dos estudantes deram respostas com detalhamento e rigor científico, dentro ou próximo do esperado pelo pesquisador. Esse resultado foi expressivo quando comparado aos percentuais apresentados no questionário de sondagem inicial, em que apenas em 20,83% dos grupos colaborativos deram respostas categorizadas como coerentes (CO).

É possível afirmar que os estudantes que tiveram suas respostas, principalmente no questionário de sondagem final, categorizadas como coerentes (CO) ou adequadas (RA) fizeram uso de seus subsunçores para formular suas respostas. Ademais, boa parte das ideias subsumidas durante a aplicação da UEPS adquiriu estabilidade.

Verifica-se que, quando apresentados a uma nova situação-problema, como foi o caso para explicar a formação de imagens dentro de câmeras pinhole, do olho humano ou mesmo em uma máquina fotográfica analógica, os alunos que tiveram suas respostas categorizadas como adequadas (RA) e coerentes (CO) fizeram uso de subsunçores, com rigor técnico e científico, e não de recursos indutivistas, o que evidencia a interação das novas ideias apresentadas na UEPS com proposições preexistentes na estrutura de saberes do estudante e real transformação de sua estrutura cognitiva. A análise refinada dos questionários de sondagem por meio da categorização de respostas, da tabulação e da plotagem de gráficos apresenta um aumento na frequência de respostas adequadas (RA) e coerentes (CO), ao longo da aplicação da UEPS, fator que aponta indícios de aprendizagem significativa.

Tendo sido apresentados os resultados da pesquisa, no próximo tópico serão abordadas as considerações finais e as perspectivas de continuidade e de ampliação do trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como intuito verificar a promoção de aprendizagem significativa por alunos do 9º ano do ensino fundamental, por meio da aplicação de uma sequência didática potencialmente significativa para o ensino de princípios introdutórios de óptica geométrica. Para se alcançar esse objetivo, a fundamentação teórica da sequência didática seguiu os princípios estabelecidos pela teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003), e sua estrutura aderiu aos parâmetros propostos por Moreira (2011a) para a elaboração de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS).

Ao longo da aplicação da UEPS, constatou-se, qualitativamente, em razão do diálogo com os alunos e da observação do professor, um crescente interesse da maioria dos estudantes pelos princípios e fenômenos ópticos apresentados. Esse fato pode se confirmar em razão da crescente insistência de parcela considerável dos alunos pela continuação das atividades investigativas extraclasse, pelas aulas norteadas por debates e pelo interesse em aprender mais sobre os mecanismos ópticos inerentes à formação e captura de imagens.

Os dados quantitativos observados nos gráficos e nas tabelas, que foram elaborados após a análise dos questionários de sondagem, evidenciam aumento da frequência no quantitativo de Respostas Coerentes (CO) e de Respostas Adequadas (RA), o que sugere maturação cognitiva das ideias apresentadas, além de indícios de aprendizagem significativa.

Mesmo as respostas categorizadas como incoerentes (IN) no questionário de sondagem final, quando qualitativamente analisadas, revelam mudanças no vocabulário dos alunos e formas menos indutivistas de explicar as questões relacionadas aos processos ópticos, fato que sugere, também, indícios de aprendizagem e ação de processos de reconciliação integradora e diferenciação progressiva.

As etapas para elaboração e aplicação da UEPS foram concluídas sem dificuldades consideráveis e mostraram que a UEPS que integra este trabalho é uma alternativa potencialmente significativa à promoção e à retenção de conceitos e de proposições relacionados ao ensino de óptica geométrica.

Como perspectiva, pretende-se ampliar o alcance do trabalho para outros conteúdos relacionados à óptica geométrica, bem como para outras áreas da física.

REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva**. 1. ed. Lisboa: Plátano, 2003. Disponível em: <http://files.mestrado-em-ensino-de-ciencias.webnode.com/200000007-610f46208a/ausebel.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- BARROS, M. A.; CARVALHO, A. M. P. de D. A história da ciência iluminando o ensino de visão. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 5, n. 1, p. 83-94, 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ciedu/v5n1/a08v5n1.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 138-159, dez. 1986. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7905/7271>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. **Física 2**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2013. v. 2.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros curriculares nacionais: terceiro e quarto ciclos do ensino fundamental: introdução aos parâmetros curriculares nacionais**. Brasília: Secretaria de Educação Fundamental, 1998. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/introducao.pdf>. Acesso em: 26 maio 2020.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Diretrizes Curriculares Nacionais para Educação Básica**. Brasília: Ministério da Educação, 2013. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/docman/julho-2013-pdf/13677-diretrizes-educacao-basica-2013-pdf/file>. Acesso em: 6 maio 2020.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular: Educação é a Base**. Brasília: Ministério da Educação, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 19 ago. 2020.
- CARVALHO, A. M. P. de D. **As práticas experimentais no ensino de física**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.
- FARIAS JUNIOR, C. F. **Sequência investigativa no ensino e na aprendizagem de óptica geométrica**. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/8571/0000012543.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- FERREIRA, M. *et al.* Ensinando física atômica para uma turma de terceiro ano do ensino médio: precursores gregos e modernos do atomismo contemporâneo. **Revista do Professor de Física**, Brasília, v. 2, n. 3, p. 43-58, 2018. Disponível em: <http://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/19923/18363>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L. Proposta de plano de aula para o ensino de física. **Physicae Organum**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 39-44, 2019. Disponível em: <http://periodicos.unb.br/index.php/physicae/article/view/23074/21239>. Acesso em: 16 abr. 2020.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de física**. Porto Alegre: Bookman, 2008. v. 1.

FRANZ, G. B. **O ensino de óptica geométrica apoiado por *mobile games***. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em:
https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/37561/1/2019_GustavoBordignonFranz.pdf. Acesso em: 16 abr. 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: óptica e física moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 4.

HECHT, E. **Optics**. 5. ed. Harlow: Pearson Education, 2017.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

MARTINS, A. P.; PORTO, M. B. D. da S. M. **A luz, sua história e suas tecnologias: curso de atualização para professores da educação básica**. Rio de Janeiro: PPGE; CAP/UERJ, 2018. Disponível em:
https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/431389/1/Livro%20_%20A%20Luz%20sua%20Historia%20e%20suas%20Tecnologias_Atualizacao%20Professores%20da%20Ed%20Bas_Ana%20Paula%20Martins_Maria%20Beatriz%20Porto.pdf. Acesso em: 16 abr. 2020.

MARTINS, R. de A.; SILVA, A. P. B. da. Princípios da óptica geométrica e suas exceções: Heron e a reflexão em espelhos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 1-9, 2013. Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172013000100028&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 20 abr. 2020.

MOREIRA, M. A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011a. Disponível em:
http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID10/v1_n2_a2011.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011b.

POLITO, A. M. M. **A construção da estrutura conceitual da física classica**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2016. v. 2.

SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M. Teorias da aprendizagem e da educação como referenciais em práticas de ensino: Ausubel e Lipman. **Revista do Professor de Física**, Brasília, v. 4, n. 4, p. 104-125, 2018. Disponível em:
<http://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/12315/10793>. Acesso em: 20 abr. 2020.

SILVA, M. A. **Câmara escura de orifício como contexto para o ensino da semelhança de triângulos**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvam, 2017.