

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

CARLOS ADRIANO DA CONCEIÇÃO CARDOSO

**CONSTRUÇÃO DE UM ESTEREOSCÓPIO: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO
DA POLARIZAÇÃO DA LUZ NO ENSINO MÉDIO**

SÃO LUÍS

2019

CARLOS ADRIANO DA CONCEIÇÃO CARDOSO

**CONSTRUÇÃO DE UM ESTEREOSCÓPIO: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO
DA POLARIZAÇÃO DA LUZ NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional Nacional em Ensino de Física pelo UFMA, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Linha de Pesquisa: Processos de ensino e aprendizagem e tecnologias de informação e comunicação no Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. Clenilton Costa dos Santos

SÃO LUÍS

2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Conceição Cardoso, Carlos Adriano da.

Construção de um estereoscópio: uma proposta para o ensino da polarização da luz no ensino médio / Carlos Adriano da Conceição Cardoso. - 2019.
228 f.

Orientador(a): Clenilton Costa dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

1. Atividades práticas. 2. Ensino de Física. 3. Imagens 3D. 4. Polarização da luz. I. Costa dos Santos, Clenilton. II. Título.

CARLOS ADRIANO DA CONCEIÇÃO CARDOSO

**CONSTRUÇÃO DE UM ESTEREOSCÓPIO: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO
DA POLARIZAÇÃO DA LUZ NO ENSINO MÉDIO**

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

Aprovada em: 05 / 09 / 2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Clenilton Costa dos Santos (orientador)
Doutor em Física
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Cláudio Rejane da Silva Dantas
Doutor em Física
Universidade Regional do Cariri – URCA

Prof. Jerias Alves Batista
Doutor em Física
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Dedico este trabalho à minha mãe, Sr.^a Jozilene, por não medir esforços em prover meus estudos. À Jacirene, esposa e companhia de todos os momentos. Aos meus irmãos, pela amizade, apreço e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido adquirir mais uma gota de conhecimento no oceano de tantas coisas a se descobrir.

Ao departamento de Física da Universidade Federal do Maranhão.

Ao professor Dr. Clenilton Costa dos Santos, pela confiança em meu trabalho e sua valiosa orientação.

Aos professores do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física polo 47/UFMA, em especial ao professor Dr. Edson Firmino, pelas críticas e cobranças que nos fez, pelas oportunidades e responsabilidades que nos confiou.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Carneiro, pelas palavras e atitudes de incentivo.

À gestão da escola Coelho Neto – Turu, pelo apoio dado durante o período de duração do curso.

Aos colegas de curso do polo 47, pela amizade e companheirismo.

A todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, pelo incentivo ao Mestrado Profissional.

RESUMO

Em relação a aprendizagem, é consenso que um dos principais problemas que escolas e professores têm enfrentado é o desinteresse dos alunos pelo conteúdo das disciplinas. Em se tratando das ciências da natureza, em especial a Física, a situação parece ser ainda mais preocupante: a falta de laboratórios, computadores, acesso à internet e a desconexão dos assuntos com a realidade dos estudantes, são alguns dos fatores que dificultam a superação do problema. No presente trabalho, investigamos a possibilidade do ensino da polarização da luz no ensino médio por meio de uma metodologia que contorne os referidos obstáculos. A estratégia adotada consiste na construção de um estereoscópio com materiais de fácil aquisição para exibição de imagens tridimensionais produzidas pelos alunos e sua utilização didática a partir de uma Sequência de Ensino elaborada para esse fim. O processo de investigação da aprendizagem está fundamentado na teoria sociocultural de Vigotski (1991, 2001, 2010) e nas etapas da Situação de Estudo (MALDANER; ZANON, 2001). A pesquisa foi realizada com alunos de uma turma de 3ª série do Centro de Ensino Coelho Neto – Turu, escola localizada em São Luís, capital do Maranhão. A proposta mostrou-se atraente: os estudantes engajaram-se na realização das atividades e conseguiram assimilar os principais conceitos em polarização. A análise dos dados obtidos indica que a metodologia proposta desperta o interesse dos alunos, proporciona maior interação no contexto de aprendizagem e agrega significado aos conceitos abordados. O feedback dos estudantes mostra que a proposta didática sugerida atingiu os objetivos pretendidos – as atividades realizadas estabeleceram um elo entre o aprendizado adquirido pelos estudantes na escola e sua importância em outros contextos, promovendo uma correlação com suas experiências cotidianas e ajudando-os a alcançar familiaridade e melhor domínio dos conceitos científicos. O trabalho realizado culminou com a elaboração de um produto educacional direcionado a professores e alunos do ensino médio no qual apresenta-se: o contexto histórico do fenômeno; a modelagem físico-matemática; o guia de montagem do estereoscópio e uma sugestão de aplicação didática.

Palavras-chave: Ensino de Física. Polarização da luz. Imagens 3D. Atividades práticas.

ABSTRACT

Regarding learning, it is agreed that one of the main problems that schools and teachers have faced is the students' lack of interest in the content of the subjects. In the case of the natural sciences, especially physics, the situation seems to be even more worrying, the lack of laboratories, computers, access to the Internet and the disconnection of the subjects with the reality of the students, are some of the factors that make it difficult to overcome of the problem. In the present work, we investigate the possibility of teaching the polarization of light in high school through a methodology that circumvents said obstacles. The strategy adopted consists in the construction of a stereoscope with materials of easy acquisition for the display of three-dimensional images produced by the students and their didactic use from a sequence of teaching elaborated for this purpose. The process of learning research is based on the sociocultural theory of Vygotsky (1991, 2001, 2010) and the stages of the Study Situation (MALDANER; ZANON, 2001). The research was carried out with students from a 3rd grade class of the Coelho Neto - Turu Teaching Center, a school located in São Luís, capital of Maranhão. The proposal was attractive: students engaged in the activities and were able to assimilate the main concepts in polarization. The analysis of the data obtained indicates that the proposed methodology arouses students' interest, provides greater interaction in the learning context and adds meaning to the concepts addressed. Student feedback shows that the suggested teaching proposal achieved the intended objectives – the activities carried out have established a link between students' learning at school and its importance in other contexts, promoting a correlation with their everyday experiences and helping them to achieve familiarity and better mastery of scientific concepts. The work accomplished culminated with the elaboration of an educational product directed to teachers and students of high school in which it presents itself: the historical context of the phenomenon; physical-mathematical modeling; the mounting guide of the stereoscope and a suggestion of didactic application.

Keywords: Physics Teaching. Polarization of light. 3D images. Practical activities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Imagem do cristal de calcita.....	30
Figura 3.2 – Representação esquemática do ângulo de Brewster.....	32
Figura 3.3 – Representação esquemática do processo de polarização de uma onda eletromagnética originalmente não polarizada.	33
Figura 3.4 – Ondas longitudinais e transversais (a). Ondas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (b).....	48
Figura 3.5 – Onda polarizada nos planos xy (a) e xz (b).....	48
Figura 3.6 – Onda plana eletromagnética senoidal propagando-se no sentido +Ox.	52
Figura 3.7 – Representações do vetor campo elétrico de uma fonte de luz não polarizada.	53
Figura 3.8 – Representação do vetor campo elétrico de uma fonte de luz polarizada.	53
Figura 3.9 - Ondas com polarizações linear (a), circular (b) e elíptica (c).....	55
Figura 3.10 - Ondas com polarização circular para direita e para esquerda.....	55
Figura 3.11 – Polarização por dupla refração ou birrefringência – materiais birrefringentes..	57
Figura 3.12 – Representação do processo de polarização por espalhamento.....	58
Figura 3.13 – Representação do processo de polarização por reflexão.....	59
Figura 3.14 – Representação do processo de polarização por absorção seletiva.	61
Figura 3.15 – Representação esquemática de filtros construídos para polarizar uma radiação incidente.	62
Figura 3.16 – Imagens de filmes polarizadores.....	63
Figura 3.17 – Representação esquemática da lei de Malus.	64
Figura 4.1 – Representação esquemática da visão binocular do homem.	70
Figura 4.2 – Estereoscópio de Wheatstone (a) e o estereoscópio aperfeiçoado por Brewster (b).	71
Figura 4.3 – Imagem de jovem visualizando um estereoscópio (a) e slides estéreos (b).....	71
Figura 4.4 – Imagem para visualização em anáglifo.	73
Figura 4.5 – Representação esquemática do sistema 3D por polarização.	74
Figura 4.6 – Diagrama em blocos do estereoscópio por luz polarizada.	75
Figura 4.7 – Representação do estereoscópio por luz polarizada.....	75
Figura 4.8 – Imagem da fonte de luz do estereoscópio.	76
Figura 4.9 – Imagem do par estéreo de fotografias fixadas nos suportes.....	76
Figura 4.10 – Imagem do conjunto projetor-polarizador.	77
Figura 4.11 – Bases de sustentação do estereoscópio.	78

Figura 4.12 – Imagem da tela de projeção.....	78
Figura 4.13 – Esquema do posicionamento da câmera e objeto.....	79
Figura 4.14 – Imagem do suporte para câmera (celular).....	80
Figura 4.15 – Imagens de pares fotográficos impressos.....	80
Figura 4.16 – Imagens dos óculos 3D.	81
Figura 4.17 – Imagem do estereoscópio ajustado.	82
Figura 4.18 – Imagens de projeções (a).....	82
Figura 4.19 – Quadro esquemático da sequência didática.....	85
Figura 5.1 – Imagem de desenho anamórfico.....	88
Figura 5.2 – Imagem 3D em anáglifo.....	89
Figura 5.3 – Imagem de objeto 3D com espelhos esféricos.	89
Figura 5.4 – Imagem do estereoscópio montado durante aula.	92
Figura 5.5 – Imagem dos estudantes assistindo exibição com o estereoscópio.	93
Figura 5.6 – Animação de uma onda eletromagnética.	94
Figura 5.7 – Animação de uma onda polarizada por um polaroide.....	94
Figura 5.8 – Imagem dos estudantes assistindo demonstrações dos processos de polarização. Polarizadores com eixos de polarização alinhados (a) paralelamente e (b) perpendicularmente.	95
Figura 5.9 – Imagem dos alunos em equipes de estudo (a) e (b).	97
Figura 5.10 – Imagem de estudantes fazendo ajustes no estereoscópio.	99
Figura 5.11 – Par de imagens estereoscópicas produzida por alunos (boneco).	99
Figura 5.12 – Par de imagens estereoscópicas produzida por alunos (flores).	100
Figura 5.13 – Par de imagens estereoscópicas produzida por alunos (pessoa).	100
Figura 5.14 – Alunos exibindo imagens tridimensionais (a).....	101
Figura 5.15 – Alunos visualizando imagens tridimensionais (b).	101
Figura 5.16 – Imagens das projeções feitas pelos estudantes.....	102
Figura 5.17 – Resposta de A6 à primeira questão.	116
Figura 5.18 – Resposta de A17 à primeira questão.	116
Figura 5.19 – Resposta de A29 à primeira questão.	116
Figura 5.20 – Resposta de A33 à segunda questão.....	117
Figura 5.21 – Resposta de A10 à segunda questão.....	117
Figura 5.22 – Resposta de A34 à segunda questão.....	118
Figura 5.23 – Resposta de A15 à terceira questão.....	119
Figura 5.24 – Resposta de A10 à terceira questão.....	119

Figura 5.25 – Resposta de A19 à terceira questão.....	120
Figura 5.26 – Resposta de A29 à terceira questão.....	120
Figura 5.27 – Resposta de A16 à quarta questão.....	121
Figura 5.28 – Resposta de A12 à quarta questão.....	122
Figura 5.29 – Resposta de A5 à quarta questão.....	122
Figura 5.30 – Resposta de A5 à quinta questão.....	123
Figura 5.31 – Resposta de A34 à quinta questão.....	123
Figura 5.32 – Resposta de A1 à quinta questão.....	123
Figura 5.33 – Resposta de A24 à sexta questão.	124
Figura 5.34 – Resposta de A15 à sexta questão.	124
Figura 5.35 – Resposta de A16 à sexta questão.	124
Figura 5.36 – Resposta de A33 à sétima questão.	125
Figura 5.37 – Resposta de A34 à sétima questão.	126
Figura 5.38 – Resposta de A22 à sétima questão.	126
Figura 5.39 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (a).....	131
Figura 5.40 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (b).	131
Figura 5.41 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (c).....	131
Figura 5.42 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (d).	132
Figura 5.43 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (a).	135
Figura 5.44 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (b).	135
Figura 5.45 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (c).	135
Figura 5.46 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (d).	136

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Desempenho dos estudantes na avaliação individual subjetiva.	115
Gráfico 5.2 - Motivação em torno da produção de imagens 3D.....	129
Gráfico 5.3 – O auxílio do estereoscópio para o entendimento dos conceitos.....	130
Gráfico 5.4 – Avaliação dos estudantes em relação ao estereoscópio.....	132
Gráfico 5.5 – Aspectos mais interessantes do estereoscópio.....	133
Gráfico 5.6 – Sugestão dos estudantes para melhorar a aplicação do produto educacional. .	134

SUMÁRIO

PRIMEIRAS PALAVRAS...	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO DE APRENDIZAGEM.....	20
2.1 A Teoria de Vigotski como referencial pedagógico-metodológico	20
2.2 O entendimento e o sentido pedagógico da zona de desenvolvimento proximal.....	22
2.3 A proposta pedagógica da Situação de Estudo no ensino da polarização em Física ..	25
3 ASPECTOS HISTÓRICOS, ABORDAGENS E ELEMENTOS CONCEITUAIS SOBRE A POLARIZAÇÃO DA LUZ.....	30
3.1 Resumo histórico do fenômeno.....	30
3.2 Abordagem da polarização da luz nos livros didáticos	33
3.3 Abordagem da polarização da luz em revistas e periódicos	39
3.4 Modelagem físico-matemática da polarização da luz.....	47
3.4 Processos de polarização da luz.....	56
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA SITUAÇÃO DE ESTUDO NO ENSINO DA POLARIZAÇÃO EM FÍSICA	66
4.1 Tipo da pesquisa	66
4.2 Abordagem experimental.....	67
4.3 O estereoscópio de Wheatstone	68
4.4 Construção do estereoscópio de luz polarizada	75
4.5 Sujeitos da pesquisa e o local de intervenção	83
4.6 A proposta da SE para o estudo da polarização da luz.....	84
4.7 Os instrumentos de coleta de dados	85
5 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS DADOS.....	88
5.1 O desenvolvimento das aulas	88
5.2 A análise dos dados.....	102
5.3 Opinião dos estudantes quanto ao produto educacional.....	128
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
REFERÊNCIAS	139
Apêndice A	143
Apêndice B	150
Apêndice C	151

PRIMEIRAS PALAVRAS...

Sou licenciado em Física pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e professor efetivo da rede pública de educação do Estado do Maranhão desde 2016. Assim como milhares de professores Brasil afora, em minha prática docente diária me deparei (e ainda me deparo) com muitas situações que prejudicam o trabalho do professor e a aprendizagem dos estudantes. A solução para estes problemas passa pelo ajuste de várias variáveis e, por essa razão, se mostra um tanto complexa. É consenso que um dos fatores que exerce forte influência na qualidade do ensino é a competência técnica do professor, pois só é possível ensinar bem quando se tem domínio daquilo que se pretende ensinar e, também, das metodologias que promovem e facilitam a aprendizagem.

A fim de refinar as habilidades que adquiri na graduação, agregar novos conhecimentos na área específica de Física, bem como desenvolver competências metodológicas necessárias ao bom desempenho da atividade docente, ingressei em 2017 no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) – programa em rede, com polos em vários estados, coordenado pela Sociedade Brasileira de Física (SBF) e que tem como foco o aperfeiçoamento de professores de física da educação básica. Consciente de que a capacitação técnica do professor é indispensável à prática de ensinar e que, da mesma forma, o interesse dos estudantes não pode ser desconsiderado no processo de aprendizagem, desenvolvemos nosso trabalho evidenciando esses dois elementos em todas as etapas.

Ao concluir esta dissertação, não fui capaz, e nem tinha essa pretensão, de oferecer uma metodologia ou fórmula “milagrosa” para fazer os estudantes aprender sobre o tema que me propus trabalhar (a polarização da luz) e, muito menos, resolver os problemas reclamados por professores e estudantes quanto ao aprendizado da Física. Entretanto, pelos resultados alcançados, restou-me uma certeza: a de que o compromisso e a boa vontade do professor, aliados ao interesse e motivação dos estudantes, são os fatores mais importantes no processo de ensino e aprendizagem escolar.

1 INTRODUÇÃO

A luz é uma das formas de manifestação da natureza que apresenta propriedades bem peculiares. Alcança os lugares mais longínquos e, também, os pequenos espaços subatômicos¹. É geralmente associada à visão, mas pode também manifestar-se como escuridão. Em determinadas circunstâncias se comporta como onda, em outras, como partícula, e talvez por isso, se presta a um domínio de conhecimentos tão vasto. Os estudos acerca da natureza da luz, suas características e propriedades, desencadeou uma série de descobertas que impulsionaram o desenvolvimento científico e mudou radicalmente a forma de “ver” as coisas.

Os conhecimentos adquiridos a partir do estudo da luz nos “transportou” para vários lugares ao mesmo tempo - transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas (som e imagem). Nos possibilitou conhecer “mais de perto” as estrelas – sua temperatura, composição química e idade a partir da análise da luz por elas emitida. No outro extremo da escala do universo, podemos “fotografar” as organelas² de uma célula ou a estrutura molecular de um cristal, por exemplo. Podemos listar diversos dispositivos e instrumentos presentes na sociedade tecnológica atual que funcionam de acordo com princípios da ótica: espelhos, lupas, óculos, telescópios, microscópios, máquinas fotográficas, cinema 3D, hologramas e outros. A abrangência e os impactos desse campo de estudo da Física nos motivaram a buscar alguma propriedade ou fenômeno relacionada à luz para desenvolver nosso trabalho.

O Estudo da Luz³ no Ensino Médio (EM) se desenvolve basicamente da seguinte forma: Na 2ª série, um resumo histórico das primeiras explicações seguido de uma abordagem geométrica dos fenômenos da reflexão, refração, da formação de imagens em espelhos, lentes e no olho humano. No ano seguinte, 3ª série, estuda-se o aspecto ondulatório da luz, no qual são descritos o espectro eletromagnético e os fenômenos da absorção, reflexão, refração e interferência. Atualmente, os livros didáticos trazem novas abordagens, indicam aplicações atuais e sugerem vários experimentos. Todavia, um fenômeno típico da luz, enquanto onda eletromagnética, não tem sido abordado da mesma forma. Nos referimos ao fenômeno da

¹ Diz respeito a sistemas cujas dimensões características são inferiores à dimensão característica dos átomos.

² As organelas celulares são como pequenos órgãos que realizam as atividades celulares essenciais para as células.

³ O estudo da luz abrange todo o espectro eletromagnético: dos raios gama às ondas de rádio. Em nosso trabalho, tratamos especificamente da polarização da luz visível, apenas uma estreita faixa do espectro eletromagnético.

polarização, que quase sempre é mencionado nos livros em poucas linhas, de forma bem superficial. Alguns autores nem fazem menção ao fenômeno.

Tomando como exemplo tópicos relacionados ao estudo da luz, temos alguns dados interessantes: em pesquisa de estado da arte, Ribeiro e Vedeaux (2012) relatam que as propostas em experimentação de Ótica no período de 2001 a 2009 tiveram um surpreendente crescimento de 276% em relação ao período de 1992 a 2000. Porém, dentre os fenômenos estudados nessa disciplina: natureza da luz; reflexão; refração; difração; interferência; polarização e espalhamento, há uma grande lacuna em relação aos três últimos mencionados, sendo que a polarização figura como último no ranking com apenas quatro publicações entre 1992 e 2010. Em pesquisa mais recente sobre a reflexão da luz em periódicos de ensino de física, Ribeiro e Carneiro (2016) concluíram que alguns fenômenos, inclusive a polarização da luz (novamente), são considerados como férteis áreas de pesquisa, dada a carência que a revisão apontou.

A luz polarizada é utilizada em diversas áreas para os mais variados fins, mas é também, antes de tudo, um fenômeno natural que ocorre todos os dias. Ocorre com a luz do sol que é espalhada pela atmosfera terrestre ou é refletida na superfície de um lago, de uma lâmina de vidro ou em qualquer outra superfície não condutora, por exemplo. Então, por que não abordar na escola um assunto tão presente na vida dos estudantes?

Destacamos que a descoberta e o entendimento do fenômeno (uma propriedade típica das ondas eletromagnéticas) também possibilitaram aplicações importantes no campo da medicina, biologia, engenharia, artes visuais, designer e outros. Além disso, seus benefícios estão presentes no dia a dia das pessoas por meio da popularização dos eletrônicos portáteis e da indústria do entretenimento: “os polaroides⁴ (ou polarizadores) são de grande importância na pesquisa em física e também em usos mais cotidianos como na fotografia, nas telas de *LCD* e na projeção de filmes 3D” (VIEIRA; AGUIAR, 2015, p. 4). Trata-se, por tanto, de um fenômeno imediatamente presente na vida dos estudantes, em vários aspectos, que não tem sido abordado em sala de aula com a mesma importância. Inclusive, os livros didáticos o comentam em poucas linhas, reduzindo-o a uma mera curiosidade. Aspectos históricos, matemáticos, tecnológicos e interdisciplinares não são explorados.

Em relação ao ensino de Física, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) orienta que os conteúdos ensinados não devem ter um fim em si mesmos, mas munir o

⁴ Material polarizador da luz, usado especialmente em lentes de óculos e lâmpadas, para evitar deslumbramento, e em diversos dispositivos ópticos.

indivíduo de competências e habilidades pelas quais possa se tornar um cidadão consciente, crítico e atuante na sociedade.

A Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construído (BRASIL, 2002, p. 59).

Essas competências e habilidades estão expressas, também, na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) – documento publicado em 2015 pelo Ministério da Educação e Cultura (MEC) que é referência nacional para a formação dos currículos dos sistemas e das redes escolares dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios. De acordo com o referido documento, os conhecimentos conceituais relacionados às ciências da natureza constituem uma base que permite aos estudantes investigar, discutir e analisar situações-problema oriundos de diferentes contextos socioculturais, além de compreender e interpretar leis, teorias e modelos, aplicando-os na resolução de problemas individuais, sociais e ambientais (BRASIL, 2015).

Na prática, significa que o ensino de Física não deve se dar pela simples memorização de fórmulas, resolução de problemas, que na maioria das vezes fogem à representação de situações reais, ou a repetição mecânica de atividades experimentais. Deve, de outra forma, se desenvolver sobre uma dinâmica pela qual os conteúdos possam se relacionar ao entendimento de fenômenos ou processos tecnológicos e, também, ser úteis na solução de problemas presentes no dia a dia dos alunos (BRASIL, 2006). Os PCN's não apresentam uma lista de conteúdos para as disciplinas, e, obviamente, não é uma tarefa simples o professor desenvolver em apenas três anos, com no máximo três aulas semanais, o estudo de uma ciência cujo conhecimento foi construído ao longo de séculos e com aplicações em diversas áreas. Nesse sentido, “escolhas bem-feitas de conteúdos significativos assumem um papel fundamental, pois fica claro que não será possível trabalhar com extensas listas de conteúdos” (BRASIL, 2006, p. 56). Portanto, o professor deve ter habilidade e discernimento para selecionar os assuntos mais relevantes, bem como os meios e recursos mais adequados para desenvolver as competências e habilidades pretendidas. Do exposto, entendemos que a polarização da luz se mostra um tópico promissor a ser trabalhado no ensino médio, pois contém subsídios para promover um aprendizado amplo e significativo.

Em nossa prática docente temos buscado formas de alcançar e unificar dois fatores que, a nosso ver, são essenciais para tornar as aulas de Física mais atraentes: o primeiro, é fazer com que os alunos reconheçam a utilidade do assunto abordado; o segundo, motivá-los a realizarem as atividades propostas. Buscando oferecer uma abordagem para o ensino da polarização da luz que contemple esses aspectos, desenvolvemos nossa pesquisa com base nas concepções da teoria da aprendizagem (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010) na qual o desenvolvimento dos indivíduos é um processo que se constrói a partir das interações que ele estabelece no contexto histórico e cultural que está inserido – desenvolvemos uma discussão deste referencial no capítulo 2.

Realizamos uma intervenção didática em sala de aula seguindo as etapas da Situação de Estudo (MALDANER; ZANON, 2001), estratégia que contempla os conteúdos escolares a partir da vivência dos estudantes, contribuindo para o desenvolvimento dos conceitos de modo mais significativo, rompendo com a forma linear e tradicional do ensino. Essa proposta metodológica contempla um ensino contextualizado⁵ e interdisciplinar⁶ que corrobore com as orientações curriculares nacionais, nas quais “busca-se problematizar essa relação entre o que se pretende ensinar e as explicações e concepções que o aluno já tem, pois a natureza faz parte tanto do mundo cotidiano como do mundo científico” (BRASIL, 2006, p. 52). Foca-se em uma situação concreta que professores e estudantes buscam compreender em sua amplitude – apresentamos com mais profundidade uma discussão deste referencial no capítulo 2.

Decerto, as pesquisas com enfoque na temática ensino e aprendizagem multiplicaram-se e trouxeram avanços quanto ao desenvolvimento de recursos educacionais e práticas metodológicas para o ensino de Física. Em revisão bibliográfica, Rezende; Ostermann e Ferraz (2009) analisaram os trabalhos publicados entre os anos de 2000 a 2007 nas principais revistas e eventos na área e constataram que cerca de 68% das publicações tratavam de processos relacionados a esse campo de investigação. Entretanto, há poucas propostas didáticas em determinados tópicos que, por suas implicações tecnológicas e socioculturais, poderiam ser trabalhados no EM promovendo o desenvolvimento das competências específicas previstas nas Orientações Curriculares para o Ensino Médio (BRASIL, 2006) bem como na BNCC (BRASIL, 2015).

⁵ Que valoriza a aplicação dos conhecimentos na vida individual, nos projetos de vida, no mundo do trabalho, favorecendo o protagonismo dos estudantes no enfrentamento de questões sobre consumo, energia, segurança, ambiente, saúde, entre outras (BRASIL, 2015).

⁶ Diálogo entre um conjunto de disciplinas que propicia o estabelecimento sólido de conhecimentos (BRASIL, 2006).

Com o intuito de diminuir a lacuna existente em propostas para o ensino da polarização da luz, decidimos elaborar uma estratégia didática explorando a visualização e produção de imagens tridimensionais como elemento motivador, pois em qualquer lugar e falando de qualquer coisa, a utilização de técnicas e recursos que exploram propriedades da visão costuma despertar curiosidade nas pessoas – na escola não é diferente, experimentos e demonstrações que envolvem sensações visuais atraem os estudantes.

Por tanto, nos propomos a investigar o desenvolvimento de aprendizagem do conceito de polarização da luz por meio de um **estereoscópio**⁷ avaliado em uma sequência de estudo construída sob uma perspectiva sociocultural. Para atingir o objetivo geral estabelecido, faz-se necessário, também, alcançar alguns objetivos específicos:

- Identificar as concepções dos estudantes acerca dos princípios envolvidos na produção de imagens tridimensionais;
- Investigar os conceitos espontâneos e científicos dos estudantes sobre a polarização da luz e seu uso no cotidiano (tecnologia 3D);
- Propor a construção de um estereoscópio de luz polarizada e avaliar seu potencial para promoção de aprendizagem quanto à polarização de uma onda e compreensão da formação de imagens tridimensionais;
- Elaborar e avaliar um material instrucional para apoiar a prática de outros professores;

Estruturamos a presente dissertação da seguinte forma: o Capítulo 1 traz a Introdução; o Capítulo 2 apresenta o referencial teórico que norteia abordagem pedagógica – nesse capítulo destacamos os princípios da teoria de Vigotski (1991, 2001, 2010), descrevemos as etapas metodológicas da Situação de Estudo (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012) e demonstramos o caminho que traçamos na construção da SE que se constitui um dos tripés do produto educacional apresentado; o Capítulo 3 traz o contexto histórico do fenômeno da polarização da luz, apresenta uma revisão bibliográfica dos livros didáticos e trabalhos publicados sobre o tema nas principais revistas especializadas em ensino de Física e finaliza com a modelagem físico-matemática que lhe dá suporte; o Capítulo 4 discute a metodologia da pesquisa, descreve o contexto escolar e o perfil dos participantes da intervenção didática, descreve as partes e explica o funcionamento do estereoscópio de luz polarizada e apresenta a SE elaborada para aplicação em sala de aula; o Capítulo 5 detalha a

⁷ O estereoscópio é um instrumento destinado a visualização sobreposta de pares de imagens ou fotografias obtidas de pontos diferentes, resultando numa impressão mental de uma visão tridimensional. Na sua construção são utilizados espelhos, lentes e prismas. Foi inventado em 1838 pelo físico Sir Charles Wheatstone.

dinâmica de desenvolvimento das atividades da SE, apresenta os dados obtidos bem como suas análises e apresenta a opinião dos estudantes acerca da estratégia adotada no estudo do tema; o Capítulo 6, por fim, apresenta as principais constatações identificadas nesta dissertação a partir dos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO DE APRENDIZAGEM

A seguir é feita uma breve explanação dos principais pontos do referencial teórico de aprendizagem que foi assumido na presente pesquisa. Destacamos inicialmente os elementos norteadores da Teoria de Vigotski⁸ e em seguida as etapas do referencial estratégico (Situação de Estudo) adotado para a intervenção em sala de aula.

Lev Vygotsky nasceu em 1896 na Bielo-Rússia, de família judia. No ano de 1918 formou-se em Direito pela Universidade de Moscou e em Literatura e História pela Universidade Popular de Shanyavskii. Casou-se aos 28 anos e teve duas filhas. Iniciou sua carreira aos 21 anos, após a Revolução Russa e já nesta época preocupava-se também com questões ligadas à Pedagogia. Em 1922 publicou um estudo sobre os métodos de ensino da literatura nas escolas secundárias. Demonstrou grande interesse pela psicologia acadêmica a partir de trabalhos envolvendo problemas de crianças com defeitos congênitos. Vigotski inicia suas teorias no final da revolução russa quando o país se torna socialista, criando assim um pensamento marxista. Influenciado por estas ideias desenvolveu sua teoria sobre funções psicológicas superiores – funções mentais que caracterizam o comportamento consciente do homem: atenção voluntária, percepção, a memória e pensamento, e como a linguagem e o pensamento estão fortemente conectados. Curiosamente suas obras não obtiveram sucesso na União Soviética, território marxista, sendo conhecido por lá como comunista de direita. Vigotski compartilha de ideias construtivistas onde a única aprendizagem significativa é aquela que ocorre através da interação entre sujeito, objetos e outros sujeitos. Embora tenha tido um curto período de vida deixou uma grande herança teórica que foi silenciada por quase meio século por ser acusado de ser idealista. Faleceu em 1934, vítima de tuberculose, doença com a qual conviveu durante quatorze anos (COELLHO, LUANA; PISONI, 2012).

2.1 A Teoria de Vigotski como referencial pedagógico-metodológico

Vigotski desenvolveu sua Teoria do processo de ensino e aprendizagem a partir de complexos e abrangentes estudos acerca do desenvolvimento humano e da forma como os

⁸ O nome de Vigotski, Lev Semyonovich Vygotsky, tem sido grafado de diferentes formas na literatura científica ocidental, por tratar-se de outro alfabeto. O uso da grafia Vigotski é encontrado na maioria dos livros de língua portuguesa e será a forma adotada para este trabalho. Nas referências bibliográficas, manteremos a grafia adotada pelos autores (EMILIANO; TOMÁS, 2015).

indivíduos se apropriam de elementos da história e cultura nos processos de aprendizagem. Sua Teoria é construída sob uma perspectiva sociocultural, onde o desenvolvimento do indivíduo é um processo construído pelas interações que ele estabelece no contexto histórico e cultural em que está inserido (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010). A criança nasce apenas com as funções psicológicas elementares e, a partir do aprendizado da cultura, estas funções transformam-se em funções psicológicas superiores, sendo estas o controle consciente do comportamento, a ação intencional e a liberdade do indivíduo em relação às características do momento e do espaço presente.

É na atividade prática desencadeada pela coletividade que o indivíduo se aproveita da linguagem e dos objetos físicos disponíveis em sua cultura, promovendo assim seu desenvolvimento, dando ênfase aos conhecimentos histórico-cultural, conhecimentos produzidos e já existentes em seu cotidiano (COELLHO, LUANA; PISONI, 2012). Dessa forma, Vigotski sustenta que a socialização não é simplesmente um fator de manifestação do desenvolvimento cognitivo, e sim o elemento que desenvolve os processos mentais superiores: pensamento, linguagem e memória.

Vigotski reforça em seus trabalhos a importância das relações de aprendizagem e desenvolvimento, ressaltando que ambos estão conectados desde o nascimento da criança. A aprendizagem se dá pela interação da criança com o meio físico ou social e, também, com o ambiente escolar. Assim, o indivíduo adquire conhecimentos que são classificados em dois grupos: aqueles adquiridos da experiência pessoal, concreta e cotidiana caracterizados por observações, manipulações e vivências diretas, chamados de “conceitos espontâneos” e aqueles adquiridos em sala de aula, sistemáticos, formais e não diretamente acessíveis à observação ou ação imediata, chamados de “conceitos científicos” (COELLHO, LUANA; PISONI, 2012). Nesse sentido,

[...] a aprendizagem da criança começa muito antes da aprendizagem escolar. A aprendizagem escolar nunca parte do zero. Toda a aprendizagem da criança na escola tem uma pré-história. Por exemplo, a criança começa a estudar aritmética, mas já muito antes de ir à escola adquiriu determinada experiência referente à quantidade, encontrou já várias operações de divisão e adição, complexas e simples; portanto, a criança teve uma pré-escola de aritmética [...] (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010, p. 109).

Do exposto, interpretamos que os conhecimentos espontâneos adquiridos pelo estudante, mesmo que ainda não definidos conceitualmente, se mostram carregados de significados uma vez que se desenvolvem a partir das experiências empíricas e factuais

decorrentes de suas experiências diárias. Os conhecimentos científicos, que primeiramente são apresentados formalmente pelo professor, carecem dessa correlação com as experiências cotidianas para que ganhem sentido e conduza o aluno a um estágio de desenvolvimento superior na concepção de Vigotski.

2.2 O entendimento e o sentido pedagógico da zona de desenvolvimento proximal

Segundo Vigotski, existe uma inter-relação entre aprendizagem e desenvolvimento, todavia, segundo ele, trata-se de dois processos que não ocorrem paralelamente. O processo de desenvolvimento se dá de forma mais lenta e atrás do processo de aprendizado e, desse ponto de vista, Vigotski afirma que aprendizado não é desenvolvimento, mas, se adequadamente organizado, resulta em desenvolvimento mental e põe em movimento várias ações que, de outra forma, seriam impossíveis de acontecer (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010).

O desenvolvimento é dividido em dois níveis que devem ser combinados com o aprendizado: o nível de *desenvolvimento real* e o nível de *desenvolvimento potencial*. O primeiro, segundo Vigotski, refere-se àquelas habilidades já consolidadas, tarefas e funções que a criança é capaz de realizar sozinha. O segundo nível, de acordo com o autor, está relacionado às atividades que a criança pode realizar com o auxílio de outro indivíduo. Entre esses dois níveis de desenvolvimento existe uma distância chamada de *zona de desenvolvimento proximal*, referente ao período necessário para que a criança consiga realizar sozinha uma tarefa que realiza sob orientação. Pois,

[...] na escola a criança não aprende o que sabe fazer sozinha, mas o que ainda não sabe e lhe vem a ser acessível em colaboração com o professor e sob sua orientação. O fundamental na aprendizagem é justamente o fato de que a criança aprende o novo. Por isso a zona de desenvolvimento imediato, que determina esse campo das transições acessíveis à criança, é a que representa o momento mais determinante na relação da aprendizagem com o desenvolvimento (VYGOTSKY, 2001, p. 331).

Em nossa reflexão, considerando a *zona de desenvolvimento proximal*, o professor deve agir no sentido de identificar os ciclos de aprendizagem e desenvolvimentos já alcançados pelos alunos e os que estejam em fases embrionárias de evolução, a fim de propor estratégias pedagógicas que converta conhecimento potencial em conhecimento real conduzindo-o assim a novas etapas de desenvolvimento.

Para que um aluno consiga realizar tarefas que estejam ao alcance da sua zona de desenvolvimento proximal é necessário a interação com outros que detenham os conhecimentos necessários à realização daquela tarefa. Em colaboração, o aluno se revela mais forte que trabalhando sozinho, projeta-se ao nível das dificuldades intelectuais que ela resolve, mas sempre existe uma distância rigorosamente determinada por lei, que condiciona a divergência entre a sua inteligência ocupada no trabalho que ela realiza sozinha e a sua inteligência no trabalho em colaboração (VYGOTSKY, 2005). Poder-se-ia concluir que a colaboração destacada aqui se refira a interação aluno-professor, mas segundo a interpretação de Gaspar e Monteiro (2005) parece claro que ao referir-se à ‘aprendizagem na escola’. Vigotski não se restringe a essa díade, mas entende e estende essa colaboração a toda sala de aula, e, nesse sentido, parece mais adequado falar em interação social. Cabe ressaltar que para que ocorra uma efetiva interação social na realização de uma tarefa, é necessário que dentre os envolvidos haja alguém que saiba executá-la afim de conduzir a ação dos demais.

O professor tem um papel de destaque na concepção vigotskiana de ensino-aprendizagem por ser aquele que possui os conhecimentos e habilidades que os alunos devem “imitar” para avançar no campo das suas potencialidades intelectuais. Nesse sentido, o professor é o parceiro mais capaz. Cabe a ele orientar o aluno quanto aos aspectos que devem ser observados em uma dada atividade, quanto a análise dos resultados, bem como o caminho a se seguir para solucionar um problema. Além disso, como mediador, o professor deve fazer o levantamento do estágio de desenvolvimento atual do aluno; identificando as tarefas e atividades que o aluno realiza de forma independente e aquelas que ele realiza recebendo orientações. Uma das conclusões mais relevantes das pesquisas de Vigotski é a que mostra que a zona de desenvolvimento proximal tem, para a dinâmica do desenvolvimento intelectual e do aproveitamento, mais importância que o nível atual de desenvolvimento. “Neste caso, ela motiva e desencadeia para a vida toda uma série de funções que se encontravam em fase de amadurecimento e na zona de desenvolvimento imediato” (VYGOTSKY, 2001, p. 334).

Em outras palavras, o ensino não deve ser orientado naquilo que o aluno já sabe e sim nas possibilidades de alcançar novos saberes. A escola deve estar atenta ao aluno, valorizar seus conhecimentos prévios, trabalhar a partir deles, estimular as potencialidades, dando a possibilidade de este aluno superar suas capacidades e ir além ao seu desenvolvimento e aprendizado. Para que o professor possa fazer um bom trabalho ele precisa conhecer o seu aluno, suas descobertas, hipóteses, crenças, opiniões, promover o diálogo e criar situações onde o aluno possa expor aquilo que sabe. Assim, os registros e as observações

são fundamentais, tanto para o planejamento e objetivo quanto para a avaliação (COELLHO, LUANA; PISONI, 2012).

Portanto, a zona de desenvolvimento proximal é a zona cooperativa do conhecimento, é onde deve se concentrar o trabalho do professor enquanto mediador, ajudando o aluno a concretizar o desenvolvimento que está próximo, ou seja, ajudando a transformar o desenvolvimento potencial em desenvolvimento real.

Considerando-se que é por meio das interações socioculturais que a criança desenvolve as funções superiores referentes à cognição, Vigotski enfatiza o papel da linguagem na organização e desenvolvimento dos processos de pensamento destacando a importância dos instrumentos e signos como mediadores do contato social com outras pessoas e com as formas de representação do mundo, os quais lhes dão condições de aprender sobre o meio, agir sobre ele e também sobre si. Um instrumento é um objeto do mundo exterior utilizado para realizar alguma atividade. Um signo é algo utilizado para representar um objeto qualquer. Em certo estágio da evolução, determinado número de técnicas de organização das operações psicológicas internas são desenvolvidas para tornar sua execução mais eficiente e produtiva. Sendo assim, o homem passa a substituir a avaliação visual de quantidades pela utilização de um sistema auxiliar de contagem, passa a substituir o armazenamento de coisas na memória pelo seu registro escrito. A escrita é uma técnica auxiliar usada para fins psicológicos; constitui o uso funcional de linhas, pontos e outros signos para recordar e transmitir ideias e conceitos (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010). Nesse contexto:

[...] “a capacitação especificamente humana para a linguagem habilita as crianças a providenciarem instrumentos auxiliares na solução de tarefas difíceis, a superar a ação impulsiva, a planejar uma solução para um problema antes de sua execução e a controlar seu próprio comportamento. Signos e palavras constituem para as crianças, primeiro e acima de tudo, um meio de contato social com outras pessoas. As funções cognitivas e comunicativas da linguagem tornam-se, então, a base de uma forma nova e superior de atividade nas crianças, distinguindo-as dos animais” (VYGOTSKI, 1991, p. 23).

O estudo da Física e das ciências em geral é mediado por instrumentos, signos e uma linguagem própria. É importante que o professor considere o acervo de signos que os alunos trazem consigo em suas representações das coisas e dos fenômenos, para que, utilizando os instrumentos adequados de aprendizagem, possa reforçar aqueles adequadamente associados e promover uma ressignificação daqueles empregados inconsistentemente. A fim de aplicar uma metodologia que contemple esses aspectos, analisamos algumas propostas de aplicações

didáticas compatíveis com a abordagem vigotskiana e optamos pela Situação de Estudo, estratégia didática que descreveremos a seguir.

2.3 A proposta pedagógica da Situação de Estudo no ensino da polarização em Física

A Situações de Estudo (SE) é uma estratégia de aplicação didática fundamentada na abordagem vigotskiana de aprendizagem e desenvolvimento. Essa proposta de ensino remete para o processo de reconfiguração curricular para contemplar a complexidade do trabalho pedagógico. Foi pensada em 2000 e vem sendo desenvolvida pelo Grupo Interdepartamental de Pesquisa sobre Educação em Ciências (Gipec) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí) (SANGIOGO *et al.*, 2013).

Estando em conformidade como a teoria sócio-histórico-cultural, essa proposta considera relevante elementos das experiências dos alunos que vão além da necessidade de mediação de conceitos científicos, pois essas vivências e as relações que o aluno estabelece com seu meio são importantes na construção do conhecimento que possibilita a formação das funções psicológicas superiores (MALDANER; ZANON, 2001). A SE privilegia a questão da significação conceitual, indicando preocupação mais cognitiva do que pedagógica, contempla os conteúdos escolares a partir da vivência dos estudantes, contribuindo para o desenvolvimento dos conceitos de modo mais significativo, rompendo com a forma linear e tradicional do ensino. Busca-se, com a referida proposta, contemplar um ensino contextualizado, inter e transdisciplinar, com foco em uma ‘situação concreta’, complexa, que professores e estudantes buscam compreender de forma ampla (SANGIOGO *et al.*, 2013).

A SE segue uma dinâmica específica sistematizada em três etapas: problematização, primeira elaboração e função de elaboração e compreensão textual. Veremos as características e os objetivos de cada uma delas a seguir.

Problematização

A primeira etapa da aplicação da SE, problematização, consiste em levantar o entendimento que os alunos têm sobre o tema proposto evidenciando a necessidade de novos conhecimentos. Os alunos são provocados nessa etapa a demonstrar conhecimento sobre algum aspecto referente ao tema relacionado à sua vivência. O professor deve deixar os alunos livres para expressarem suas opiniões, usando suas próprias palavras e definições. São

apresentadas algumas indagações e conjecturas referentes ao problema inicial, a fim de fornecer a motivação necessária à busca do entendimento. O professor traz para a discussão algumas palavras que indicam outras formas de compreender a situação e que possam produzir algum novo sentido, fazendo com que os alunos possam se apropriar de novos conceitos relacionados a problematização. De acordo com Auth (2002), defensor da referida proposta:

A problematização de uma SE deve ocorrer a partir de situações de negociação de significados aos conceitos introduzidos, de modo a permitir o entendimento e a ação no contexto em novos níveis. Ao professor cabe fazer perguntas desafiadoras para perceber os sentidos que os alunos atribuem aos conceitos quando de suas falas e poder recolocá-las em outro nível de significação. Isso deve tornar possível aos alunos refletir crítica e conceitualmente sobre o meio social para que possam recriá-lo, modifica-lo, à medida que aprendem e modificam-se a si próprios (AUTH, 2002, p. 140).

Isso não significa que o questionamento realizado na problematização tenha como referência os conceitos científicos, pois é preciso proporcionar uma interação dialógica que será possível se os estudantes se sentirem desafiados por meio das questões relacionadas às situações que lhes são familiares (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012).

Portanto, a etapa da problematização tem como objetivo trazer significados às linguagens que se tornarão uma discussão conceitual. Pode-se tomar como exemplo, o tema “Energia”, que está estruturada a partir da disciplina de Física. Esse é um tema que faz parte da vivência e pode trazer a significação de muitos conceitos iniciais de física. Os alunos podem dizer muita coisa a respeito, pois conhecem vários problemas relacionados à energia como: os transtornos provocados pela falta de energia elétrica, o aumento da conta de energia, alimentos energéticos, entre outros. No entanto, para uma compreensão científica desse tema, é necessário a significação de alguns conceitos básicos de Física, Química e Biologia, por exemplo.

As perguntas usadas na problematização poderiam ser as seguintes: “O que é Energia?” “Como a energia elétrica chega até nossas casas?” “Como nosso corpo retira energia dos alimentos?”. A partir desses questionamentos palavras como: trabalho, caloria, carga e corrente elétrica, por exemplo, seriam trazidas a fim de que seus significados científicos fossem construídos ao longo das etapas da SE.

Assim, cabe ao professor conhecer os conceitos científicos centrais sobre os quais deve desenvolver seu trabalho e introduzir palavras representativas a partir das quais serão

discutidos significados e sentidos em um contexto específico de uma disciplina ou em um contexto interdisciplinar.

Primeira elaboração

A segunda etapa da SE é chamada de primeira elaboração. Nessa etapa os estudantes são conduzidos pelo professor a realização de atividades que envolvam mais aprofundamento acerca da situação ou problema apresentado na etapa de problematização. Os alunos podem, por exemplo, desenvolver pesquisas bibliográficas e eletrônicas a fim de ter o primeiro contato com conhecimentos científicos em uma dimensão que extrapola o alcance da palavra representativa de um determinado conceito. Nesse momento busca-se construir um estudo sistematizado dos conhecimentos apresentados na etapa de problematização. O professor pode, por exemplo, realizar atividades de simulações computacionais, utilizar o laboratório didático ou sugerir a realização de experimentos alternativos.

É por meio dessas atividades que os estudantes vão ter o primeiro contato com conhecimentos científicos para além da palavra representativa de um determinado conceito. Esse primeiro contato com a palavra representativa de um conceito, num determinado contexto, é realizado mediante a orientação do professor em diversas atividades (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012b, p. 10).

Essas atividades permitem ao aluno identificar situações onde as palavras representativas relacionadas aos conceitos abordados são utilizadas. Mesmo ainda não tendo o conhecimento necessário, o estudante tem contato com situações em que elementos científicos estejam presentes, ocasião em que os significados desejáveis e necessários à palavra representativa do conceito sistematizado, introduzida na problematização, serão agregados. Considerando o tema tomado como exemplo (Energia), é na primeira elaboração que são apresentados, por exemplo, os tipos de energia, as equações representativas, as unidades utilizadas para expressá-la, bem como os signos relacionados diretamente à linguagem física. Dessa forma, “a primeira elaboração caracteriza um segundo nível da abordagem dos conceitos, em que os estudantes se deparam com situações que apresentam conceitos científicos num nível mais elevado que na primeira elaboração” (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012, p. 11).

A partir dessas atividades em que a situação inicial e os novos contextos são analisados em um patamar mais elevado de significação, os estudantes vão tomando

consciência da necessidade de reformular suas concepções prévias, construindo assim uma nova estrutura de pensamento por meio de uma reestruturação cerebral.

Função da elaboração e compreensão textual

A terceira e última etapa do processo na SE é denominada de função da elaboração e compreensão textual. Nela os estudantes são levados a se depararem com situações-problema não relacionadas explicitamente àquelas apresentadas na etapa da problematização, mas que o entendimento se dá a partir do mesmo leque de conhecimentos oriundos das discussões motivada pela situação inicial. Segundo os autores,

Outro aspecto a destacar na função da elaboração e compreensão conceitual é a retomada das questões iniciais apresentadas na problematização, pois há a finalidade de se obter uma compreensão conceitual dessas. Além disso, destaca-se que, a partir da formação de um pensamento conceitual, o estudante terá condições de compreender outras situações, para além daquelas que lhe foram apresentadas durante o desenvolvimento da Situação de Estudo (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012b, p. 14).

Portanto, nesse momento, os alunos exploram situações que apresentam explicações de cunho científico onde se possa identificar as palavras representativas dos conceitos com as quais já teve contato nas etapas anteriores, suas fórmulas, sua significação no contexto em que é empregada. Fazendo uma pequena ilustração a partir do tema “Energia”, pode-se pensar na leitura de um texto com a referida temática onde cada vez que for mencionada uma unidade de energia como o joule ou calorias, por exemplo, o aluno poderá identificar a sua representação simbólica, o fator de conversão entre elas, bem como as circunstâncias do uso de uma e de outra, uma vez que todas essas questões já lhe foram apresentadas anteriormente.

Nessa etapa deve ocorrer o domínio de uma nova linguagem onde o estudante terá uma compreensão conceitual científica sobre todos os aspectos abordados na SE. Esse processo de formação de conceitos envolve o movimento ascendente e descendente entre os conceitos espontâneos (vivência) e os científicos (escola) que, de acordo com Vygotsky (2001), tomam caminhos construtivos opostos: os espontâneos partem do concreto para o abstrato, e os científicos, do abstrato para o concreto. Portanto, esses conceitos mais aprofundados adquiridos durante a implementação da SE possibilita que o aluno não fique preso a concepções imediatas baseadas em percepções sensoriais e alcance níveis mais elaborados de compreensão do objeto de estudo.

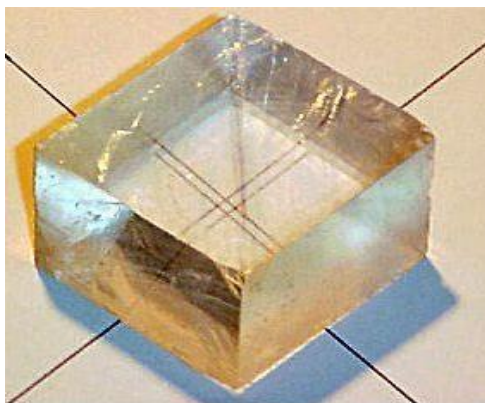
Com o intuito de desenvolver as habilidades contempladas em cada etapa da SE construímos uma proposta de aplicação didática do estereoscópio para estudo da polarização da luz que será apresentada no Capítulo 4. Antes, porém, apresentaremos um resumo da evolução do conceito de polarização bem como o modelo físico-matemático que lhe dá suporte.

3 ASPECTOS HISTÓRICOS, ABORDAGENS E ELEMENTOS CONCEITUAIS SOBRE A POLARIZAÇÃO DA LUZ

3.1 Resumo histórico do fenômeno

O primeiro fenômeno relacionado com o que hoje denomina-se polarização da luz foi observado em 1669 pelo dinamarquês Erasmus Bartholin, ao perceber que o cristal⁹ de calcita, conhecido também como cristal da Islândia (por ser muito abundante nessa ilha) produzia duas imagens de um mesmo objeto. O físico holandês Christian Huygens (1629-1695) ao fazer incidir sobre um cristal de calcita os raios de luz transmitidos por um outro cristal, também de calcita, percebeu que, ao girar o segundo, em uma determinada orientação, era produzida uma única imagem. Na época, isso mostrou que a luz que sai de um cristal de calcita não tem as mesmas propriedades que a luz comum (AZEVEDO *et al.*, 2010). A Figura 3.1 abaixo mostra a dupla imagem de dois segmentos de retas vista através do cristal de calcita.

Figura 3.1 – Imagem do cristal de calcita.



Fonte: <http://www.pedraluz.com.br/>

Christian Huygens e o físico inglês Isaac Newton (1643–1727) levantaram hipóteses para explicar o fenômeno. Para Huygens, que defendia a natureza ondulatória da luz, a velocidade de propagação da luz na calcita dependia da direção. Porém, essa hipótese não era capaz de explicar por que o segundo cristal não produzia também duas imagens. Segundo

⁹ Um cristal é um sólido no qual os constituintes, sejam eles átomos, moléculas ou íons, estão organizados num padrão tridimensional bem definido, que se repete no espaço, formando uma estrutura com uma geometria específica.

Newton, que defendia a natureza corpuscular, a partícula de luz tinha “lados”, sendo cada uma refratada de maneira diferente dependendo do “lado” da partícula que incide sobre a superfície do cristal de calcita. Após a passagem pela calcita as partículas em cada raio ficam com seus “lados” orientados (quando isso acontece se diz que a luz é polarizada, e a orientação dos “lados” define o que hoje se conhece como plano de polarização). Apesar de equivocada, a explicação deu origem ao termo “polarização”, devido à analogia com polos de um ímã. Assim, o segundo cristal, desde que alinhado corretamente, não produz a dupla imagem porque todas as partículas incidem com o mesmo “lado”. Isso proporcionava um método de testar se a luz era polarizada (em outras palavras, se os “lados” das partículas que compunham o raio estão ou não alinhados). “Essa ideia não está longe do que se entende por correto atualmente” (AZEVEDO *et al.*, 2010, p. 1204).

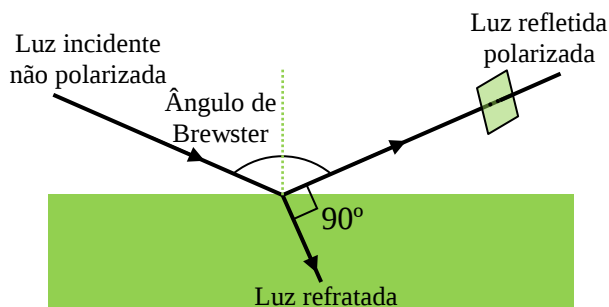
Em 1801, a teoria ondulatória¹⁰ de Huygens foi consolidada através do experimento da dupla fenda realizada pelo físico inglês Thomas Young (1773 – 1829). Nove anos depois, em 1810, o francês Etienne Louis Malus (1775 – 1812) descobriu que a luz refletida em uma interface plana entre dois meios, dependendo do ângulo de incidência, poderia ser polarizada, e que isso ocorre com todos os materiais transparentes ou opacos, exceto os metais. Porém não conseguiu estabelecer uma relação entre o índice de refração¹¹ e o ângulo de refração. Malus mediu o ângulo de incidência de polarização para água e vidro (na interface desses meios com o ar) e o definiu como ângulo de polarização. Malus ainda mostrou conclusivamente, em um artigo, que a polarização é uma propriedade intrínseca da luz e encontrou a relação entre as intensidades da luz que emerge de um polarizador e de um segundo que faz rotação sobre o mesmo eixo do primeiro, formulando a lei “ $\cos^2 \theta$ ” que leva seu nome.

No ano de 1814, o escocês Sir David Brewster (1781 – 1868) refez as medidas de Malus e determinou que a tangente do ângulo de reflexão quando a luz emerge polarizada (numa interface entre um material e o ar) é igual à razão entre os índices de refração dos meios que constituem a interface onde ocorre a reflexão (ver Figura 3.2), fato que é conhecido como a lei de *Brewster* (o referido ângulo é conhecido como ângulo de Brewster).

¹⁰ A teoria ondulatória afirma que a luz é uma onda, assim como o som também é uma onda. Este modelo teve como base de sustentação o experimento de Thomas Young (1773 – 1829), conhecido como Experimento da Fenda Dupla, realizado em 1801, que envolvia os fenômenos da difração e interferência da luz.

¹¹ O índice de refração é uma grandeza adimensional obtida pela razão entre as velocidades da luz entre dois meios pelos quais ela se propaga e depende diretamente da frequência da luz incidente sobre o meio. Geralmente, quanto maior é a frequência da luz, maior será o índice de refração da luz para aquela frequência específica.

Figura 3.2 – Representação esquemática do ângulo de Brewster.



Fonte: Próprio autor.

Ainda em 1810, o francês Augustin Fresnel, a partir dos conceitos da teoria ondulatória, explicou os fenômenos de interferência e difração. Sua proposição mais importante foi considerar a luz como onda transversal. A luz, até então, era tratada como uma onda longitudinal porque o éter (meio no qual se imaginava que preenchia o espaço e permitia a propagação da luz) deveria ter propriedades de um fluido e, portanto, não poderia transmitir ondas transversais. Este fato era o que impedia a aceitação da ideia dos “lados”, pois em uma onda longitudinal todas as direções perpendiculares à direção de propagação são equivalentes. Em 1822, Fresnel, utilizando a hipótese de que a luz é uma onda transversal, calculou os coeficientes que governavam a reflexão e refração de um feixe de luz em uma superfície (AZEVEDO *et al.*, 2010).

Em 1873, James Clerck Maxwell, físico e matemático escocês, apresentou a teoria eletromagnética, que uniu eletricidade e magnetismo. Maxwell previu a existência de ondas que envolviam oscilações de campos elétricos e magnéticos e que poderiam se propagar no espaço livre (vácuo) como ondas transversais, ou seja, os campos elétricos e magnéticos oscilando perpendicularmente à direção de propagação. Além disso, encontrou a velocidade de propagação dessas ondas que, de acordo com os cálculos, seria numericamente igual ao da velocidade luz. Essa previsão foi confirmada com os trabalhos de Heinrich Hertz iniciados em 1887, ocasião em que uma onda produzida por um sinal elétrico foi emitida e detectada à distância. O conjunto desses e outros trabalhos demonstrou incontestavelmente que a luz era de fato uma onda eletromagnética¹².

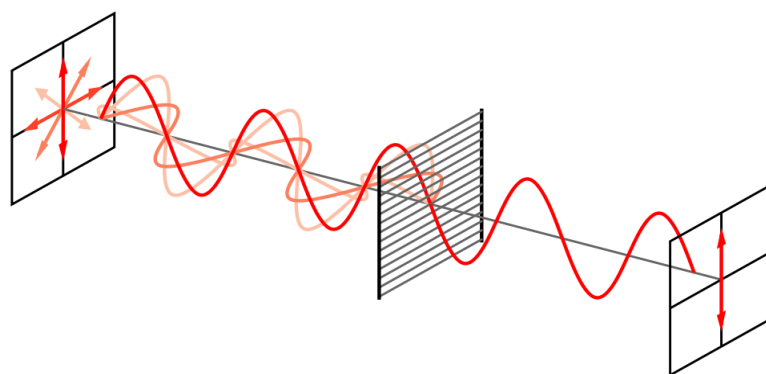
As ondas eletromagnéticas geradas por uma canal de televisão, por exemplo, têm sempre a mesma polarização, mas as ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte comum

¹² Ondas eletromagnéticas são produzidas por variação de um campo elétrico e um campo magnético. Não precisam de um meio de propagação, logo podem propagar-se no vácuo. Esta é uma característica importante que as diferencia das ondas mecânicas. Raios x, radiação gama, micro-ondas, ondas de rádio e luz visível são exemplos de ondas eletromagnéticas (YOUNG; FREEDMAN, 2009b).

de luz, como o Sol ou uma lâmpada elétrica, são polarizadas aleatoriamente ou não-polarizadas (HALLIDAY; RESNICK; WALLKER, 2009a).

Dessa forma, polarizar a luz significa utilizar determinados processos para fazer com que somente ondas em um determinado plano de vibração sejam transmitidas, conforme está representado esquematicamente na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Representação esquemática do processo de polarização de uma onda eletromagnética originalmente não polarizada.



Fonte: <https://nl.m.wikipedia.org>

A luz não polarizada pode ser polarizada por alguns métodos: **birrefringência, espalhamento, absorção e reflexão**. No próximo capítulo faremos a descrição de cada um desses processos.

A fim de obter um panorama geral sobre como a polarização tem sido abordada na literatura, realizamos um levantamento a partir de duas frentes: a primeira, referente aos livros didáticos utilizados nas escolas da rede pública e, a segunda, referente às principais revistas e periódicos voltados ao ensino de Física como a Revista Brasileira de Física, Caderno Brasileiro de Física, Revista Física na Escola e outras.

3.2 Abordagem da polarização da luz nos livros didáticos

Realizamos a revisão dos 12 livros aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) a serem empregados no EM durante o triênio 2018-2020. A polarização é um fenômeno relacionado ao comportamento ondulatório das radiações eletromagnéticas. Dessa forma, buscamos possíveis abordagens nos capítulos dedicados ao estudo da Ótica ou das Ondas Eletromagnéticas.

1 – Coleção: Física

Na referência (BOAS; DOCA; BISCOULA, 2016), os autores abordam a polarização (em poucas linhas) no volume II da coleção, no capítulo dedicado ao estudo de ondas. Comentam que a polarização de uma onda transversal ocorre quando a onda é “filtrada” (não explica como se dá essa “filtragem”) pelo polarizador (utiliza figura de ondas em uma corda e de uma placa de madeira com abertura vertical para ilustrar o processo de polarização). Informam que apenas ondas transversais podem ser polarizadas (não apresenta justificativa) e que a luz pode ser polarizada utilizando-se uma lâmina especial, o polarizador (não explica como ocorre). Finalizam comentando a utilização de óculos polarizadores no cinema 3D. Não mencionam os cristais birrefringentes que polarizam naturalmente a luz, os cientistas responsáveis pelo estudo do fenômeno, e nem o inventor do filme polarizador. Não comentam nenhuma das outras formas de polarização da luz (reflexão, birrefringência e espalhamento), não propõe exercícios e nem sugerem experimentos ou formas práticas de se observar o fenômeno.

2 – Coleção: Física em Contextos

Na referência (POGIBIN *et al.*, 2016), os autores abordam a polarização no volume III, no capítulo dedicado ao estudo das Ondas Eletromagnéticas. Iniciam explicando, de forma objetiva, como uma carga elétrica em movimento gera uma onda eletromagnética, mostra a representação das direções de vibrações e define o conceito de polarização a partir da explicação da dupla imagem formada através do cristal da calcita e da polarização da luz produzida por outros dois cristais, a turmalina e herapatita. Comentam sobre a invenção do filme polarizador, comparam um par de imagens feitas por uma câmera fotográfica com e sem a utilização do filtro e encerram comentando o princípio de funcionamento de imagens tridimensionais com óculos 3D.

3 – Coleção: Física

Na referência (BONJORNIO *et al.*, 2016), os autores apresentam a polarização no volume II, no capítulo Fenômenos Ondulatórios. Iniciam conceituando o fenômeno a partir da representação e explicação do movimento vibratório em uma corda. Seguem comentando que a polarização é efetuada por dispositivos chamados polarizadores e que estes são utilizados em máquinas fotográficas e óculos de sol. Finalizam explicando a imagem (foto) da sobreposição de duas lentes polarizadoras de óculos de sol em que a passagem da luz é bloqueada.

4 – Coleção: Física, Ciência e Tecnologia

Na referência (TORRES *et al.*, 2016), os autores também trazem uma abordagem no volume II, no capítulo dedicado aos Fenômenos Ondulatórios. Iniciam observando que a polarização é um fenômeno que só pode ocorrer com ondas transversais, fazem uma representação esquemática de pulsos verticais e transversais em uma corda, citam que a luz (visível) também é uma onda transversal, constituída por campos elétricos e magnéticos que oscilam em inúmeros planos perpendiculares à direção de propagação, portanto, não polarizada. Em seguida, fazem uma representação esquemática de uma onda (figura de pulsos em uma corda) não polarizada passando por um filtro (figuras de cercas de ripas) tornando-se assim polarizada. Seguem comentando que a luz pode ser polarizada com o auxílio de certos cristais (fazem referência a calcita e a turmalina) ou com filtros polarizadores.

Mostram a representação esquemática de uma onda luminosa que, ao passar por um filtro polarizador, se torna polarizada e em seguida é totalmente bloqueada por um segundo filtro. Ilustram algumas situações cotidianas em que ocorre o fenômeno da polarização por reflexão em placas de vidro (mostram fotos do para-brisa de um veículo), em poças de água (não mostra foto ou imagem), indicam que essa forma de polarização da luz só corre para ângulos de incidência específicos, apresentam fotos de óculos solares com lentes polarizadas sobrepostas e dispostas de forma a bloquear a passagem da luz, fazem comentários explicativos e finalizam fazendo recomendações de alguns cuidados que se deve ter ao usar óculos com lentes polarizadoras para dirigir ou para praticar determinados esportes na neve.

5 – Coleção: Física Aula por Aula

Na referência (BARRETO; XAVIER, 2016), os autores abordam a polarização no volume II, no capítulo que aborda os Fenômenos Ondulatórios. Iniciam com a representação de ondas em uma corda presa em uma das extremidades e a outra fixa à mão de uma pessoa. Explicam que produzir ondas não polarizadas, nessa representação, significa fazer movimentos circulares na ponta da corda preza à mão, pois esse movimento produz ondas que vibram em planos diferentes com todas as direções perpendiculares à direção de propagação. Ondas polarizadas, por sua vez, serão produzidas empregando movimentos verticais na extremidade da corda, pois a variação se dá num mesmo plano. Seguem comentando que aparelhos utilizados para polarizar uma onda são chamados polarizadores (faz representação com figuras), que só é possível polarizar ondas transversais e finalizam indicando que a luz também pode ser polarizada (faz referência ao comprimento de onda) com a utilização de certos cristais (não cita exemplo de nenhum desses cristais), não trazem nenhuma nota histórica e nem descrevem aplicações.

6 – Coleção: Física – Interação e Tecnologia

Na referência (FILHO; TOSCANO, 2016), os autores abordam a polarização no volume II, no capítulo que aborda os Fenômenos Ondulatórios. Abrem o tópico com um questionamento referente ao desconforto que as pessoas sentem com a claridade quando vão à praia mesmo em dias nublados. Inicialmente, fazem um resumo histórico, onde citam as observações de Étienne Louis Malus acerca da dupla refração da luz na calcita (mostra foto do cristal), comentam sobre a hipótese de Newton para explicação do fenômeno (faz ilustração com figuras para o modelo corpuscular da luz) bem como as contribuições de outros físicos: Thomas Young e Jean Fresnel. Seguem explicando o processo de absorção de alguns planos de vibração da onda luminosa incidente em certos cristais, explica o princípio de funcionamento dos óculos de sol e comentam que o ângulo entre os planos de polarização da luz incidente e uma lente polarizadora tem influência na intensidade de luz que a atravessa (mostra fotos de uma paisagem vista através de um filtro polarizador). Finalizam com a proposição de exercícios (9 questões) qualitativos.

7 – Coleção: Física para o Ensino Médio

Na referência (FUKU; YAMAMOTO, 2016), os autores comentam (rapidamente) o fenômeno no volume II, no capítulo que trata sobre Ondas. Somente classificam a luz como uma onda transversal e que por isso pode ser polarizada. Mostram uma figura esquemática contendo, em sequência, a luz de uma vela, um bloco (fazendo o papel do polarizador) e o olho do observador, mas não explicam os elementos presentes na figura e finalizam informando que um polarizador de luz é um dispositivo transparente apenas em uma direção de vibrações das ondas. Não definem o conceito e o significado físico de polarizar uma onda luminosa, não informam a ocorrência da polarização da luz ao incidir sobre certos cristais e não comentam nada acerca das primeiras observações e explicações do fenômeno. O tópico é finalizado e nenhum exemplo de aplicação do fenômeno é comentado ou mencionado.

8 – Coleção: Compreendendo a Física

Na referência (GASPAR, 2016), o autor faz uma abordagem do assunto no volume II, no capítulo referente à Ótica Ondulatória. O autor inicia retomando algumas características das ondas mecânicas, destacando a direção da oscilação em relação a direção do movimento (utiliza figuras da propagação de onda em uma mola e em uma corda) e define o significado de polarizar uma onda transversal utilizando figuras ilustrativas. Segue comentando as principais proposições admitidas para o modelo ondulatório (transversal ou longitudinal) da luz a fim de explicar a dupla refração da calcita (mostra fotografia) e faz um resumo histórico sobre quando e quem observou primeiramente o fenômeno. Cita alguns cientistas que discutiram o fenômeno, promove o diálogo entre as diferentes ideias, incluindo as atuais. Descreve alguns aspectos da luz enquanto onda eletromagnética, explicando a coexistência de campos elétricos e magnéticos e faz referência ao modelo corpuscular.

O autor prossegue explicando (utiliza figuras esquemáticas) que a polarização da luz pode ocorrer por outros processos e destaca a polarização por reflexão (faz referência ao ângulo de Brewster), transmissão (explica mais detalhadamente a dupla refração na calcita e cita outros cristais) e através de polarizadores (indica o inventor e descreve os primeiros e os atuais processos de construção). O autor ainda faz uma conexão com a química (mostra como cadeias carbônicas são utilizadas na confecção de polarizadores) e com a biologia (comenta o processo de percepção das cores e distinção de luz polarizada pelas abelhas). Finaliza mostrando como é possível analisar a direção de polarização de um feixe de luz utilizando dois polarizadores (faz ilustração e mostra fotografia do dispositivo). Ao final do capítulo são sugeridas atividades práticas para observações de alguns fenômenos ondulatórios, inclusive polarização, utilizando materiais simples como películas polarizadoras, óculos de sol e fita adesiva (tratamento qualitativo).

9 – Coleção: Física

A referência (CARRON; GUIMARÃES; PIQUEIRA, 2016) não faz nenhuma descrição do fenômeno no volume 2 da coleção, apenas faz uma breve citação ao abordar alguns aspectos relacionados aos registros de informação. No volume 3, capítulo destinado ao estudo das ondas eletromagnéticas, os autores comentam, em poucas linhas, o fenômeno da polarização da luz. Iniciam explicando que nas fontes comuns de luz os osciladores elementares são os átomos ou elétrons em transições de energia que, atuando de forma independente um do outro, emitem ondas que vibram em planos aleatórios.

Comentam rapidamente que na natureza existem alguns cristais que só permitem a passagem de ondas da radiação luminosas em um determinado plano de vibração (não indica que cristais são esses). Cita a existência de polarizadores produzidos industrialmente e que são utilizados em óculos e técnicas fotográficas (comenta a utilização de óculos de sol para a diminuição dos reflexos produzidos por poças d'água e superfícies de vidros). Por fim, comenta que as ondas eletromagnéticas utilizadas nas telecomunicações são, em sua maioria, polarizadas e que as ondas longitudinais não são passíveis de polarização. A abordagem dos autores é resumida. Não explica os processos de polarização; não apresenta aplicações (se resume a óculos de sol) e trazem poucas imagens ilustrativas.

10 – Coleção: Física - Contextos e Aplicações

A referência (LUZ; ÁLVARES; GUIMARÃES, 2016) não recepciona a polarização no volume 3 da coleção. Os autores comentam o fenômeno, a título de contextualização, no volume 2, capítulo dedicado ao estudo dos fenômenos ondulatórios. A abordagem é rápida (uma página) e inicia-se com a caracterização de uma onda eletromagnética para definir a polarização como a situação em que os componentes dos campos oscilam em uma única direção.

Os autores citam os polarizadores sintéticos (não descrevem o princípio de funcionamento); apresentam figuras ilustrativas de fontes de luz não polarizadas e polarizadas e finalizam com a imagem de duas fotografias de uma paisagem: uma em que foi utilizado uma lente comum e outra em que se utilizou uma lente com filtro polarizador. Não há indicação dos processos de polarização; informações acerca do contexto histórico e nem sugestão de experimentos, por exemplo.

11 – Coleção: Ser Protagonista

A referência (VÁLIO *et al.*, 2016) não aborda o assunto em nenhum dos volumes.

12 – Coleção: Conexão com a Física

A referência (SANT'ANNA *et al.*, 2016) não aborda o assunto em nenhum dos volumes.

Podemos constatar que a polarização da luz, mesmo sendo um fenômeno de natureza ondulatória, possuindo conceitos, modelagens e aplicações relativas ao estudo das Ondas Eletromagnéticas, deixou de ser abordada em duas coleções: VÁLIO *et al.*, (2016) e Sant'anna *et al.*, (2016). O tópico foi recepcionado quase que unanimemente nos livros da 2ª série, volume II de cada coleção que não contempla o estudo do eletromagnetismo. Somente POGIBIN *et al.*, (2016) aborda o assunto no volume III, livro da coleção empregada na 3ª série. As abordagens dos autores, com raras exceções, consistem em conceituar o fenômeno utilizando figuras esquemáticas de ondas em uma corda, comentar a dupla refração na calcita e mostrar fotos de óculos de sol ou películas polarizadoras. A quase totalidade dos autores não cita a polarização da luz por reflexão e espalhamento, à exceção de (GASPAR, 2016), que deixou de informar somente a polarização por espalhamento e foi o autor que promoveu uma abordagem mais ampla.

Nenhum dos autores menciona que as ondas de rádio emitidas por uma antena também são polarizadas. O uso predominante da luz visível para exemplificar o fenômeno pode levar a falsa conclusão de que outras radiações que compõem o espectro eletromagnético não possuem essa propriedade. Além disso, ficou evidente a falta de alternativas experimentais para demonstração do fenômeno.

A referência (POGIBIN *et al.*, 2016) é a única que trata o assunto no volume III, comenta rapidamente como ondas eletromagnéticas são geradas a partir do movimento de cargas elétricas, faz referência aos cristais birrefringentes e ao polarizador sintético, mas não

explica por que somente ondas em determinados planos de vibração são absorvidas, de que forma a absorção ocorre e qual componente da radiação (elétrica ou magnética) é absorvida. Não comenta as outras formas de polarização, cita poucos exemplos de aplicações e não sugere resolução de problemas e/ou exercícios.

Pela análise que fizemos das abordagens apresentadas nos livros didáticos, entendemos que havia a necessidade da elaboração de uma estratégia de ensino que associasse de forma mais direta o tema estudado às experiências diárias dos estudantes e que empregasse instrumentos e acessórios físicos e computacionais para facilitar a assimilação dos conceitos abstratos relacionados ao fenômeno que, para a maioria dos estudantes do Ensino Básico, parecem vagos e sem relação com o mundo natural.

3.3 Abordagem da polarização da luz em revistas e periódicos

Para os fins de uma breve revisão, optamos por priorizar trabalhos dedicados especificamente ao ensino de Física. Assim, não foram consultados periódicos voltados para o ensino de ciências em geral. A busca foi realizada na *web* a partir do acesso aos sites das principais revistas e plataformas de divulgação, dentre elas:

➤ **Sociedade Brasileira Física (SBF)**

Endereço eletrônico: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/>

➤ **Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBE)**

Endereço eletrônico: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/index>

➤ **Revista A Física na Escola**

Endereço eletrônico: <http://www1.fisica.org.br/fne/edicoes>

➤ **Caderno Catarinense de Ensino de Física (CCEF)**

Endereço eletrônico: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/index>

➤ **Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF)**

Endereço eletrônico: <http://www.sbfisica.org.br/~snef/>

➤ **Revista do Professor de Física**

Endereço eletrônico: periodicos.unb.br/index.php/rpf

➤ **Repositório de dissertações do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física**

Endereço eletrônico: www1.fisica.org.br/mnpef/?q

➤ **Plataforma Scielo** (*Scientific Eletronic Library Online*) – biblioteca eletrônica que proporciona um amplo acesso às coleções de periódicos como um todo, aos fascículos de cada título de periódico, assim como aos textos completos dos artigos.

Endereço eletrônico: <http://www.scielo.br/>

A escolha dessas plataformas se deu por dois principais motivos: o primeiro é o enfoque específico em ensino de Física, o segundo, se deve a divulgação gratuita em formato digital, o que torna bem mais prático o acesso de quaisquer interessados aos trabalhos. Em cada um desses sítios, para localizar possíveis trabalhos com a temática polarização da luz, utilizamos as seguintes palavras-chave: “polarização”; “luz polarizada”; birrefringência”; “atividade óptica”; “reflexão da luz”; “espalhamento” e “lei de Malus”.

No levantamento realizado encontramos 14 publicações. No entanto, essas publicações são referentes a 13 trabalhos, pois o artigo de Santos *et al.* (2016), publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, é fruto da dissertação de mestrado de Santos (2016) que localizamos no repositório de dissertações do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Sendo assim, entre os anos de 1991 e 2019 localizamos 13 trabalhos, número bem reduzido para um período de 28 anos. Nas duas primeiras décadas (1991 a 2011) foram somente sete publicações, cerca de uma publicação a cada três anos. Nos últimos 8 anos (2012 a 2019) foram 6 publicações, ou seja, uma publicação a cada 16 meses, o que representa uma tímida evolução.

Em quase todos os trabalhos, exceto Cattani e Bassalo (2009), foram apresentadas alternativas ao estudo da polarização da luz por meio de demonstrações e atividades experimentais. Alguns autores sugerem a utilização de materiais simples e instrumentos de fácil aquisição – os fatos e resultados analisados têm uma relação mais estreita com fenômenos e situações que os estudantes se deparam no dia a dia. Outros fazem uso de computadores (PC e portáteis), *smartphones*, *softwares*, aplicativos e instrumentos específicos de laboratório para a coleta de dados e simulações – são propostas mais focadas na modelagem e representação físico-matemática do fenômeno. Alguns trabalhos são direcionados especificamente a estudantes de graduação, outros a estudantes de nível básico. Há abordagens que podem ser utilizadas em ambos os níveis de escolaridade. Assim, os trabalhos foram classificados em categorias de acordo com o Quadro 1 a seguir.

Quadro 1- Trabalhos publicados sobre polarização classificados por categorias.

TRABALHOS LOCALIZADOS		CATEGORIAS			
		Relaciona a polarização da luz com situações recorrentes do dia a dia	Faz uso de tecnologias digitais	Faz uso de instrumentos específicos de laboratório	Abordagem compatível para estudantes de nível médio
1	Polarização da Luz: uma proposta de experiências simples	Sim	Não	Não	Sim
2	Mexendo com polaroides e mostradores de cristais líquidos (O Ensino da Física Contemporânea, tendo como pano de fundo a Física do cotidiano)	Sim	Não	Não	Sim
3	Medidas de Intensidade Luminosa. Polarização	Não	Não	Sim	Não
4	Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar	Não	Não	Sim	Não
5	A luz laser é polarizada?	Não	Sim	Sim	Sim
6	Atividade óptica de um meio dielétrico diluído: Pasteur e as simetrias moleculares	Não	Não	Não	Não
7	Propostas simples para o experimento de Espalhamento Rayleigh	Sim	Não	Não	Sim
8	Experimento simples, explicação nem tanto! Reflexão e polarização em óculos 3D	Sim	Não	Não	Sim
9	Verificação da lei de Malus com um <i>smartphone</i>	Não	Sim	Sim	Sim
10	Análise da luz circularmente polarizada produzida por um ser vivo	Não	Sim	Não	Não
11	Geração de imagens animadas <i>GIF</i> com o <i>Mathematica</i> : Simulações	Sim	Sim	Não	Sim

	didáticas de ondas eletromagnéticas e polarização da luz				
12	Sistema sensor com câmera <i>USB</i> para uso em experimentos de polarização da luz	Não	Sim	Não	Sim
13	Receitas doces e coloridas: Demonstrações com luz polarizada	Não	Não	Não	Sim

Fonte: Próprio autor.

Após a leitura e análise dos artigos, discorreremos um pequeno resumo de cada trabalho, na mesma ordem em que estão numerados no quadro, destacando as ideias centrais e as respectivas conclusões dos autores.

1 – Colombo (1991) propõe uma série de experiências utilizando materiais simples como lâminas de vidro, papel celofane, lâminas de plásticos, sal, açúcar, filmes polarizadores de câmeras fotográficas, fita durex dentre outros, a partir das quais os alunos possam estudar os fenômenos com luz polarizada por reflexão e refração, suas propriedades e aplicações. As autoras concluem que através do conjunto de experiências propostas, o aluno pode realizar um estudo consciencioso dos fenômenos com luz polarizada, visualizar e comprovar efeitos preditos pelos resultados teóricos e alcançar um nível de síntese a partir do qual sejam capazes de avaliar limites de validade ou limitações dos modelos envolvidos pelas leis físicas em questão. Acrescentam também que o fundamental seria resgatar a importância da experimentação no ensino da Física, pois com atividades experimentais existem maiores possibilidades de desenvolver o pensamento divergente do estudante do que nas atividades realizadas nos cursos nos quais ele é um receptor passivo.

2 – Londrina (1998) promove uma explicação bastante detalhada do monitor de cristal líquido é apresentada, escrito antes da popularização dessa tecnologia. Os autores propõem que o trabalho teórico seja comparado com a realidade, a partir da desmontagem do visor de cristal líquido de uma calculadora, por exemplo. O autor ressalta a importância em aproximar os assuntos contemporâneos, que são os monitores de cristais líquidos, das atividades do professor do ensino básico. Destaca ainda que, com alguns conceitos de eletricidade e de polarização da luz, compatíveis com o nível secundário, é possível estudar e introduzir a tecnologia avançada dos *LCDs* sem maiores formalismos.

3 – Costa (2002) sugere uma prática para determinar os estados de polarização da luz por meio de medidas da intensidade luminosa. Além de fazer a descrição matemática do fenômeno em nível de graduação, faz uso de instrumentos específicos de laboratório como laser He-Ne, lâminas polaroides (o polarizador e o analisador), dois retardadores (um de meia onda e um outro de um quarto de onda) e um detector fotovoltaico. O aparato experimental é relativamente simples, disponível em laboratórios didáticos. Os resultados mostram ser viável a utilização deste experimento nos cursos de óptica básica, na demonstração experimental de alguns tópicos vistos teoricamente em classe e no aprofundamento dos conceitos de polarização.

4 – Carlin *et al.* (2005) apresentam uma proposta para a verificação das propriedades de placas de ondas ($1/4$ de onda e $1/2$ de onda) construídas com lâminas de microscópio e fita durex (*Scotch*) e a birrefringência é determinada e comparada com uma medida realizada como um microscópio óptico de luz polarizada. Com tal montagem, também é possível analisar a atividade óptica de uma solução de açúcar e a relação entre o ângulo de rotação do plano de polarização e o comprimento e concentração da solução é verificada. O autor conclui que os resultados experimentais obtidos com as placas de onda concordam muito bem com as simulações e com as previsões teóricas. Com relação a atividade óptica da solução de açúcar, o valor encontrado para a constante foi um pouco diferente do valor tabelado, mas o autor observa que seria interessante realizar o experimento para as mesmas condições do valor tabelado.

5 – Cavalcante; Tavoraro e Guimarães (2006) propõe uma técnica para a confirmação da polarização de um feixe *laser* emitido por um apontador, através da análise computacional da intensidade da luz que passa através de uma lente de óculos polarizadora. A escolha da lente de óculos, ao invés de um filtro polarizador tradicional, se deveu à clássica razão para o uso de materiais alternativos: baixo custo. Complementarmente, esse trabalho reflete a importância de um novo método de medição para se estabelecer o grau de polarização dos feixes de *laser* He-Ne e, também, de feixe de *lasers* semicondutores de baixo custo comumente utilizados em experimentos no Ensino Médio.

6 – Cattani e Bassalo (2009) apresentam um breve retrospecto das ideias básicas da teoria eletromagnética necessárias para o estudo da atividade óptica. Usando a teoria de perturbações em mecânica quântica e levando em conta as simetrias das moléculas, calculam a atividade óptica do meio. Utilizando-se de algumas ferramentas de matemática superior, mostram que as previsões teóricas, que estão plenamente de acordo com os resultados experimentais, comprovam a hipótese de Pasteur – famoso pesquisador do século XIX que em

1848 conjecturou que a rotação do plano de polarização da luz em um meio diluído é gerada pelas propriedades de simetria das moléculas do meio no qual a luz se propaga.

7 – Ortiz e Laburú (2010) trazem uma proposta alternativa para o experimento de espalhamento Rayleigh. Além de propor uma abordagem simples, segura e de baixo custo, os autores se propuseram também a demonstrar experimentalmente outros fenômenos físicos como a polarização da luz do céu, do arco-íris e a reflexão polarizada em superfícies não condutoras, assim como determinar a direção dessas polarizações. São utilizados polaroides obtidos de mostradores de cristais líquidos tirados de equipamentos eletrônicos danificados e a direção de polarização dos polaroides será estabelecida pela observação do ângulo de Brewster no experimento de reflexão. O autor conclui o artigo ressaltando a intenção de apresentar uma opção mais simples e segura para o experimento de espalhamento Rayleigh sugerido no trabalho anterior de Krapas e Santos (2002), além de propor novos experimentos muito fáceis de serem realizados pelos alunos do ensino básico e que complementam o fenômeno ligado à produção da luz azul do céu.

8 – Ribeiro, Jair Lúcio Prados e Verdeaux (2012) apresentam um experimento simples realizado com óculos polarizadores usados em exhibições de filmes 3D. O experimento consiste em olhar-se em um espelho usando um desses óculos e fechando um dos olhos. Nesse caso a lente que recobre o olho aberto aparecerá negra, impedindo a visualização da imagem desse olho enquanto a imagem refletida do olho fechado continuará sendo observada. Embora o experimento seja simples, o entendimento requer conhecimentos de óptica, principalmente do conceito de polarização reversa. Segundo os autores esse experimento oferece múltiplas abordagens didáticas, por permitir a inclusão de um tema cotidiano em um tópico aparentemente não formal, a polarização.

9 – Vieira e Aguiar (2015) propõem um experimento simples para estudar quantitativamente a lei de Malus, baseado no fotodetector encontrado na maioria dos *tablets* e *smartphones*. Os resultados do experimento, de acordo com eles, foram excelentes e mostraram que este sensor, pouco explorado em situações didáticas, pode tornar-se um instrumento útil no ensino de óptica. Os autores ressaltam que experimentos envolvendo medidas de intensidade luminosa têm sido difíceis de realizar no ensino médio, pela falta de sensores adequados. O fotodetector dos *smartphones* e *tablets* mudou completamente esse quadro e abriu inúmeras possibilidades para o desenvolvimento de experimentos didáticos em óptica.

10 – Flemming e Rosa (2015) analisaram a luz refletida por um escaravelho (*Phanaeus splendidulus*) de cor metálica iridescente, besouro conhecido vulgarmente como

“rola-bosta”, que transforma luz não polarizada em circularmente polarizada à esquerda. Os autores utilizam um polarizador e uma lâmina de $\frac{1}{4}$ de onda acoplados em uma câmera fotográfica para constatar que a luz refletida pelo besouro é polarizada. Em seguida, lançam mão de ferramentas de cálculo para mostrar como um ser vivo é capaz de gerar luz circularmente polarizada pela simples reflexão da luz solar. Além de sugerir uma maneira simples de realizar um experimento didático para ensinar vários aspectos deste tipo de luz, o trabalho procura evidenciar uma conexão interessante da física com a biologia e a ciência dos materiais. O nível de descrição matemática indica que a proposta é direcionada a estudantes de graduação.

11 – Santos *et al.* (2016) apresentam o uso do *Mathematica* para a produção de imagens animadas para simular ondas eletromagnéticas propagando, atravessando polarizadores e meios opticamente ativos. As imagens são no formato *GIF* (*Graphics Interchange Format*), que se notabiliza pela facilidade de inclusão em *softwares* de apresentação, como o *PowerPoint*, ou em navegadores de internet, como *Explorer* ou *Chrome*. É apresentada, também, uma aplicação pedagógica, utilizando as animações, filtros polarizadores, solução opticamente ativa de sacarose e um monitor de cristal líquido (*LCD*), que teve seu polarizador de saída retirado. Segundo os autores ficou evidente que com o uso dessa multiplicidade de recursos, ocorreu uma melhor aprendizagem dos conceitos como propagação da luz, polarização e intensidade luminosa. Os alunos também relataram se sentirem mais motivados e interessados do que em outras aulas em que foram apresentados a eles conteúdos semelhantes, por meio da utilização do livro didático e da lousa.

12 – Fabris (2017) apresenta um sistema sensor para uso em laboratórios de ensino, composto por uma câmera *USB* para leitura de dados, podendo ser inclusive a própria câmera que vem instalada na maioria dos *laptops* e um *software* desenvolvido e disponibilizado pelos autores. O sistema sensor é adequado para o estudo de fenômenos associados à propriedade de polarização da luz, tendo sido testado em experimentos realizados para verificar a lei de Malus e a eficiência espectral de polarizadores. Os procedimentos da montagem experimental são descritos detalhadamente, na qual a luz de uma lanterna de *LED* usada como fonte luminosa no visível é projetada numa tela branca após passar por dois polarizadores. A imagem projetada na tela é captada pela câmera e o *software* fornece a intensidade luminosa relativa da luz. Os autores concluem que o sistema sensor proposto mostrou-se capaz de medir as mudanças de intensidade observadas em experimentos voltados para o estudo de fenômenos resultantes da polarização de ondas eletromagnéticas e que o aparato possibilita a

realização de experimentos mesmo em laboratórios didáticos que não disponham de instrumentação adequada para medição de intensidade luminosa.

13 – Soga; Toledo e Muramatsu (2017) apresentam algumas “receitas” para preparar demonstrações sobre luz polarizada e obter padrões coloridos nítidos. Os experimentos podem ser feitos em salas de aula escurecidas ou outro ambiente escuro. Soluções opticamente ativas são preparadas, colocadas em copos de vidro, “atravessadas” por luz polarizada e vistas através de um polarizador. Para a observação dos padrões foram utilizados: açúcar de cozinha, glicose de milho, água, copo de vidro, garrafa de vidro, dois polarizadores, lanterna de *LED* e monitor de cristal líquido (neste caso basta ter um polarizador). Os autores destacam a possibilidade do uso de um monitor de cristal líquido como fonte de luz polarizada e discutem o papel de bolhas de ar na nitidez dos padrões coloridos. Trata-se de um trabalho que prioriza os aspectos conceituais e a modelagem física relacionados ao fenômeno em detrimento do tratamento matemático, o que habilita a utilização da proposta tanto em cursos de graduação quanto no ensino básico.

Em nossa análise, a abordagem conceitual, os materiais e instrumentos utilizados em 9 dos trabalhos localizados (àqueles indicados com “Sim” na última coluna do Quadro 1) torna possível aplicá-los nas escolas de nível médio. Os demais (àqueles indicados com “Não” na última coluna do Quadro 1) se mostram direcionados ao nível universitário por fazer uso de ferramentas matemática mais elaboradas e de instrumentos mais específicos como interface de aquisição de dados, câmera *CDC*, *laser* de He-Ne, retardadores e fotodetector. Esses 9 artigos descrevem bem a montagem, a operação, os conceitos e os resultados dos experimentos, elementos suficientes para promover o engajamento de estudantes mais experientes, que tenham afinidade com a disciplina e que estejam em um nível mais elevado de abstração e representação das leis físicas. No entanto, em nosso julgamento, somente 6 deles (COLOMBO, 1991; LONDRINA, 1998; ORTIZ e LABURÚ, 2010; RIBEIRO e VERDEAUX, 2012; SANTOS *et al.*, 2016; SOGA, TOLEDO e MURAMATSU, 2017) promovem uma abordagem mais “animadora” para alunos pouco afeiçoados ao estudo da Física por desenvolver o estudo da polarização associando-o a situações concretas do cotidiano dos estudantes.

O manuseio de computadores, *smartphones*, programas, aplicativos e instrumentos de medidas, por exemplo, provoca uma pré-disposição à realização das atividades experimentais, entretanto, podem não garantir, em si próprios, o desenvolvimento das representações mentais que dão significado à atividade proposta. Acreditamos que se esses acessórios forem utilizados na realização de experimentos que reproduzam fenômenos ou

processos (naturais ou tecnológicos) presentes no dia a dia dos alunos e cujo entendimento tenha alguma utilidade prática e, se possível, imediata para eles, o envolvimento com a atividade poderá ser maior, pois o aprendizado passa a ser mais significativo e prazeroso. Por isso, a proposta que elaboramos e aplicamos em uma turma de 3ª série do ensino médio, a qual apresentaremos no capítulo 4, consiste em estudar os conceitos científicos relacionados à polarização da luz a partir da utilização de um estereoscópio para visualização (e produção) de imagens tridimensionais – tecnologia bem presente na vida dos estudantes.

Como já mencionamos anteriormente, a polarização é um fenômeno associado ao comportamento ondulatório da luz, e para que tenhamos condições de compreendê-lo, do ponto de vista conceitual-formal, iremos abordar no subcapítulo seguinte alguns elementos da Teoria que lhe dá suporte.

3.4 Modelagem físico-matemática da polarização da luz

A Teoria Eletromagnética concebida por James Clerck Maxwell que uniu eletricidade e magnetismo, os trabalhos de Heinrich Hertz e outros, demonstraram que a luz é (em escala macroscópica) uma onda eletromagnética¹³. A polarização é um fenômeno cujo entendimento se dá com base na propagação ondulatória da luz. Sendo assim, retomemos alguns conceitos relacionados ao estudo das ondas.

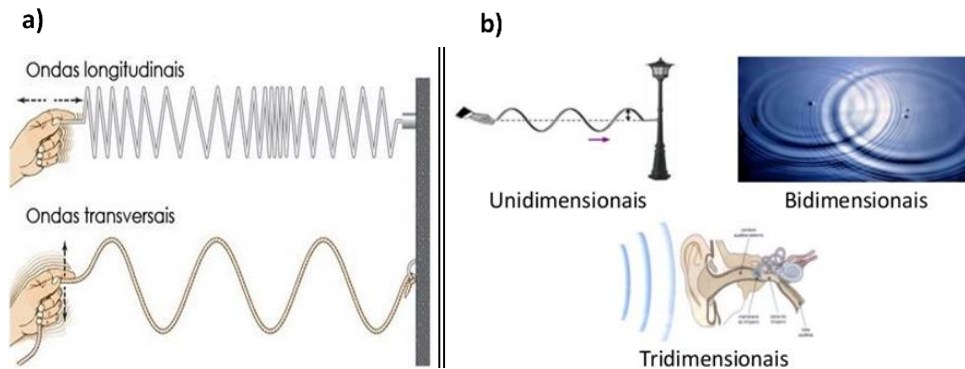
As ondas são classificadas em dois grupos: as **ondas mecânicas** – que só se propagam através de um meio material: ondas sonoras, ondas na superfície da água, ondas em uma corda; e as **ondas eletromagnéticas** – que se propagam no vácuo: ondas de rádio, micro-ondas, luz visível, raios X. Estas ondas não necessitam de um meio material para existir. As ondas luminosas de uma estrela, por exemplo, chegam até nós atravessando o espaço vazio (HALLIDAY; RESNICK; WALLKER, 2009b). Temos ainda duas definições relacionadas a direção de propagação e oscilação, que podem ser: **longitudinais** – se propagam em uma direção paralela a direção de oscilação e **transversais** – se propagam em uma direção perpendicular à direção de oscilação (Figura 3.4.a).

Quanto ao direcionamento espacial da propagação, podem ser classificadas como: **unidimensionais** – quando a propagação ocorre em uma única direção, **bidimensionais** –

¹³ Nem todos os fenômenos associados à luz podem ser explicados a partir da teoria ondulatória. Efeitos oriundos da absorção e emissão, por exemplo, são descritos com base na teoria corpuscular da luz, que a considera constituída por pacotes discretos de energia chamados de fótons ou quanta.

quando a propagação ocorre em duas direções e **tridimensionais** – quando a propagação ocorre em todas as direções (Figura 3.4.b).

Figura 3.4 – Ondas longitudinais e transversais (a). Ondas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (b).



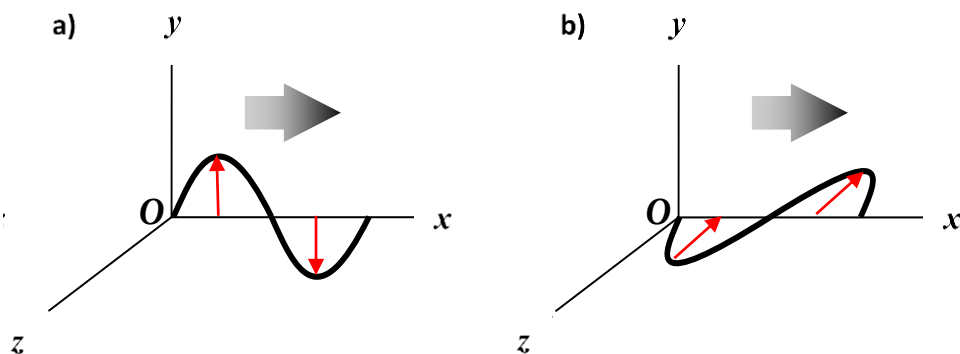
Fonte: <http://www.eav.eng.br/tech/fisica>

A polarização é uma propriedade típica das ondas transversais, pois para ondas longitudinais quaisquer planos perpendiculares à direção de propagação são equivalentes.

Supondo uma corda em equilíbrio ao longo do eixo O_x (os pontos da corda não se movem na direção de x) é possível deslocamentos ao longo do eixo O_y (Figura 3.5.a). Nessa situação, a corda sempre fica contida no plano xy . Mas, seria possível também ocorrer deslocamentos ao longo do eixo Oz (Figura 3.5.b) e, nesse caso, a corda sempre fica contida no plano xz .

Uma onda é linearmente polarizada ao longo da direção y quando a oscilação ocorre ao longo do eixo y . Quando a oscilação ocorre ao longo do eixo z dizemos que ela é polarizada ao longo da direção z (YOUNG; FREEDMAN, 2009a).

Figura 3.5 – Onda polarizada nos planos xy (a) e xz (b).



Fonte: Próprio autor

Esse raciocínio também é válido para as ondas eletromagnéticas uma que vez que quaisquer delas são ondas tridimensionais e transversais. As propriedades de polarização das ondas eletromagnéticas podem ser obtidas a partir das equações de Maxwell – equações que sintetizam as leis do eletromagnetismo:

$$\text{I} \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon_o} \quad (3.1)$$

$$\text{II} \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{III} \quad \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.3)$$

$$\text{IV} \quad \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_o I + \epsilon_o \mu_o \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (3.4)$$

Analisando essas equações podemos obter conclusões importantes a respeito das características das ondas eletromagnéticas. Vejamos algumas:

i – Para satisfazer as primeiras duas equações, (3.1) e (3.2), os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ devem ser perpendiculares entre si e, ao mesmo tempo, perpendiculares à direção de propagação da onda.

ii – Das equações (3.3) e (3.4) obtém-se as relações $E = c.B$ e $B = \varepsilon_o\mu_o c E$. Para que ambas sejam satisfeitas simultaneamente, c , que representa a velocidade de propagação da onda, deve assumir o valor:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o\mu_o}} \quad (3.5)$$

Substituindo-se na equação (3.5) os valores de ε_o (permissividade elétrica do vácuo) e de μ_o (permeabilidade magnética do vácuo), o valor de c resulta em aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s, que reconhecemos como a velocidade da luz no vácuo – este cálculo, realizado pela primeira vez no século XIX, foi a primeira evidência teórica da natureza eletromagnética da luz. A relação $E = c.B$ mostra que a intensidade do campo elétrico é cerca de 300 milhões de vezes maior que a do campo magnético – por essa razão quase todos os detectores de ondas eletromagnéticas funcionam pela ação da força elétrica sobre elétrons do material e não pela ação da força magnética (YOUNG; FREEDMAN, 2009b).

iii – Os campos elétrico e magnético mudam durante a propagação da onda. Portanto, dependem das coordenadas da direção da propagação e do tempo.

Se considerarmos que a onda eletromagnética se propaga ao longo de uma direção x , então campo elétrico $\vec{E}$ será direcionado ao longo de uma direção y e campo magnético $\vec{B}$ ao longo de uma direção z , ambas mutuamente perpendiculares. Dessa forma, os campos elétrico e magnético são expressos pelas funções vetoriais:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, t) &= E(x, t)\hat{j} \\ &\text{e} \\ \vec{B}(x, t) &= B(x, t)\hat{k} \end{aligned}$$

iv – A partir das equações (3.3) e (3.4) é possível concluir que os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ satisfazem as equações diferenciais,

$$\frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial x^2} = \varepsilon_o\mu_o \frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial^2 B(x, t)}{\partial x^2} = \varepsilon_o \mu_o \frac{\partial^2 B(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

que exibem a forma da equação geral de onda,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

que é a equação diferencial geral que governa a propagação de ondas de todos os tipos (HALLIDAY; RESNICK; WALLKER, 2009b).

A solução mais simples para as equações de onda (3.6) e (3.7) é aquela que descreve uma onda harmônica, no qual os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ oscilam de acordo com funções seno ou cosseno. Neste caso, a onda eletromagnética pode ser modelada por meio de uma **função de onda** da mesma forma que se faz para ondas em uma corda vibrante. Supondo uma onda transversal se propagando ao longo de uma corda esticada no sentido positivo do eixo x , teremos uma função de onda dada pela equação:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (3.9)$$

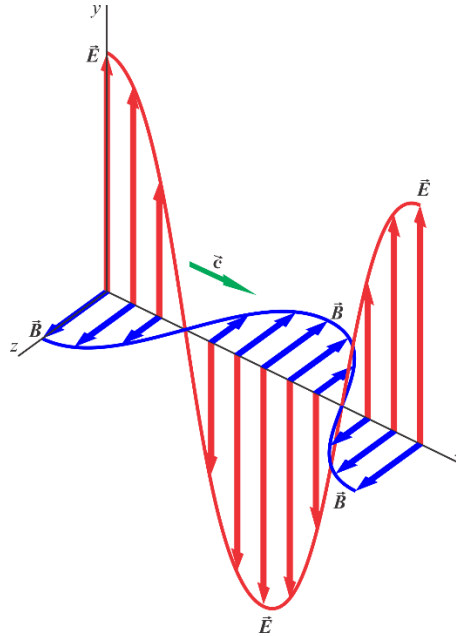
onde $y(x, t)$ é o deslocamento transversal de um ponto da corda de coordenada x para um instante t a partir do ponto de equilíbrio, ponto que é definido em $y = 0$, A é o deslocamento máximo, ou **amplitude** da onda; ω é sua **frequência angular**, igual a 2π vezes sua **frequência** f ; e k é o **número de onda**, igual a $2\pi/\lambda$, sendo λ o **comprimento de onda** da onda.

Vamos supor que na Figura 3.6 $E_y(x, t)$ e $B_z(x, t)$ representem, respectivamente, os valores instantâneos das componentes y de $\vec{E}$ e z de $\vec{B}$ de uma onda eletromagnética e ainda que $E_{máx}$ e $B_{máx}$ representem os valores máximos, ou amplitudes, desses campos. Então as funções de onda são dadas por:

$$E_y(x, t) = E_{máx} \cos(kx - \omega t) \quad (3.10)$$

$$B_z(x, t) = B_{m\acute{a}x} \cos(kx - \omega t)$$

Figura 3.6 – Onda plana eletromagnética senoidal propagando-se no sentido +Ox.



Fonte: <http://www.fisica-interessante.com/>

Por definição, a direção de polarização de uma onda eletromagnética é dada pela direção do vetor campo elétrico $\vec{E}$ (YOUNG; FREEDMAN, 2009a). Logo, diz-se que a onda eletromagnética descrita pela equação,

$$\vec{E}(x, t) = E_{m\acute{a}x} \cos(kx - \omega t) \hat{j} \quad (3.11)$$

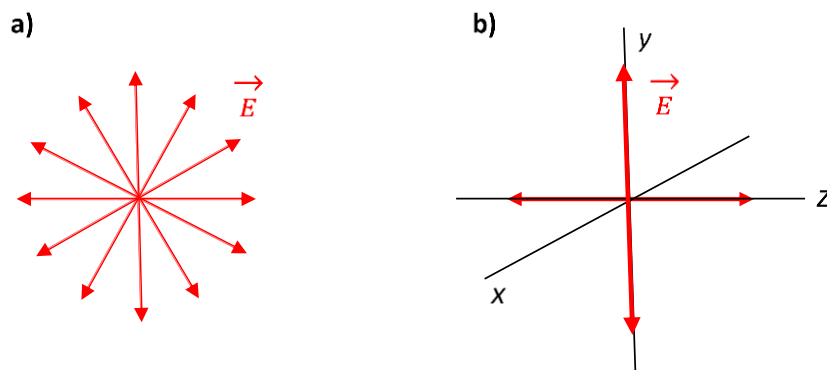
$$\vec{B}(x, t) = B_{m\acute{a}x} \cos(kx - \omega t) \hat{k}$$

é polarizada na direção y porque o campo elétrico possui componente somente nessa direção. Desta forma, para fins de definição do estado de polarização da luz, devemos analisar a superposição das componentes elétricas da radiação.

Fontes comuns de luz, como o Sol, lâmpadas incandescentes e fluorescentes, emitem luz não polarizada (luz natural). Neste tipo de luz o campo elétrico resultante em cada ponto de propagação acaba possuindo múltiplas direções (RIBEIRO; VERDEAUX, 2012) conforme

ilustra a Figura 3.7.a. Todavia, em um meio homogêneo, qualquer onda luminosa pode ser descrita, de forma particular, como a soma de duas ondas linearmente polarizadas oscilando em direções perpendiculares com uma diferença de fase constante entre si, pois as leis do eletromagnetismo são lineares nos campos elétrico e magnético e o princípio da superposição pode ser utilizado (AZEVEDO *et al.*, 2010), como mostra Figura 3.7.b

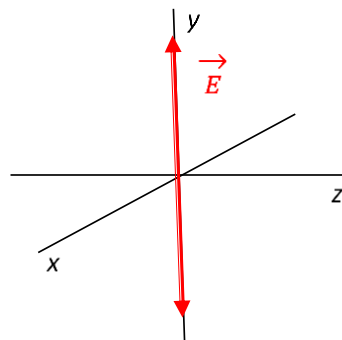
Figura 3.7 – Representações do vetor campo elétrico de uma fonte de luz não polarizada.



Fonte: Próprio autor.

De outra forma, quando a luz é produzida por um só átomo a configuração é diferente. Neste caso o campo elétrico oscila em uma só direção definindo uma onda linearmente polarizada, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.8 – Representação do vetor campo elétrico de uma fonte de luz polarizada.



Fonte: Próprio autor.

Assim, para uma radiação luminosa que se propaga em um meio homogêneo, seu campo elétrico, de forma geral, pode ser escrito como:

$$\vec{E}(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda}x - \omega t\right)\hat{j} + D \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda}x - \omega t + \varphi\right)\hat{k} \quad (3.12)$$

onde n é o **índice de refração** do meio.

O estado de polarização da luz depende da razão A/D (A e D são as amplitudes dos componentes do campo elétrico em cada plano) e da diferença de fase φ . Vamos analisar alguns casos particulares:

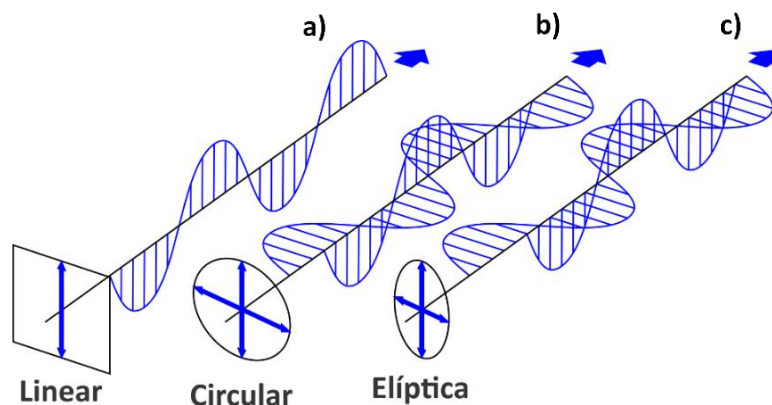
Se essa diferença de fase for $\varphi = 0$ ou $\varphi = \pm \pi$, o fator cosseno pode ser posto em evidência e o campo elétrico resultante será definido por $\vec{E}(x, t) = \cos[A\left(\frac{2\pi n}{\lambda}x - \omega t\right)\hat{j} + D\left(\frac{2\pi n}{\lambda}x - \omega t\right)\hat{k}]$. Os termos entre parênteses são iguais, logo o campo elétrico resultante aponta sempre na direção do vetor $A\hat{j} \pm D\hat{k}$, ou seja, a onda é **linearmente polarizada** (Figura 3.9.a) e amplitude do campo elétrico resultante é $\sqrt{2}$ vezes maior do que as amplitudes dos campos elétricos das ondas originais (LALIC, 2011).

Caso a diferença de fase seja igual a $\pi/2$ e $A = D$, teremos duas ondas que se propagam na direção do eixo x , uma polarizada ao longo do eixo y e outra polarizada ao longo do eixo z , de tal forma que o campo elétrico na direção do eixo y será máximo quando o campo elétrico na direção do eixo z for zero e vice-versa. Como as funções seno e cosseno têm uma defasagem de $\pi/2$ radianos (90°), podemos representar a variação do campo elétrico ao longo do eixo y com uma função seno e a variação do campo elétrico ao longo do eixo z com uma função cosseno. Assim, a equação geral (3.12) assume a forma $\vec{E}(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi n}{\lambda}x - \omega t\right)\hat{j} + A \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda}x - \omega t\right)\hat{k}$. Colocando A em evidência no segundo termo dessa equação e elevando ambos os membros ao quadrado, a fim de calcular módulo do campo elétrico resultante, teremos $A^2[E_y^2(x, t) + E_z^2(x, t)]$, onde o termo entre colchetes é a identidade trigonométrica $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$. Logo, o campo resultante $\vec{E}(x, t)$ terá sempre o mesmo comprimento (módulo) A .

Além disso, a superposição das componentes elétricas da radiação resulta em uma onda cujo campo elétrico não oscila ao longo de uma direção fixa, mas muda a direção descrevendo uma trajetória semelhante ao movimento helicoidal (LALIC, 2011). Por essa razão a onda é dita **circularmente polarizada** (Figura 3.9.b). Finalmente, se $\varphi \neq \pi/2$ ou se $A \neq D$, o resultado é uma onda cujo campo elétrico gira ao mesmo tempo que seu

comprimento (módulo) sofre variações. A “ponta” do vetor resultante, em vez de um círculo, descreve uma elipse. A onda é dita **elípticamente polarizada** (Figura 3.9.c).

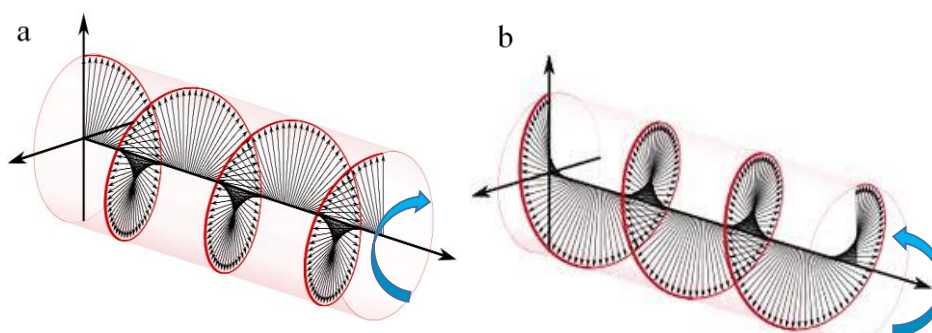
Figura 3.9 – Ondas com polarizações linear (a), circular (b) e elíptica (c)



Fonte: adaptado de (CAVALCANTE; TAVOLARO; GUIMARÃES, 2006)

Por convenção, se a ponta do vetor $\vec{E}$, como o vemos quando a luz vem diretamente em nossa direção, se movimenta no sentido horário (Figura 3.10.a), dizemos que a luz é circularmente polarizada à direita ou dextrogira. Se, no entanto, a ponta do vetor se movimenta no sentido oposto (Figura 3.10.b), dizemos que a luz é circularmente polarizada à esquerda ou levogira (YOUNG; FREEDMAN, 2009a).

Figura 3.10 – Ondas com polarização circular para direita e para esquerda.



Fonte: adaptada de Ribeiro e Verdeaux (2012).

Das definições acima surge um questionamento importante: se a luz deve vibrar em alguma dessas formas, como ela pode ser não polarizada? Se a luz se propaga de forma que o vetor campo elétrico primeiro vibre em uma direção e depois na outra, a polarização se

modificará constantemente. Sabe-se que a emissão¹⁴ de um átomo dura cerca de 10^{-8} segundos, e se um átomo emitir luz com uma certa polarização, enquanto outro átomo emite a luz com uma polarização diferente, a polarização se modificará a cada 10^{-8} segundos (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Se a polarização se modificar mais rapidamente do que podemos detectá-la, então denominamos a luz de não polarizada, porque todos os efeitos da polarização se cancelam.

A luz não polarizada pode tornar-se polarizada por meio de alguns processos naturais e pela utilização de dispositivos sintéticos construídos para esta finalidade. No subcapítulo seguinte, descreveremos cada modalidade.

3.5 Processos de polarização da luz

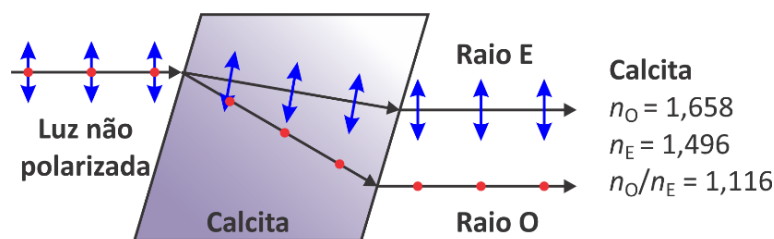
Por birrefringência

Um efeito interessante da polarização é o fato de existirem substâncias (certos cristais) para as quais o índice de refração é diferente para a luz linearmente polarizada em uma direção e linearmente polarizada em outra. Tais materiais apresentam índices de refração diferentes para a polarização da luz perpendicular ao eixo ótico - direção dos eixos das moléculas do cristal - (n_o) e para polarização paralela a esse eixo (n_e). A **birrefringência** é, portanto, a propriedade óptica de minerais anisotrópicos¹⁵ transparentes, que faz com que a radiação luminosa seja dividida em dois feixes ortogonais de radiação polarizada que se propagam com velocidades diferentes dentro do corpo do mineral, conforme está esquematicamente representado na Figura 3.11.

¹⁴ A emissão de luz ocorre quando um átomo faz uma transição de um nível excitado, de maior energia, até um nível inferior, de menor energia (YOUNG; FREEDMAN, 2009a)

¹⁵ Anisotropia é a característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direção. Costuma-se designar qual a propriedade em que existe a anisotropia, por exemplo, anisotropia eléctrica, óptica, magnética.

Figura 3.11 – Polarização por dupla refração ou birrefringência – materiais birrefringentes.



Raio ordinário O: o índice de refração n_O é o mesmo em todas as direções de propagação.

Raio extraordinário E: o índice de refração n_E depende da direção de propagação.

Fonte: adaptado de <https://slideplayer.com.br/slide/1609675/>

Para entender como isso corre, consideremos um material composto de moléculas longas (onde seu comprimento seja muito maior que sua largura) arranjadas na substância com os seus eixos longos paralelos. Então, quando o campo elétrico oscilante passa por esta substância, os elétrons na substância respondem mais facilmente às oscilações na direção paralela aos eixos das moléculas do que eles responderiam caso o campo elétrico tentasse empurrá-los na direção perpendicular ao eixo molecular (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Desse modo temos respostas diferentes para a polarização em uma e outra direção.

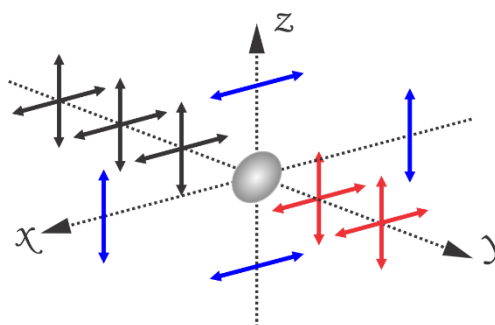
Por uma razão ou por outra, em uma substância birrefringente deve haver uma certa quantidade de alinhamento de moléculas não simétricas. Certamente um cristal cúbico, que tem a simetria de um cubo, não pode ser birrefringente. Mas os cristais longos em forma de agulha como, por exemplo, a calcita, a turmalina e o quartzo, sem dúvida contêm moléculas que são assimétricas, e esse efeito pode ser observado muito facilmente. Existem outros materiais que em certas condições, por serem compostos de longas moléculas, também podem se tornar birrefringentes: o celofane, o plástico quando submetido à tensões mecânicas, substâncias líquidas compostas por moléculas assimétricas quando submetidas a um campo elétrico (YOUNG; FREEDMAN, 2009a). Assim, um feixe luminoso pode ser separado em dois feixes perpendicularmente polarizados a partir de luz não polarizada.

Por espalhamento

Essa importante e curiosa propriedade da luz também se manifesta em fenômenos típicos e corriqueiros do dia a dia. Ao olhar para o céu durante o dia, a luz que vemos é a luz solar que foi absorvida e depois transmitida em várias direções. Esse fenômeno denomina-se **espalhamento**.

No espalhamento, uma radiação que incide sobre um núcleo espalhador é absorvida e irradiada e, dependendo do ângulo de espalhamento, a radiação será polarizada (Figura 3.12). Se considerarmos a luz espalhada em 90° , a vibração das partículas carregadas irradia na direção do observador somente quando a vibração for perpendicular à linha de visão do observador, e assim a luz será polarizada ao longo da direção de vibração. Essa polarização por espalhamento vem da interação entre o campo elétrico da onda e as moléculas das partículas espalhadoras. O campo elétrico da radiação incidente produz um momento de dipolo¹⁶ induzido sobre as partículas carregadas no ar. Esse dipolo elétrico, então, oscila em uma direção fixa gerando uma onda eletromagnética plana com intensidade máxima em um plano normal à direção da vibração das cargas, que será a onda espalhada. Dessa forma, além da cor azulada, dependendo da direção que observamos a luz do céu ela é também parcialmente ou totalmente polarizada (ORTIZ; LABURÚ, 2010).

Figura 3.12 – Representação do processo de polarização por espalhamento.



Fonte: adaptado de (ORTIZ; LABURÚ, 2010)

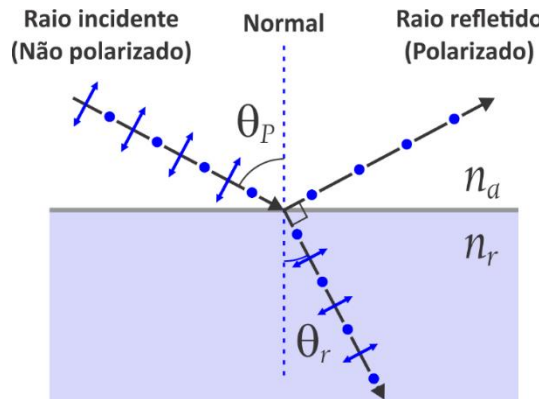
Portanto, o espalhamento é um exemplo de uma maneira de se produzir luz polarizada.

Por reflexão – lei de Brewster

Quando a luz, não polarizada, incide sobre uma superfície de um material dielétrico (não condutor), pode ocorrer a polarização parcial ou total da parte refletida. Para representar essa situação, a Figura 3.13 representa um feixe de luz não polarizada que incide sobre a superfície de separação entre dois materiais transparentes, onde o plano que contém o raio incidente, o raio refletido e a normal à superfície denomina-se plano de incidência.

¹⁶ Um dipolo elétrico é um par de cargas de mesma magnitude e sinais contrários, q e $-q$, situadas em pontos diferentes a uma certa distância. A carga total do dipolo é zero. Se $\mathbf{l}$ é o vetor de posição da carga positiva em relação à negativa, então o momento de dipolo elétrico do dipolo é o vetor $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$.

Figura 3.13 – Representação do processo de polarização por reflexão.



Fonte: Próprio autor.

Nessa situação, uma parte da luz é transmitida e outra é refletida. As ondas provenientes da radiação luminosa se propagam nos mais variados planos, mas na maior parte dos ângulos de incidência, as ondas refletidas mais acentuadamente são aquelas em que o campo elétrico $\vec{E}$ é perpendicular ao plano de incidência, ou seja, paralelo ao plano da interface refletora. Nesse caso, as ondas são parcialmente polarizadas na direção perpendicular ao plano de incidência.

Contudo, existe um determinado ângulo de incidência, denominado ângulo de polarização θ_p para o qual os componentes de $\vec{E}$ paralelos ao plano de incidência são totalmente refratados e os componentes de $\vec{E}$ perpendiculares ao plano de incidência são parcialmente refletidos e parcialmente refratados. Assim, a luz refletida é totalmente polarizada em um plano perpendicular ao plano de incidência enquanto a luz refratada, por ser uma superposição dos componentes paralelos e perpendiculares do campo elétrico, é parcialmente polarizada em um plano paralelo ao plano de incidência.

O cientista inglês Sir David Brewster descobriu em 1812 que, se o ângulo de incidência coincidir com o ângulo de polarização θ_p , então o raio refletido é perpendicular ao raio refratado (Figura 3.13). Assim, o ângulo de refração θ_r fica igual ao complemento de θ_p . Sendo n_a o índice de refração do meio em que se propaga o raio incidente e n_r o índice de refração do meio em que se propaga o raio refratado (YOUNG; FREEDMAN, 2009a). Dessa forma,

$$\theta_r = 90^\circ - \theta_p \text{ e } n_a \sin \theta_p = n_r \sin \theta_r$$

onde, encontramos:

$$n_a \sin \theta_p = n_r \sin(90^\circ - \theta_p) = n_r \cos \theta_p;$$

$$\operatorname{tg} \theta_p = \frac{n_r}{n_a} \text{ (Lei de Brewster para o ângulo de polarização)} \quad (3.13)$$

Para o caso particular em que n_a é o índice de refração do ar, então $\operatorname{tg} \theta_p = n_r$. Para a água $n_r = 1,33$, logo, $\theta_p = 53^\circ$.

Essa relação é conhecida como lei de Brewster. Ela foi obtida experimentalmente, mas é possível deduzi-la teoricamente a partir das equações de Maxwell.

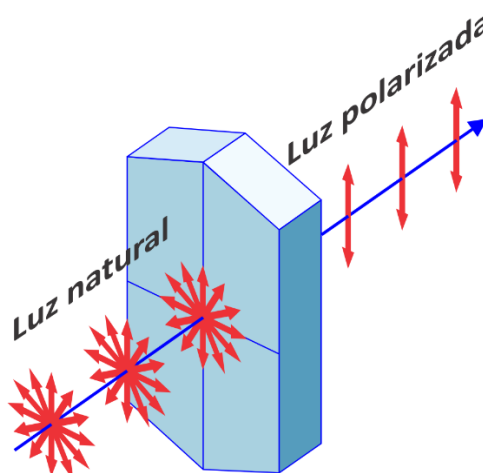
Em resumo, para incidência em ângulo de Brewster, a luz refletida é completamente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência. Em particular, se a polarização da luz incidente é paralela ao plano de incidência, o feixe refletido não será observado. Se a luz incidente é não polarizada, a luz refletida é parcialmente polarizada (ou totalmente polarizada para incidência em ângulo de Brewster), exceto para incidência normal.

A polarização por reflexão possibilita o uso eficiente de filtros polarizadores em óculos de sol. Quando uma superfície horizontal reflete a luz solar, o plano de incidência é vertical e a luz refletida contém majoritariamente luz polarizada na direção horizontal. Quando a reflexão ocorre na superfície lisa do asfalto ou de um lago, ela produz um ofuscamento indesejável. Os fabricantes de óculos de sol produzem lentes com eixo de polarização na direção vertical, a fim de que a maior parte da luz refletida com plano de polarização horizontal não atinja os olhos do observador. Os óculos também reduzem a intensidade global da luz não polarizada que incide em suas lentes em cerca de 50% (YOUNG; FREEDMAN, 2009a).

Por absorção seletiva

Em certos cristais e outras substâncias não só o índice de refração, mas também o coeficiente de absorção, é diferente para a luz polarizada em direções distintas. A partir dos mesmos argumentos que apoiaram a ideia de birrefringência, é compreensível que a absorção possa variar com a direção na qual as cargas são forçadas a vibrem em uma substância anisotrópica (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Essa forma de polarização, também conhecida como **dicroísmo**, consiste na absorção seletiva da onda linearmente ou circularmente polarizada. Um cristal de turmalina, por exemplo, absorve a radiação em determinados planos de oscilação, conforme mostra a Figura 3.14.

Figura 3.14 – Representação do processo de polarização por absorção seletiva.



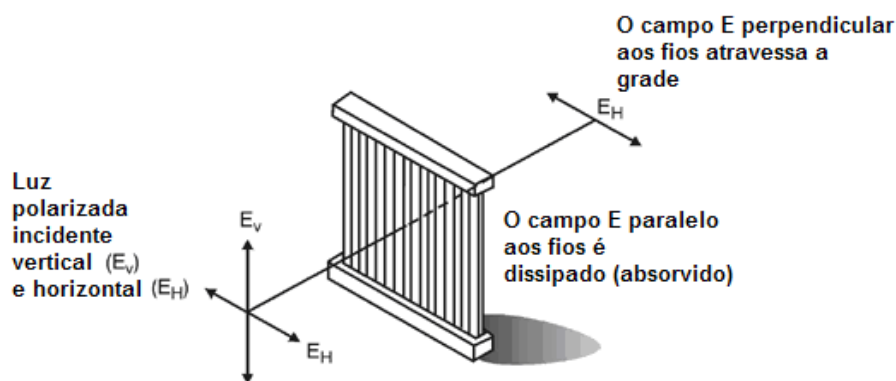
Fonte: Próprio autor.

O entendimento dessa forma de polarização deu origem ao desenvolvimento de polarizadores sintéticos – esse tipo de polarizador foi utilizado na construção do nosso estereoscópio e é o elemento fundamental para a visualização das imagens tridimensionais – cujo processo de construção apresentaremos a seguir.

As ondas produzidas por uma emissora de rádio, por exemplo, são, em geral, linearmente polarizadas. Em uma antena de TV que possui um elemento na direção horizontal, são captadas ondas polarizadas na direção horizontal, e, se o elemento da antena estiver disposto na direção vertical, serão captadas ondas polarizadas na direção vertical, visto que os elétrons livres do metal têm maior grau de liberdade para movimentos na direção ao longo do comprimento do elemento condutor. Mas no caso da luz visível, a situação é mais complicada, pois as fontes comuns emitem luz não polarizada. Nesse caso, a emissão total é resultado da emissão individual de cada molécula que constitui a fonte de luz. A luz emitida por uma única molécula pode ser linearmente polarizada como a onda emitida por uma antena de rádio. Todavia, como o número de moléculas de qualquer fonte comum de luz é muito grande, existe uma infinidade de ondas polarizadas aleatoriamente em todas as direções transversais possíveis (YOUNG; FREEDMAN, 2009a).

Para se conseguir polarizar um feixe de luz natural é necessário a utilização de filtros. Esses filtros apresentam diferentes detalhes de construção, definidos de acordo com o comprimento de onda da luz a ser polarizada. Para micro-ondas com comprimentos de onda da ordem de alguns centímetros, um bom filtro polarizador consiste em uma grade de fios condutores próximos e paralelos, isolados entre si e igualmente espaçados (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Representação esquemática de filtros construídos para polarizar uma radiação incidente.



Fonte: <http://www.novacon.com.br/basean3.htm>

A onda que possui um campo $\vec{E}$ paralelo aos fios, provoca o movimento dos elétrons que estão livres para mover-se ao longo do comprimento dos fios. Essa corrente resultante (I) dissipa boa parte da energia proveniente das ondas na forma de calor devido à resistência elétrica (R) dos fios à uma taxa de I^2R , de forma que as ondas que atravessam a grade possuem amplitudes menores do que as amplitudes das ondas incidentes. Por outro lado, as ondas que chegam a grade com um campo $\vec{E}$ perpendicular à direção de disposição dos fios, atravessam-na praticamente sem nenhuma alteração, pois os elétrons não podem se mover através do ar entre os fios (YOUNG; FREEDMAN, 2009a). Portanto, um feixe de ondas que passa através desse tipo de filtro emerge polarizado em um plano perpendicular ao plano dos fios.

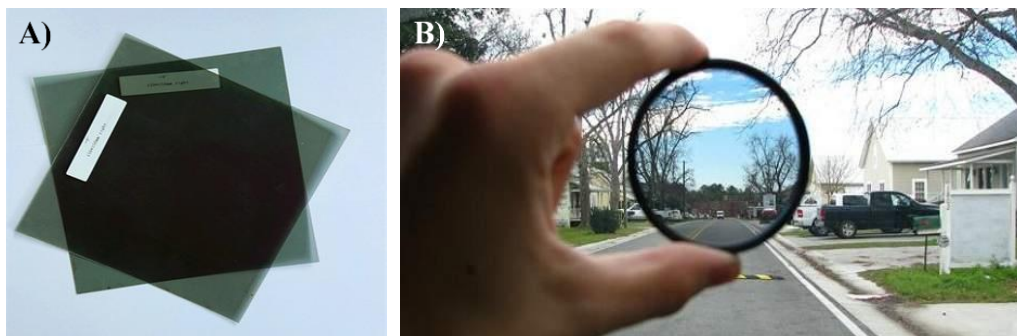
Uma forma simples de polarizar a luz visível é usando o filtro sintético inventado em 1938 por Edwin H. Land, cientista norte-americano. Esse filtro, conhecido como polaroide¹⁷ (Figura 3.16.a), é amplamente usado em óculos de sol e em câmeras fotográficas, por exemplo. Funciona baseado no princípio da absorção seletiva, onde um dos componentes da onda que incide sobre ele é absorvido de forma muito mais acentuada do que o outro (Figura 3.16.b).

Um filtro polaroide transmite mais de 80% da intensidade da luz polarizada em uma direção paralela a certo eixo do material, chamado **eixo de polarização**, porém transmite

¹⁷ Polaroides ou polarizadores sintéticos são largamente utilizados para diversas finalidades. O presente trabalho não tem a pretensão de fazer um levantamento e/ou descrição geral de suas aplicações. Assim, nos deteremos a descrever os princípios básicos envolvidos na construção de imagens 3D e mostrar como esse efeito pode ser obtido com a utilização desses polarizadores.

menos de 1% da luz polarizada em uma direção perpendicular a esse eixo (YOUNG; FREEDMAN, 2009a).

Figura 3.16 – Imagens de filmes polarizadores.



Fonte: <http://www.nanotechcameras.com.br/>

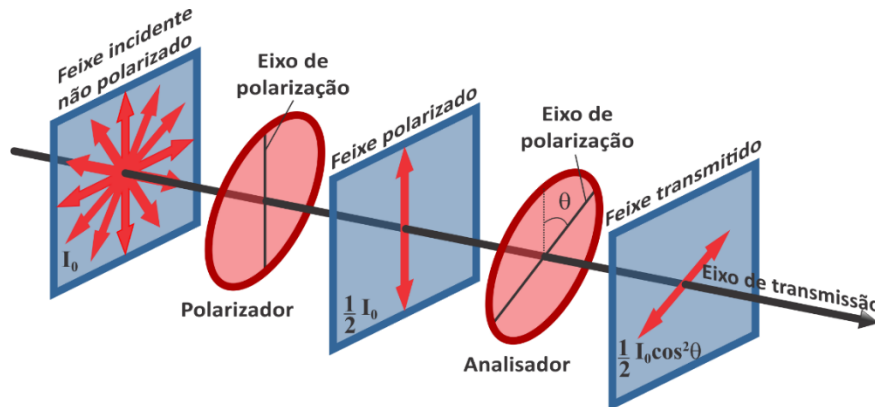
A construção do polarizador sintético para a luz segue o mesmo princípio do filtro para micro-ondas. O polaroide consiste em uma fina camada de pequenos cristais de herapathite (um sal de iodo e quinina), todos alinhados paralelamente e incorporado em um filme de polímero de nitrocelulose transparente. Esses cristais absorvem a luz quando as oscilações estão em uma direção, mas não absorvem tanto quando as oscilações estão em outra direção. Um tipo comum de filme polaroide é feito utilizando-se uma lâmina de PVA (álcool polivinílico) que contém longas cadeias de hidrocarbonetos¹⁸ dispostas aleatoriamente. Quando a lâmina sofre uma deformação (estiramento), produzida por uma tração a quente (60°C), as longas cadeias de hidrocarbonetos se alongam segundo a mesma direção da deformação. Em seguida as lâminas são impregnadas com iodo a fim de se tornarem condutoras para frequências óticas (aprox. 10^{14} Hz) e absorver a luz com polarização paralelas às cadeias moleculares (DUMKE; JR, 1982).

Um polarizador ideal transmite 50% da intensidade da luz não polarizada incidente. Uma vez que a luz completamente não polarizada apresenta estados de polarização aleatórios, podemos considerar que, na média, os dois componentes do campo $\vec{E}$ (um paralelo e outro perpendicular ao eixo do polarizador) são iguais.

É possível analisar agora o que ocorre quando a luz polarizada que emerge de um polarizador incide sobre um segundo polarizador, como indicado na Figura 3.17.

¹⁸ Na química, um hidrocarboneto é um composto químico constituído por átomos de carbono e de hidrogênio unidos tetraedricamente por ligação covalente assim como todos os compostos orgânicos.

Figura 3.17 – Representação esquemática da lei de Malus.



Fonte: Próprio autor.

Supondo que os eixos de polarização dos polarizadores estejam dispostos em um ângulo θ , que intensidade da luz emergirá do segundo polarizador, ou analisador?

A luz incidente no analisador pode ser decomposta em um componente perpendicular ao eixo de transmissão, proporcional a $\sin \theta$, e um componente paralelo ao eixo de transmissão, proporcional a $\cos \theta$. A amplitude da luz que emerge do polaroide-analisador é somente a parte cossenoidal; o componente $\sin \theta$ é absorvido (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009).

A amplitude que “sai” pelo polaroide é menor do que a amplitude que “entrou”, por um fator $\cos \theta$. Sabe-se que a intensidade de uma onda eletromagnética é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. Logo, a razão entre as intensidades das ondas incidente e transmitida é igual a $\cos^2 \theta$ (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Consequentemente, a intensidade da luz que emerge do analisador é:

$$I = I_{m\acute{a}x} \cos^2 \theta \quad (3.14)$$

onde $I_{m\acute{a}x}$ é a intensidade máxima da luz transmitida (para $\theta = 0^\circ$) e I é a intensidade transmitida para um dado ângulo θ . A intensidade da luz transmitida será igual a zero quando o eixo do polarizador estiver cruzado com o do analisador, ou seja, quando $\theta = 90^\circ$. É possível provar a validade dessa relação de forma prática utilizando óculos de sol (lentes polarizadas). Basta colocar os óculos e olhar para o monitor de uma TV (que não seja de tubo) ou de um notebook e começar a inclinar a cabeça. Existe uma posição em que o monitor ficará bem escuro. Nessa situação, os eixos de polarização da luz emitida pelo monitor (que é polarizada) e das lentes dos óculos estão dispostos em direções perpendiculares.

Essa relação, descoberta experimentalmente por Etienne Louis Malus em 1809, denomina-se lei de Malus só é válida quando a luz incidente sobre o analisador já estiver polarizada (YOUNG; FREEDMAN, 2009a).

As relações anteriores foram obtidas considerando polarizadores ideais. Um polarizador real é caracterizado por transmitâncias¹⁹ principais K_1 e K_2 :

K_1 é a fração transmitida da intensidade na polarização desejada ($0 \leq K_1 \leq 1$)

K_2 é a fração transmitida da intensidade na polarização não desejada ($0 \leq K_2 \leq 1$)

K_1 deve ser maior possível e K_2 menor possível, por isso a razão K_1/K_2 pode ser considerada um indicador de qualidade do polarizador.

O polarizador sintético é utilizado em várias aplicações, dentre as quais:

- **Mostrador de cristal líquido:** são essenciais na construção de *displays* e monitores em geral.
- **Cinema 3D:** sistema de projeção e óculos polarizadores adequados
- **Óculos de pescador e de sol:** reduz a luz refletida na água e a luz espalhada pelo céu.
- **Filtros fotográficos:** reduzem reflexos e escurecem o céu.
- **Filtros para microscópio:** permitem acentuar contraste.
- **Filtro antirreflexo:** polarizador circular permite eliminar reflexos em mostradores.
- **Chaves óticas:** baseadas em efeitos *Kerr* (efeito, no qual um campo elétrico é capaz de produzir birrefringência em certos líquidos).

Estes foram os principais conceitos físicos e aspectos matemáticos relacionados à polarização da luz. No capítulo seguinte alguns deles serão retomados no contexto da Sequência de Ensino que foi construída para ser implementada em sala de aula.

¹⁹ Em óptica e espectroscopia, Transmitância é uma grandeza que representa a fração da luz incidente, com um comprimento de onda específico, que atravessa determinado material

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA SITUAÇÃO DE ESTUDO NO ENSINO DA POLARIZAÇÃO EM FÍSICA

Neste capítulo descreveremos de que forma utilizamos o estereoscópio a partir de uma SE para realizar um estudo qualitativo da polarização da luz. A SE foi construída para ser implementada em poucas aulas, visto que a polarização da luz é apenas um dentre vários fenômenos relacionados ao estudo das ondas eletromagnéticas. Adotamos como prática pedagógica as etapas da Situação de Estudo (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012), proposta que segue as orientações pedagógicas da teoria de Vigotski e sugere que os conteúdos escolares sejam trabalhados a partir de temas gerais em que o professor tem a possibilidade de abordar conteúdo específicos de sua disciplina.

4.1 Tipo da pesquisa

Apesar de abordarmos neste trabalho um fenômeno explicado segundo os critérios de uma ciência (Física) classificada como exata, os aspectos que nos propomos a discutir estão fortemente ligados a elementos subjetivos. Entendemos que a questão da aprendizagem não pode ser analisada desconsiderando-se a existência de uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito. Até mesmo certas similaridades entre os sujeitos envolvidos, como idade, características físicas, perfil socioeconômico e nível de conhecimento, por exemplo, não são garantia de que determinada metodologia propiciará a todos eles os mesmos resultados quantitativos em termos de aproveitamento. Os alunos estão propensos a mudanças de humor, nem todos possuem a mesma motivação pelos estudos e, muito menos, a mesma forma e o mesmo “ritmo” de aprendizagem.

Considerando esses fatores, nossa pesquisa é, do ponto de vista da forma de abordagem do problema, qualitativa. Segundo Silva e Menezes (2005), nesse tipo de pesquisa existe um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não se pode traduzir em valores numéricos. Nossa fonte direta de coleta de dados é a sala de aula. Por isso, a interpretação dos fatos ocorridos durante a aplicação da SE e a atribuição de significados às respostas dos estudantes são as bases do processo de análise e avaliação do nosso estudo.

A seguir, destacaremos alguns aspectos importantes acerca da utilização de demonstrações experimentais no ensino de física que nos levaram a empregá-las em nossa proposta de intervenção didática.

4.2 Abordagem experimental

A utilização de experimentos como recurso didático se constitui uma boa estratégia de ensino. É assim reconhecida por diversos autores, (SÉRÉ; COELHO; NUNES, 2003; PINHO; FILHO, 2000; GASPAR; MONTEIRO, 2005; MONTEIRO; MONTEIRO; GASPAR, 2005), por aproximar a teoria da prática, concebendo-a como uma forma de estabelecer um elo entre o mundo dos objetos e o mundo dos conceitos, leis, teorias e linguagens simbólicas.

A atividade de demonstração experimental em sala de aula, particularmente quando relacionada a conteúdos de Física, apesar de fundamentar-se em conceitos científicos, formais e abstratos, tem por singularidade própria a ênfase no elemento real, no que é diretamente observável[...] (GASPAR; MONTEIRO, 2005, p. 232).

Os PCN's (BRASIL, 2002) também sugerem que o professor desenvolva suas atividades de forma a garantir que a experimentação esteja presente ao longo do processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se sua ação sobre o objeto de estudo em diferentes formas e níveis, buscando garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável.

Isso inclui retomar o papel da experimentação, atribuindo-lhe uma maior abrangência para além das situações convencionais de experimentação em laboratório. As abordagens mais tradicionais precisariam, portanto, ser revistas, evitando-se “experiências” que se reduzem à execução de uma lista de procedimentos previamente fixados, cujo sentido nem sempre fica claro para o aluno (BRASIL, 2002, p. 84).

Pelos argumentos acima apresentados é que tomamos a decisão de desenvolver os conteúdos relacionados à polarização da luz a partir da reprodução de algum processo ou aplicação que atendessem a quatro requisitos que julgamos fundamentais:

- 1) Que despertasse a curiosidade.

- 2) Que reproduzisse algo conhecido pelos alunos.
- 3) Que pudesse ser construído tanto pelo professor quanto pelos alunos.
- 4) Que proporcionasse conhecimento interdisciplinar.

Realizando pesquisas e fazendo alguns testes, encontramos uma forma viável para construção de um estereoscópio para projeção de imagens tridimensionais por luz polarizada.

Esse tipo de demonstração, em nossa opinião, atende ao primeiro requisito estabelecido por provocar ilusão de ótica, sensação que inevitavelmente desperta a curiosidade e estimula a busca por explicações; atende ao requisito dois pelo fato de a tecnologia 3D ser popular e conhecida por todos ou pela maioria dos alunos. Para atender ao requisito três, desenvolvemos o aparato fazendo uso de objetos e instrumentos de fácil acesso e de materiais simples, alguns deles oriundos de descarte. Ressaltamos que essa é uma característica a ser considerada na concepção da presente proposta, pois a participação dos alunos na construção do estereoscópio e/ou na produção das imagens tridimensionais, ainda que em colaboração com o professor, poderá tornar o aprendizado mais prazeroso por agregar valores que vão além da mera sequência de um roteiro ou manipulação de números. Pode promover ainda, a interação aluno-aluno e aluno-professor que favorece o compartilhamento de saberes e aproxima mais o ambiente escolar da investigação e do fazer científico.

Para que o estereoscópio seja construído e funcione, é necessário a reunião de conhecimentos em algumas áreas da Física (Óptica Geométrica, Ondulatória e Eletromagnetismo) e da Matemática (Semelhança de Triângulos e Relações Trigonométricas). Além do mais, para entender como o estereoscópio nos “engana” ao nos dar a sensação de profundidade em uma imagem plana, é preciso compreender, através da Biologia, o processo de visão binocular de alguns animais, inclusive o homem. É possível ainda, abordar conceitos presentes no campo das Artes Visuais: desenho artístico, pintura, fotografias etc., ou seja, a proposta de experiência promove conhecimento interdisciplinar, requisito quatro.

A seguir, antes de apresentar as etapas de construção do estereoscópio que concebemos, comentaremos sobre os princípios da visão binocular e faremos um traçado histórico sobre a invenção e evolução do estereoscópio. Essas informações nos ajudaram a entender melhor o funcionamento do nosso aparato.

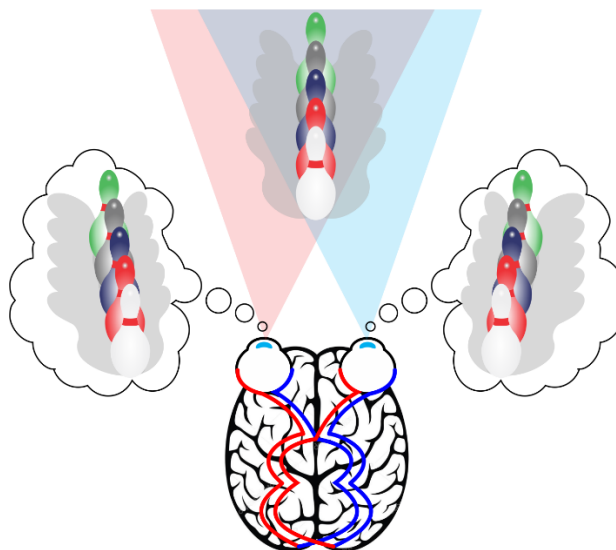
4.3 O estereoscópio de Wheatstone

A representação da realidade é uma prática que vem acompanhando o homem em sua evolução - a pintura surgiu ainda na pré-história com as imagens rupestres. O desenvolvimento de processos físico-químico, tornou possível o registro de imagens através das câmeras fotográficas. Logo depois, com a chegada do cinema e da televisão, essas imagens ganharam movimentos e sons. O próximo passo foi a reprodução, com a invenção do estereoscópio, da sensação de perspectiva e profundidade que possuímos naturalmente das coisas a nossa volta. A busca pelo aprimoramento dessa forma de representação resultou na tecnologia 3D, incorporada primeiramente ao cinema e depois às telas de televisores e computadores, e continua se desenvolvendo com a holografia²⁰ e os sistemas de realidade virtual.

A concepção de imagens tridimensionais é baseada na técnica da estereoscopia: utilização da sobreposição de duas imagens planas de um mesmo objeto e ligeiramente distintas devido a diferença de enquadramento, o que provoca a sensação de profundidade. Estereoscopia é uma palavra que tem origem em dois termos gregos que representam: “visão” e “sólido” (TOMOYOSE, 2010). Essa técnica é uma forma de simular a visão binocular do homem e de alguns animais, pois embora apenas uma parcela das aves possua sinais de visão estereoscópica, praticamente todos os mamíferos possuem este recurso ainda que de forma rudimentar. A visão estereoscópica advém da natureza óptica de nossa fisiologia, pelo fato de possuímos dois olhos voltados para a mesma direção e separados um do outro por uma distância média de 6,5 cm. As duas imagens, uma de cada olho, cada uma processada por um lado do nosso cérebro, forma uma imagem final única (MASCHIO, 2008), conforme Figura 4.1.

²⁰ O nome holografia vem do grego holos (todo, inteiro) e graphos (sinal, escrita), pois é um método de registro "integral" da informação com relevo e profundidade. Os hologramas possuem uma característica única: cada parte deles possui a informação do todo. Assim, um pequeno pedaço de um holograma tem informações da imagem do mesmo holograma completo. Portanto, não deve ser considerada simplesmente como mais uma forma de visualização de imagens em três dimensões, mas sim como um processo de se codificar uma informação visual e depois, através do laser, decodificá-la, recriando "integralmente" esta mesma informação.

Figura 4.1 – Representação esquemática da visão binocular do homem.



Fonte: <http://www.vision3d.com/stereo.html>

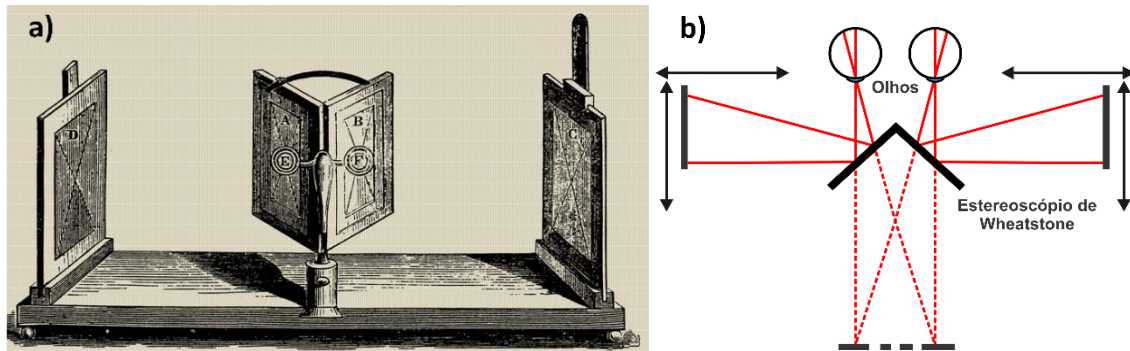
O entendimento desse processo proporcionou o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que provocam a sensação visual de profundidade em imagens planas.

Podemos ser levados a pensar que a obtenção de imagens em três dimensões é fruto de estudos recentes ou novidade tecnológica trazida pela popularização do cinema tridimensional (abreviado 3D) na década passada. No entanto, os conceitos básicos e as primeiras imagens não o são. No começo do século XIX, antes mesmo da consolidação da fotografia, o cientista inglês Sir Charles Wheatstone (1802-1875), partindo de experiências de Leonardo da Vinci e dos binóculos primitivos, apresentou o estereoscópio, em 1838 (MASCHIO, 2008). O princípio de funcionamento é simples: dois espelhos em ângulo de noventa graus colocados em frente a cada olho do observador, o qual vê as fotografias (ou eventualmente desenhos) de um par estéreo²¹ que são localizadas paralelas e a cada lado, a noventa graus da visão dele, à esquerda e à direita (LUNAZZI *et al.*, 2015).

Em sua primeira exibição, Charles Wheatstone utilizou como imagens dois pares de figuras geométricas desenhadas cuidadosamente (Figura 4.2.a). Posteriormente, o escocês Sir David Brewster (1781-1868), combinando o estereoscópio de Wheatstone e a fotografia (outra invenção recente à época), aperfeiçoou o dispositivo utilizando lentes no lugar dos espelhos do estereoscópio original (Figura 4.2.b), criando assim as primeiras câmeras fotográficas binoculares. Os novos estereoscópios fizeram sucesso por permitirem tirar ou ver cartões em terceira dimensão.

²¹ Refere-se ao conjunto de duas imagens obtidas em ângulos de visão diferentes de uma cena e que serão processadas de forma a transmitir a sensação de profundidade ao observador.

Figura 4.2 – Estereoscópio de Wheatstone (a) e o estereoscópio aperfeiçoado por Brewster (b).



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope>

Com o desenvolvimento da fotografia e dos sistemas ópticos, o estereoscópio também foi sendo aperfeiçoado. A Figura 4.3.a mostra um homem visualizando imagens em um estereoscópio que utiliza espelhos dispostos em ângulo de 45° para fazer a junção do par de imagens que foram produzidas em computador e a Figura 4.3.b mostra um outro tipo de estereoscópio que consiste de uma pequena caixa que lembra um binóculos, na qual um par de slides estéreo é colocado em um dos lados e o lado oposto possui dois orifícios para que o observador possa posicionar os olhos.

Figura 4.3 – Imagem de jovem visualizando um estereoscópio (a) e slides estéreos (b).



Fonte: Lunazzi *et al.* (2015).

Pelo que entendemos, são várias as técnicas que nos permitem a visualização de imagens tridimensionais, mas os princípios básicos envolvidos são os mesmos: obter duas imagens de um mesmo objeto ou paisagem, com um deslocamento angular horizontal adequado entre elas, e depois fazer com que cada olho visualize apenas uma das imagens. A

fusão e ajuste dessas duas imagens pelo cérebro nos dão a sensação de imersão e profundidade.

Alguns sistemas permitem que o par de imagens sejam projetadas em uma mesma superfície e, por meio de algumas técnicas, direciona-se somente uma delas para cada olho. Dentre as técnicas para separação das imagens temos:

1 - Efeito *pulfrich* - baseado na característica da visão humana de perceber mais lentamente a luz menos intensa em que observador deve usar um filtro (óculos com uma das lentes escurecidas) que torna a visão mais escura para um dos olhos. Assim, ao observar uma animação, os olhos têm velocidades diferentes de percepção, levando a um pequeno deslocamento entre as imagens vistas por cada olho, o que gera a sensação de profundidade e o efeito tridimensional;

2 - *ChromaDepth* – o princípio básico é o da refração da luz. As lentes dos óculos com tecnologia *ChromaDepth* contêm cristais transparentes com micro prismas para desviar a luz de acordo com a sua cor. Não é necessário a sobreposição de duas imagens uma vez esse sistema utiliza as cores para definir a profundidade dos elementos. Os elementos de cor vermelha são vistos mais próximos do observador enquanto os elementos de cores mais próximas do azul parecem estar mais afastados, proporcionando a disparidade entre a visão de cada olho provocando assim o efeito tridimensional;

3 - Anáglifo – Essa técnica consiste em dividir a imagem em seu espectro de cor e enviar uma faixa delas para cada olho. Para visualizar uma imagem ou vídeo em anáglifo o observador deve fazer uso de óculos especiais com filtros de cores a fim de permitir a passagem somente das cores selecionadas para cada olho (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Imagem para visualização em anáglifo.

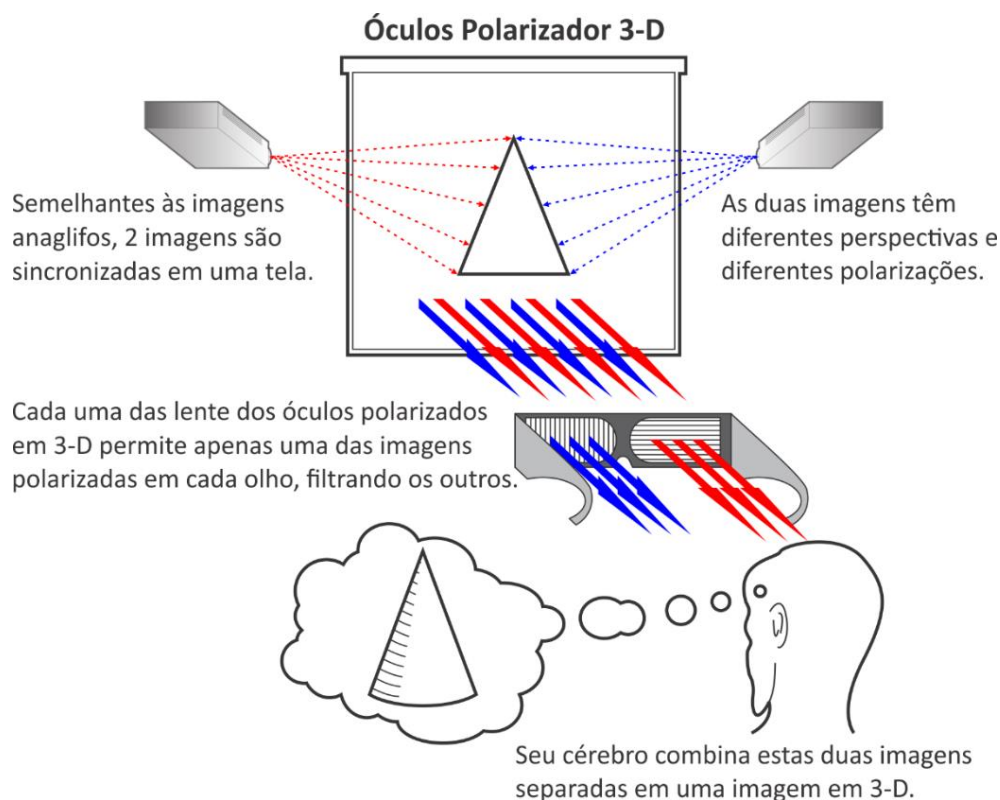


Fonte: <https://br.pinterest.com/>

4 - ColorCode 3D – esta solução é muito parecida com a do anáglifo, a diferença está na faixa do espectro determinada para cada olho que, nesse caso, é feita de forma desbalanceada. Os filtros *ColorCode* separam uma pequena parcela de frequências para um dos olhos e todas as demais para o outro (TOMOYOSE, 2010) fazendo com que um dos olhos capte toda informação do espectro de cores da imagem e o outro complementa com a informação de profundidade;

5 - Polarização – essa técnica consiste em fazer com que o par de imagens refletidas na tela de projeção estejam em planos de polarização ortogonais, de forma que cada lado dos óculos 3D bloqueie uma das imagens e transmita a outra. Para isso é necessário que as imagens esquerda e direita estejam sobrepostas, mas com polarizações diferentes, em uma tela capaz de manter a polarização da luz incidente de forma que um observador, utilizando óculos com filtros polarizadores apropriados, receba a imagem correta para cada olho. (TOMOYOSE, 2010). A Figura 4.5 descreve basicamente um sistema de exibição 3D utilizando a técnica de polarização da luz.

Figura 4.5 – Representação esquemática do sistema 3D por polarização.



Fonte: <http://www.vocesabia.net>

Em vez de usar cores para filtrar as imagens que cada olho deve observar, utiliza-se a polarização da luz para fazer essa separação. Nos óculos 3D cada lente é polarizada de forma diferente, filtrando apenas as ondas de luz polarizadas na mesma direção. A tela é desenvolvida de forma a manter a polarização quando a luz do projetor é refletida. A vantagem desse processo em relação aos demais, é a possibilidade de observar o efeito tridimensional tanto em imagens estáticas quanto em movimento. Além disso, todo espectro de cores é preservado. O ápice desse novo formato ocorreu em 2009 com o lançamento do filme *Avatar*. A qualidade das imagens e o sentido de profundidade em 3D ofereceram ao espectador uma sensação imersiva, que não encontra paralelo em nenhuma experiência anterior em 3D (CHRISTOFOLI, 2011).

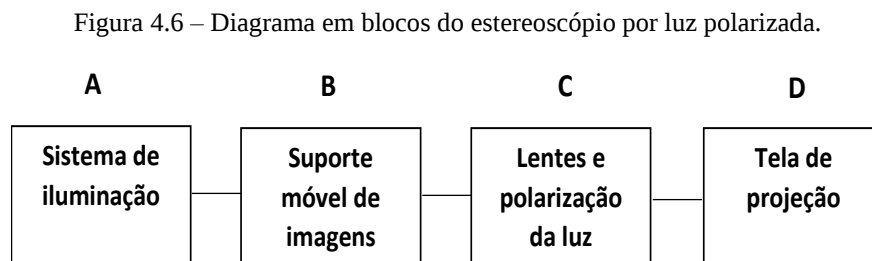
O estereoscópio que elaboramos e construímos simula a tecnologia 3D utilizado nas salas dos cinemas. Concebemos um aparato que replica, em pequena escala, esse sistema. A principal diferença é que utilizamos um par de imagens estáticas em vez de uma sucessão contínua de imagens (vídeo). A seguir, apresentaremos as etapas, os materiais e os instrumentos utilizados na elaboração e construção do nosso estereoscópio – os detalhes de cada etapa estão descritos no guia de montagem e aplicação didática (Apêndice C).

4.4 Construção do estereoscópio de luz polarizada

Utilizamos materiais e instrumentos acessíveis como lanternas, lupas, palitos de picolé, papel e cola de isopor, por exemplo, na construção do estereoscópio com o intuito de mostrar que a tecnologia utilizada na concepção de imagens tridimensionais pode ser entendida a partir de princípios simples e demonstrações de fácil reprodução.

Etapas de construção

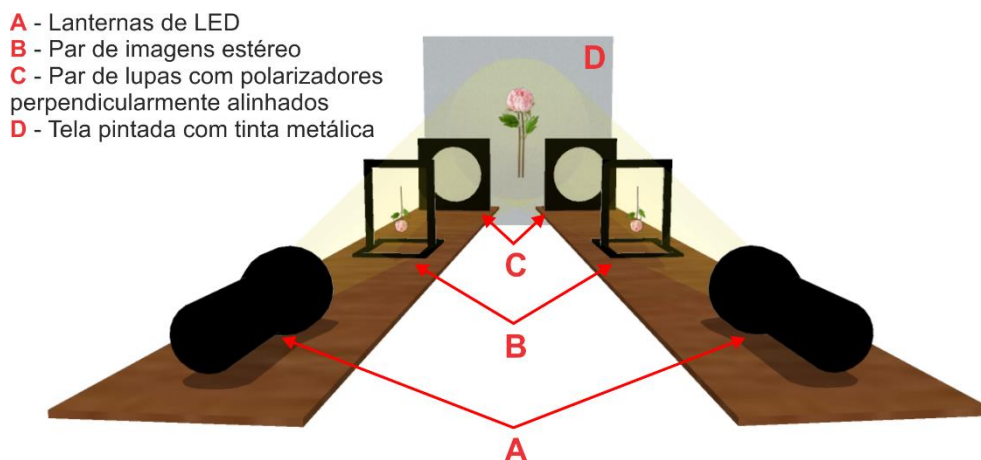
A estrutura do estereoscópio pode ser dividida em 4 blocos (Figura 4.6):



Fonte: Próprio autor.

Os dispositivos integrantes dos blocos **A**, **B** e **C** devem ser colocados sobre uma base plana que permita um bom alinhamento entre eles (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Representação do estereoscópio por luz polarizada.



Fonte: Próprio autor.

Sistema de iluminação (A)

Utilizamos como fontes de luz duas lanternas de *LED* (Figura 4.8) para iluminar cada uma das imagens do par estéreo. As lanternas são do mesmo modelo e possuem um grupo de 9 *leds* dispostos em um refletor de 70mm de diâmetro, próximo ao diâmetro das lupas que é de 100mm. É importante também, utilizar lanternas com boa intensidade luminosa, pois as películas polarizadoras nas lupas e nos óculos, diminuem consideravelmente a intensidade da luz.

Figura 4.8 – Imagem da fonte de luz do estereoscópio.

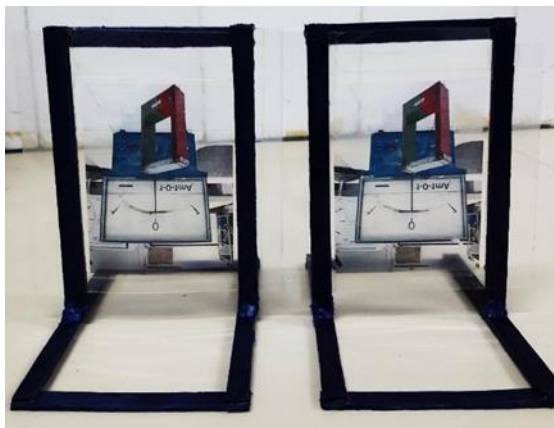


Fonte: Próprio autor.

Suportes de fixação das imagens (B)

Os suportes em formato de moldura (Figura 4.9) têm a função de acomodar o par de imagens estereoscópicas e foram confeccionadas com palitos de picolé.

Figura 4.9 – Imagem do par estéreo de fotografias fixadas nos suportes.



Fonte: Próprio autor.

As imagens devem ser colocadas invertidas no suporte, pois as lupas são lentes convergentes e farão projeções invertidas dessas imagens na tela.

Fixação e ajuste das lentes e películas polarizadoras (C)

Com o objetivo de ampliar a projeção das imagens utilizamos um par de lupas que foram fixadas em uma estrutura de isopor e recobertas com cartolina. Películas polarizadoras removidas de monitores de PC, *Notebook* e/ou *tablets* danificados, foram fixadas às lentes com seus eixos de polarização dispostos em um ângulo de aproximadamente 90° (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Imagem do conjunto projetor-polarizador.

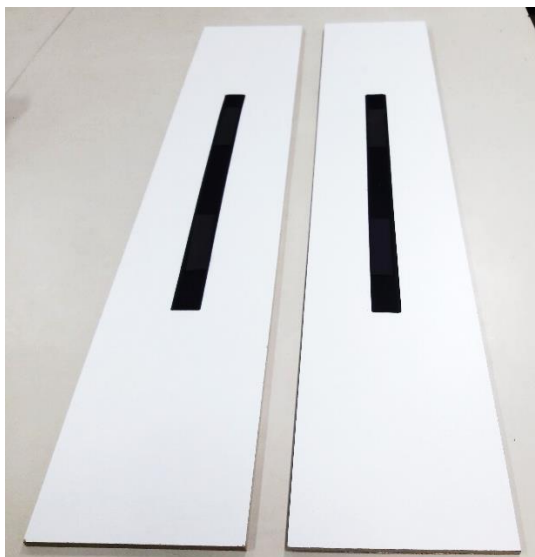


Fonte: Próprio autor.

Construção das bases

Utilizamos duas bases retangulares planas que serviram de suporte para acomodação das lentes polarizadas, das imagens e da fonte de luz. É preferível que essas bases não sejam muito leves para que o sistema tenha boa estabilidade. Em nosso projeto utilizamos bases retangulares de compensado medindo 13cm de largura por 90cm de comprimento. Entretanto, não há problema em se utilizar madeira, compensado ou *MDF*, por exemplo, desde que se tenha duas bases aproximadamente planas (Figura 4.11). As dimensões das bases devem ficar próximas de 12cm de largura por 100cm de comprimento.

Figura 4.11 – Bases de sustentação do estereoscópio.



Fonte: Próprio autor.

Tela de projeção (D)

O par de imagens estereoscópicas deve ser projetado na superfície capaz de manter a polarização da luz incidente, caso contrário o efeito 3D não poderá ser percebido. Para conseguir uma tela com essa característica, pintamos uma das faces de uma folha de *MDF* com tinta (*spray*) de pigmentos metálicos (superfícies metálicas não desfazem a polarização da luz incidente (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Imagem da tela de projeção.



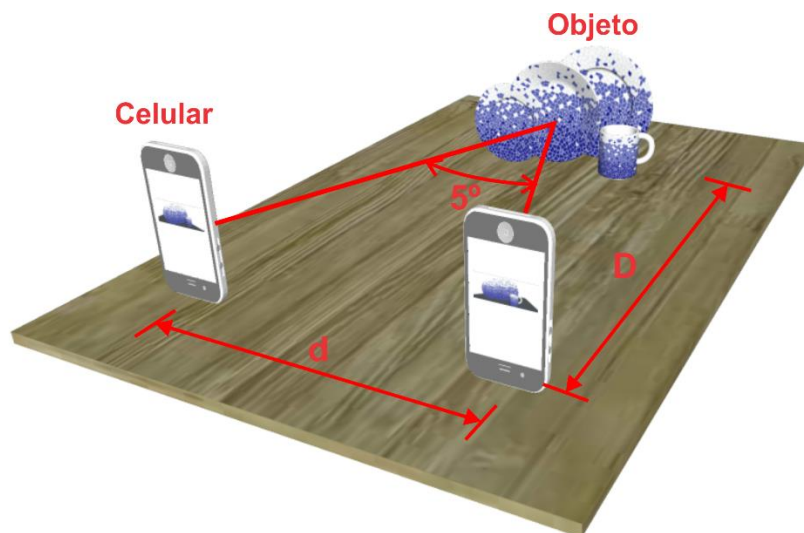
Fonte: Próprio autor.

Tirando as fotos com o celular

Para obter o par de imagens estéreo utilizamos o celular para tirar duas fotos em pontos ligeiramente distintos do mesmo objeto ou paisagem. O afastamento da câmera entre a primeira e a segunda fotografia depende da distância do objeto. Se afastarmos demais, as imagens ficarão em pontos tão diferentes que o cérebro não será capaz de interpretá-las, causando desconforto. Para evitar essa situação devemos manter como limite uma abertura de 5° entre as retas que partem do ponto-objeto e vão até centro da lente em cada uma das posições do celular, conforme a Figura 4.13.

Sendo assim, a distância d entre as posições do celular entre uma foto e outra pode ser determinada pela equação $d = 2 \cdot \operatorname{tg}(2,5^\circ) \cdot D$.

Figura 4.13 – Esquema do posicionamento da câmera e objeto.

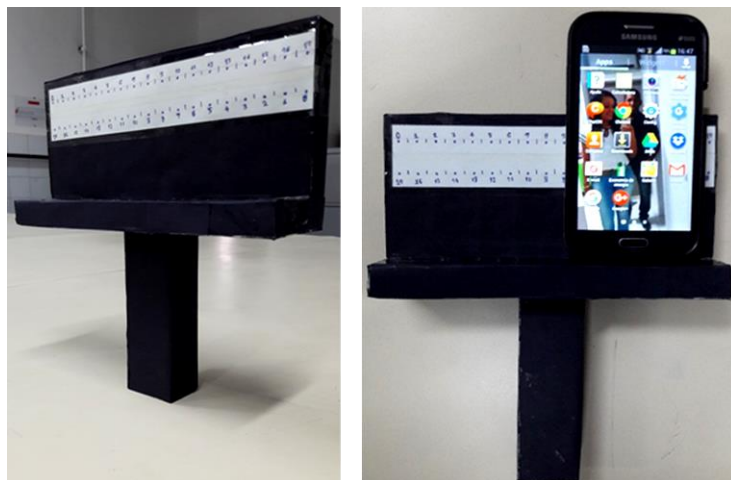


Fonte: Próprio autor.

Suporte do celular

Para garantir a correta variação angular entre uma fotografia e outra, construímos um suporte com escala graduada em milímetros. O suporte foi confeccionado com isopor e recoberto com cartolina (Figura 4.14).

Figura 4.14 – Imagem do suporte para câmera (celular).



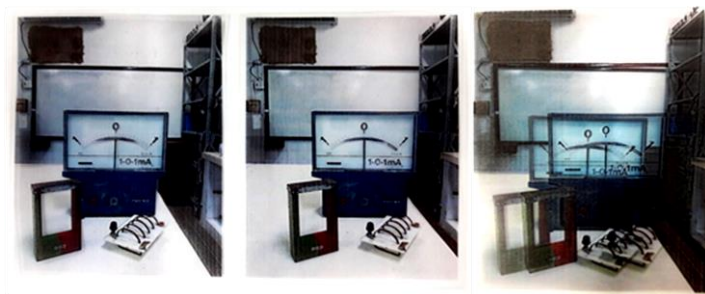
Fonte: Próprio autor.

Impressão das imagens

Fizemos a impressão das imagens em dois tipos de transparências: a laser e a jato de tinta. Ambas ficaram com boa qualidade, constituindo-se duas boas opções. Após a impressão, recortamos as imagens de forma que pudessem ser colocadas nos suportes. A Figura 4.15 apresenta dois exemplos de como devem ficar as imagens.

Figura 4.15 – Imagens de pares fotográficos impressos.

Galvanômetro



Veículo

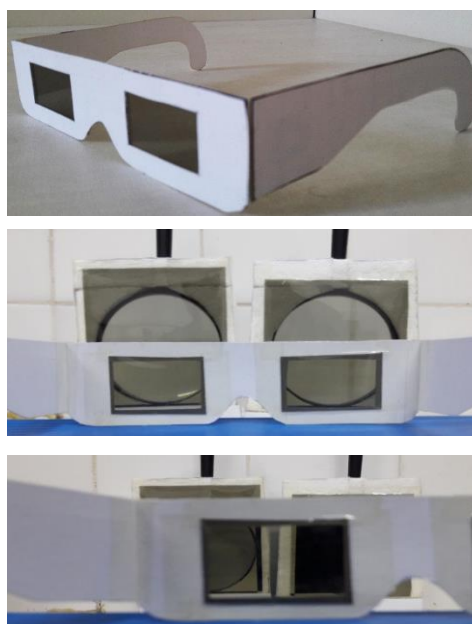


Fonte: Próprio autor.

Confecção dos óculos-3D

Encontramos um modelo de óculos (anáglifo) em um canal no *youtube*²² e o adaptamos à nossa proposta. Imprimimos e fizemos a colagem dos moldes em papelão de caixas de sapatos e similares, recortamos e fixamos películas polarizadoras nos dois lados dos óculos de forma que cada lado ficou com o eixo de polarização paralelo ao eixo de polarização da película fixada à uma das lupas e perpendicular ao eixo de polarização da película fixada à outra lupa. O resultado pode ser visto na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Imagens dos óculos 3D.



Fonte: Próprio autor.

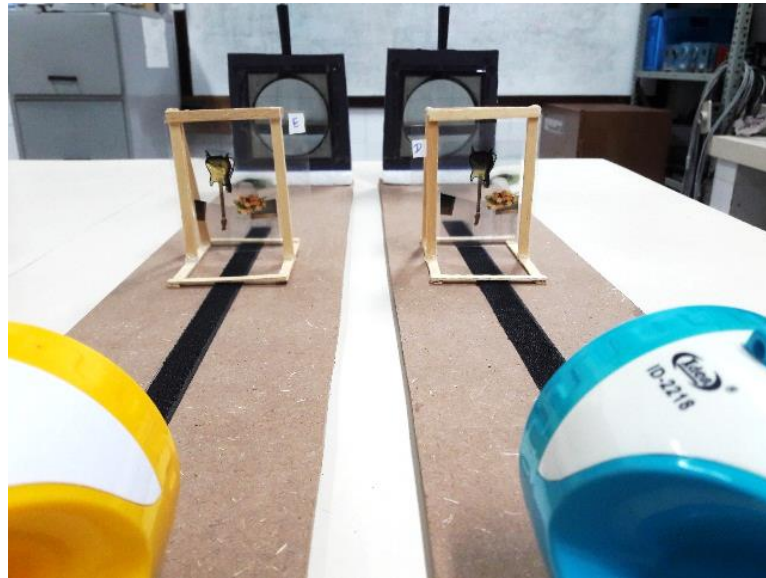
Visualização das imagens

Após a colocação de cada imagem no respectivo suporte, procede-se com os ajustes. Ligamos uma das lanternas e focalizamos a imagem na tela de projeção, em seguida ligamos a outra lanterna para projetar a segunda imagem que forma o par estéreo. Devemos ter as duas imagens focalizadas com as mesmas dimensões, porém é necessário deixar uma pequena variação horizontal para que o efeito tridimensional aconteça. Ao realizarmos todos os ajustes vemos a imagem projetada com a sensação de profundidade.

²² Disponível em: <<https://www.manualdomundo.com.br>> Acesso em 20/02/2019.

A Figura 4.17 mostra o estereoscópio montado sobre uma bancada e a Figura 4.18 mostra fotos tiradas das imagens na tela de projeção.

Figura 4.17 – Imagem do estereoscópio ajustado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.18 – Imagens de projeções (a).



Fonte: Próprio autor.

Na construção do nosso estereoscópio utilizamos o mínimo possível de recursos computacionais com a intenção de mostrar que a criação de imagens e até mesmo filmes 3D é baseada em princípios relativamente simples e conhecidos há tempo. Nas seções seguintes descreveremos o contexto escolar, o perfil dos estudantes e apresentaremos a sequência de ensino que foi construída para subsidiar a aplicação didática do estereoscópio.

4.5 Sujeitos da pesquisa e o local de intervenção

A SE foi implementada em uma turma de 35 alunos da terceira série do ensino médio regular do Centro de Ensino Coelho Neto-Turu, escola localizada na cidade de São Luís, capital do Maranhão. Trata-se de uma escola da rede pública estadual que possui 8 salas de aula, das quais duas eram destinadas às turmas de terceira série – exercíamos nossas atividades nessa escola havia cerca de três anos. O perfil dos estudantes (faixa etária, condição socioeconômica, nível de conhecimento e desenvolvimento) das duas turmas era praticamente o mesmo. Essa relativa homogeneidade nos levou a analisar e avaliar os dados obtidos em apenas uma delas.

A escola atende, em boa parte, alunos em situação socioeconômica desfavorável – apesar da escola estar localizada na capital, a quase totalidade dos estudantes residem na zona rural de São José de Ribamar, município que faz fronteira com São Luís. Provavelmente, as dificuldades de ordem econômica, acompanhada da pouca oferta de bens e serviços disponíveis para a comunidade, interferiram, também, na aprendizagem e no desenvolvimento dos estudantes. De forma geral, os estudantes apresentavam dificuldades em interpretação de textos e enunciados, além de pouco domínio das operações básicas de matemática – condição que dificulta bastante o entendimento das leis e conceitos em Física.

No que se refere à recursos educacionais, a escola não possuía laboratório de ciências, quadra poliesportiva nem auditório, a rede *wifi* não tinha capacidade suficiente para atender a demanda da escola e o laboratório de informática encontrava-se inoperante. O único recurso disponível era uma sala para exibição de vídeos (que utilizamos para projetar as imagens 3D).

Buscando alternativas que contornassem problemas dessa natureza, optamos por elaborar uma metodologia que ofereça condições de exequibilidade, também, em contextos educacionais adversos.

4.6 A proposta da SE para o estudo da polarização da luz

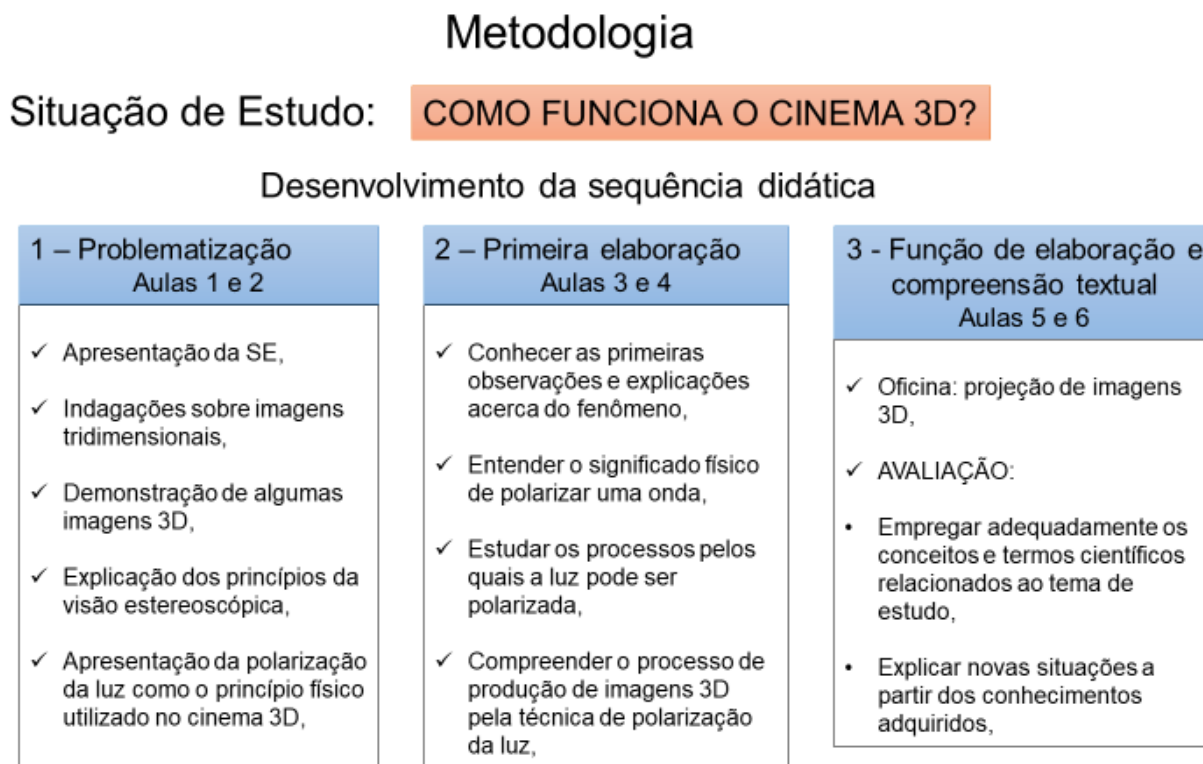
As atividades foram planejadas para que os estudantes pudessem aprender sobre a polarização da luz a partir da discussão dos processos e princípios físicos envolvidos na produção de imagens e filmes 3D. Além dos conceitos atinentes à polarização da luz, assuntos como visão binocular, campo de visão, estereoscopia e trigonometria também foram abordados buscando oferecer um estudo contextualizado e interdisciplinar.

Levando em conta a falta de equipamentos e recursos educacionais disponíveis na escola, implementamos nossa proposta utilizando materiais simples e de fácil aquisição. Ressaltamos que desenvolvemos as atividades tomando o cuidado de não descaracterizar o local e os sujeitos da pesquisa. Assim, a intervenção didática foi planejada atendendo aos seguintes critérios: i – seguir o plano anual da disciplina; ii – não comprometer o tempo destinado ao estudo dos demais conteúdos curriculares; iii – não alterar o horário das aulas; iv – utilizar a estrutura e os recursos da própria escola e aplicar o questionário de avaliação da aprendizagem no mesmo momento da prova bimestral planejado pela coordenação pedagógica da escola.

Não informamos aos estudantes que as atividades desenvolvidas faziam parte de um trabalho de pesquisa em ensino. Preferimos mantê-los no estado de ânimo. Informamos sobre a realização da pesquisa à direção da escola, que prontamente autorizou (Apêndice B) a implementação da sequência didática. Acreditamos que dessa forma manteríamos no processo investigativo as variáveis presentes na realidade concreta da escola e, conseqüentemente, obteríamos resultados mais próximos de uma situação real, disponibilizando uma proposta didática passível de implementação em escolas com realidades semelhantes.

A SE foi planejada para ser desenvolvida em seis aulas e aplicada em duas semanas. Por conta do tempo reduzido, os estudantes não foram orientados a construir o estereoscópio e nem os óculos 3D – o aparato foi apresentado pronto. Entretanto, os alunos participaram de uma oficina onde puderam produzir e projetar suas próprias imagens. O componente curricular Física, na 3ª série, possui carga horária semanal de 3 horas-aulas distribuídas em dois encontros sendo um encontro com uma aula e o outro com duas aulas consecutivas. Cada aula teve duração de 50 minutos. Distribuímos as aulas de acordo com as etapas da Situação de Estudo, como mostra a Figura 4.19.

Figura 4.19 – Quadro esquemático da sequência didática.



Fonte: Próprio autor.

As duas primeiras aulas compõem a primeira etapa da SE, definida como problematização. Nessa etapa os estudantes são postos diante de um problema vivenciado por eles cujo entendimento formal ainda não possuem, mas que conhecem e podem comentar alguns aspectos. A partir da discussão, da interação com os colegas e da mediação do professor, os estudantes serão conduzidos a compreender o problema de acordo com os conhecimentos científicos a ele relacionados.

4.7 Os instrumentos de coleta de dados

Para averiguar a relação dos estudantes com a tecnologia 3D, identificar os conhecimentos espontâneos que possuíam sobre o tema, analisar as interações em sala de aula bem como o desempenho dos estudantes durante as etapas de aplicação da sequência de aprendizagem, utilizamos os seguintes instrumentos: questionário de levantamento inicial; gravação em áudio das aulas e das atividades práticas; avaliação (escrita) individual subjetiva. A seguir, faremos um pequeno resumo a respeito dos objetivos de cada instrumento.

Questionário de levantamento Inicial

Realizamos um levantamento por meio de um questionário (Apêndice A.1) composto de 5 perguntas uma semana antes do início da aplicação da SE. Não se tratou de um pré-teste, uma vez que identificamos em nossas pesquisas que a polarização é um assunto praticamente inexplorado no ensino médio. O questionário não buscava averiguar se os estudantes possuíam conhecimentos relacionados às características e propriedades das ondas eletromagnéticas, uma vez que estávamos trabalhando esses conteúdos havia três semanas. Além do mais, acreditávamos ser possível ensinar sobre polarização da luz sem que os estudantes possuíssem previamente esses conceitos, pois no decorrer das atividades poderiam, e foram, comentados.

O objetivo do questionário era constatar se a tecnologia 3D era, de fato, popular entre os estudantes e o que eles poderiam dizer a respeito, a fim de planejarmos a intervenção direcionando a abordagem do conteúdo de acordo com as necessidades específicas dos estudantes. A pergunta 1 buscou identificar o tipo de exibição 3D mais comum entre os estudantes; o local em que assistiram e o que mais os chamou atenção. As perguntas 2 e 3 tiveram o objetivo de elencar os conhecimentos dos alunos sobre as características de imagens 2 e 3D e suas relações com nossas sensações visuais. As perguntas 4 e 5 buscaram evidenciar o que os alunos poderiam dizer a respeito das técnicas utilizadas na produção de imagens ou filmes 3D.

Segundo Vygotsky (2001) qualquer nova situação de aprendizagem que o aprendiz se depara no ambiente escolar possui relação com alguma situação já vivenciada por ele. Cabe ao professor, buscar essas experiências, identificar os conceitos espontâneos, apresentar os conceitos formais, e mediar a resignificação e reformulação de suas concepções prévias.

Gravação em áudio das aulas e atividades práticas

Realizamos a gravação em áudio das discussões fomentadas em torno das atividades desenvolvidas a fim de garantirmos o registro de todas as informações relevantes à pesquisa. Os registros foram realizados exclusivamente nos momentos em sala de aula pelo professor/pesquisador. Esses registros nos auxiliaram na análise das interações estabelecidas entre os sujeitos envolvidos com a finalidade de avaliarmos a motivação na realização das tarefas assim como a evolução conceitual adquirida pelos estudantes.

Avaliação escrita

Aplicamos uma avaliação escrita (Apêndice A.2) composta por 7 questões envolvendo os conteúdos estudados com o objetivo de aferir os resultados obtidos em termos de processos de ensino e aprendizagem. As questões 1 e 4 buscaram mostrar a capacidade dos estudantes de conceituar e descrever processos de polarização da luz fazendo uso de termos específicos. As questões 2 e 6 pretendiam evidenciar, por meio de esquemas representativos (figuras e/ou desenhos), o entendimento dos estudantes acerca dos modelos físicos abordados. As questões 3, 5 e 7 pretendiam averiguar a possibilidade de os estudantes explicarem novas situações a partir dos conhecimentos adquiridos.

No capítulo seguinte descreveremos as atividades desenvolvidas em cada etapa da SE, mostrando a finalidade dos questionamentos, os objetivos das tarefas sugeridas bem como o feedback dos estudantes.

5 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS DADOS

Neste capítulo descreveremos a sequência de aulas em cada etapa da SE e os procedimentos adotados em cada momento.

5.1 O desenvolvimento das aulas

Problematização

Aula 1

Iniciamos a primeira aula exibindo, com auxílio do *datashow*, imagens de desenhos anamórficos (Figura 5.1); imagens anáglifas (Figura 5.2) e imagens de um dispositivo que utiliza a combinação de dois espelhos côncavos para projetar a imagem tridimensional de um objeto (mirage) (Figura 5.3).

Figura 5.1 – Imagem de desenho anamórfico.



Fonte: <https://www.pinterest.es>

Figura 5.2 – Imagem 3D em anáglifo.



Fonte: <https://br.pinterest.com/>

Figura 5.3 – Imagem de objeto 3D com espelhos esféricos.



Fonte: <http://www.jornaljovem.com.br/educacao13>

Nessa primeira aula, fizemos algumas perguntas (em **negrito** no decorrer do texto) com o intuito de provocar a discussão do tema. Indagamos os estudantes sobre **como aquelas imagens eram produzidas de forma a provocar o efeito tridimensional**. Perguntamos **qual a principal diferença notada em olhar para as imagens com e sem os óculos (azul e vermelho)**. Alguns estudantes disseram que sem os óculos as imagens pareciam embaçadas, outros, que sem os óculos dava para perceber várias imagens sobrepostas. Todos concordaram que usando os óculos a imagem parecia mais próxima ou mais “realista”. Alguns concluíram que a imagem seria 3D por existir três imagens sobrepostas. Explicamos que eram apenas duas imagens sobrepostas e que apesar de no sistema anaglífico as cores predominantes serem a azul e vermelha, outras cores também estão presentes de forma mais sutil.

Prosseguimos questionando-os sobre **o significado do termo 3D e em que uma imagem 3D difere de uma 2D**. Os alunos responderam que 3D significa três dimensões e 2D duas dimensões. No entanto, a maioria não soube dizer em quantas dimensões o nosso sistema de visão nos permite enxergar. Alguns afirmaram que nossa visão é em 2D e que 3D só existe com algum equipamento tecnológico! Percebemos que os estudantes decoraram a sigla, muito utilizada no mundo do entretenimento, mas desconheciam qualquer relação com nossas sensações visuais e com os sistemas de coordenadas espaciais. Ficou evidente a necessidade da introdução de novos conceitos e a ressignificação das experiências que eles traziam sobre o assunto em discussão.

Prosseguindo, distribuímos um texto (Apêndice C.2 do Produto Educacional) que serviu de apoio durante toda a primeira etapa da SE com o qual explicamos os princípios da estereoscopia e as características da visão binocular. A partir de então, os estudantes começaram a participar mais ativamente da aula. Propomos uma dinâmica para avaliar, na prática, a visão binocular e monocular. Solicitamos que os alunos colocassem o dedo médio um pouco à frente dos olhos e que o alinhasse com algum objeto ao fundo da sala. Em seguida, solicitamos que abrissem e fechassem os olhos alternadamente. A impressão de que o dedo parecia se mover de um lado para o outro demonstrou aos estudantes que os nossos olhos não vêem a mesma imagem ao mesmo tempo, pois devido ao distanciamento entre eles vemos as coisas sempre em dois ângulos diferentes.

Em seguida, solicitamos que os estudantes, deixando estendidos somente os dedos indicadores de cada mão e com apenas um dos olhos abertos, tentassem tocar a ponta de um dedo no outro. À primeira vista parecia algo simples, fácil de se fazer, mas não tão fácil com um dos olhos fechados. A maioria dos estudantes não conseguiu na primeira tentativa. A intenção foi mostrar as características da visão binocular e as características visuais de alguns animais em função da disposição dos seus olhos no crânio. Apresentamos a estereoscopia como a área de estudo que trata da produção de imagens tridimensionais enfatizando que as técnicas de produção dessas imagens simulam o nosso sistema de visão binocular. Nesse momento explicamos que o termo 3D, de fato, significa três dimensões, mas que está relacionado a capacidade que algumas espécies de animais, inclusive o homem, possuem de enxergar os objetos tendo a percepção de altura, largura e profundidade.

Descrevemos a construção do primeiro estereoscópio e sua evolução a fim de mostrar que a concepção de imagens tridimensionais não é algo novo, tampouco invenção da indústria cinematográfica como muitos poderiam acreditar. Mostramos que o princípio básico de qualquer sistema de reprodução de imagens tridimensionais estereoscópicas consiste em

obter duas imagens em ângulos diferentes do mesmo objeto, ou paisagem, e direcionar apenas uma delas para cada olho, o que muda é a técnica utilizada para fazer cada olho enxergar apenas uma das imagens. Reforçamos que no sistema anáglifo a separação das imagens é feita por filtro de cores e aproveitamos para fazer outro questionamento: perguntamos **qual seria o motivo de se utilizar as cores azul e vermelha e se outras cores não funcionariam**. Apesar dos alunos conversarem baixinho entre si, provavelmente compartilhando suas opiniões e buscando elaborar uma boa resposta, ninguém respondeu. Explicamos que a utilização dessas cores está relacionada com as células fotossensíveis presentes na retina dos nossos olhos, os cones, que são mais sensíveis às radiações nessas faixas do espectro visível.

Prosseguimos direcionando a atenção dos estudantes para o cinema 3D atual em que numa única tela são projetadas as duas imagens ou cenas. Problematicamos sobre qual técnica seria utilizada para enviar uma imagem para cada olho nesse caso. Sem dar resposta, prosseguimos comentado um pouco sobre a história do cinema 3D, passando pelas primeiras exibições em óculos de cores, a disputa do mercado do entretenimento com a televisão, o período de declínio e o seu ressurgimento com as exibições de alta definição. Esse momento de discussão foi importante à medida que desenvolveu nos estudantes o olhar crítico e reflexivo acerca das relações e das mudanças que as descobertas científicas e o desenvolvimento tecnológico podem provocar em vários setores da sociedade.

Retomamos a pergunta anterior a respeito da **técnica utilizada para separar as imagens no cinema 3D atual** e, como esperávamos, ninguém tinha conhecimento. Nesse momento, trouxemos pela primeira vez a palavra polarização para a discussão. Informamos que, atualmente, utiliza-se a polarização da luz para enviar apenas uma das imagens para cada olho. **Perguntamos se alguém já tinha ouvido essa palavra e qual o seu significado**. Em meio ao barulho de vários alunos falando e buscando respostas ao mesmo tempo, um aluno levantou a voz e disse: “cores diferentes, eu acho que é isso”. Indagamos o porquê dessa resposta e ele replicou; “nos óculos de sol a lente é polarizada”. Perguntamos o que o aluno percebia de diferente ao usar óculos de sol e ele respondeu: “outras cores, realmente tem o vermelho e o azul, mas tem outra cor que eu não lembro qual é”.

As respostas dadas indicam que o aluno tentou conceituar polarização da luz a partir de uma situação que experimentou ao usar óculos de sol, no entanto o fez baseado apenas numa consequência do fenômeno, pois ao usarmos óculos de sol com lentes polarizadas percebemos que algumas superfícies transparentes feitas de plásticos, e seus derivados, podem apresentar algumas listas contendo várias cores, um efeito semelhante ao do arco-íris. Mesmo não estando corretas do ponto de vista científico essas respostas têm fundamental importância

para o desenvolvimento da SE, pois os questionamentos têm o objetivo de estimular os estudantes a compartilharem suas experiências e exporem suas concepções, fazendo-os perceber a necessidade de apropriação de outros conceitos necessários ao entendimento do assunto abordado.

Finalizamos a primeira aula ressaltando que a polarização da luz é utilizada no campo da estereoscopia e que nas próximas aulas iríamos entender como ela é aplicada no cinema 3D.

Aula 2

Iniciamos a segunda aula utilizando o estereoscópio (já construído) para exibir imagens tridimensionais (Figura 5.4). Enquanto fazíamos os ajustes das imagens os estudantes faziam perguntas a respeito dos materiais e acessórios utilizados no aparato. Pareciam curiosos para saber como objetos tão comuns no dia a dia estavam sendo utilizados naquele contexto. Terminado os ajustes procuramos fazer com que todos os alunos pudessem visualizar com os óculos as imagens projetadas (Figura 5.5).

Figura 5.4 – Imagem do estereoscópio montado durante aula.



Fonte: Arquivo próprio.

Figura 5.5 – Imagem dos estudantes assistindo exibição com o estereoscópio.



Fonte: Arquivo próprio.

Os alunos mostraram-se surpresos com o resultado, “parece que tá saindo da tela mesmo!”; “está ótimo”, diziam. Deixamos os estudantes por alguns minutos à vontade para observar e mexer nos componentes do estereoscópio. Desse contato surgiram algumas perguntas pelas quais explicamos, em linhas gerais, a função de cada componente do estereoscópio e reforçamos a importância das películas polarizadoras utilizadas para recobrir as lupas e confeccionar as lentes dos óculos.

Finalizamos a aula enfatizando que a polarização é um fenômeno ondulatório associado exclusivamente às ondas eletromagnéticas e que no encontro seguinte iríamos conceituar polarização e explicar como a luz pode ser polarizada. Distribuímos e solicitamos a leitura de um texto que elaboramos (capítulo 1 do Produto Educacional) para servir de apoio no encontro seguinte.

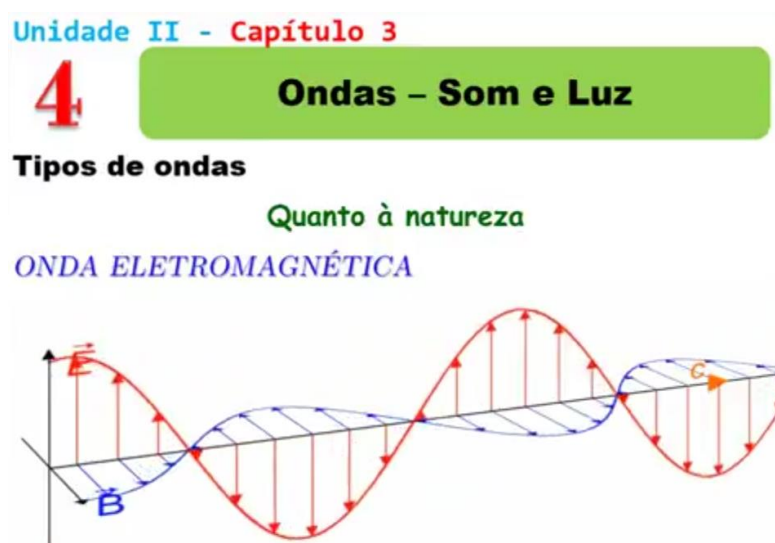
Primeira elaboração

Aula 3

Essa etapa, de acordo com a dinâmica da SE, é definida como etapa da primeira elaboração, onde foi feita a organização e sistematização das ideias e conceitos levantados na etapa anterior. Iniciamos solicitando que todos os estudantes estivessem de posse do texto de apoio disponibilizado na aula anterior. Prosseguimos trazendo fatos históricos relacionados às propriedades óticas da calcita, onde comentamos as primeiras explicações e o embate entre os modelos ondulatório e corpuscular da luz. Explicamos que a polarização é um fenômeno

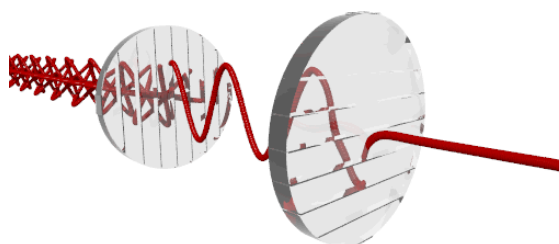
associado ao comportamento da luz enquanto onda eletromagnética; que tem origem nas vibrações aleatórias de muitos elétrons em uma substância; que polarizar a luz significa “filtrar” ondas eletromagnéticas que se propagam em um determinado plano de oscilação. Utilizamos animações, como mostram as Figura 5.6 e a Figura 5.7, para ilustrar esses fenômenos.

Figura 5.6 – Animação de uma onda eletromagnética.



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=HQFYpn2JecU>

Figura 5.7 – Animação de uma onda polarizada por um polaroide.



pavol krivosik, 2008

Fonte: <http://physicsandwaves.pbworks.com>

Prosseguimos descrevendo os processos pelos quais a luz pode ser polarizada, mostrando figuras ilustrativas (Figura 5.8) e exemplificando com situações mais próximas da realidade dos alunos. Investimos um pouco mais de tempo nos polarizadores sintéticos, visto

que eles foram utilizados na construção do nosso estereoscópio e, por conta disso, já existia uma certa expectativa dos estudantes em entender como funcionavam. Explicamos o processo de fabricação dos filmes polarizadores (como e por que, parte das ondas são absorvidas); utilizamos polarizadores (retirados de monitores inutilizados) para mostrar o bloqueio da luz refletida no quadro branco e explicamos o processo de polarização por reflexão. Mostramos como identificar os eixos de absorção e de transmissão de um polarizador.

Figura 5.8 – Imagem dos estudantes assistindo demonstrações dos processos de polarização. Polarizadores com eixos de polarização alinhados (a) paralelamente e (b) perpendicularmente.



Fonte: Arquivo próprio.

Demostramos a variação da intensidade da luz ao passar por dois polarizadores; como saber se a fonte de luz é polarizada e como identificar seu plano de polarização. Citamos também algumas de suas utilidades e aplicações.

Descrevemos como a polarização da luz pode ser utilizada para a projeção de filmes 3D. Explicamos que, assim como na produção de imagens 3D estáticas, a produção de filmes também utiliza duas câmeras ou uma câmera com duas lentes objetivas para obter a mesma cena em ângulos diferentes. Posteriormente os filmes são editados e para serem exibidos

utiliza-se dois projetores que sobrepõem as duas imagens, em polarizações perpendiculares, em uma tela especial capaz de manter a polarização da luz. Por fim, os telespectadores devem usar óculos com lentes polarizadas de forma que cada olho veja somente uma das cenas obtendo assim a sensação de profundidade. Finalizamos pontuando as vantagens do sistema de polarização da luz em relação ao sistema anaglífico. Comentamos um pouco da história do cinema ressaltando seu início, decadência e renascimento ao utilizar a polarização da luz para lançar um novo formato de exibição 3D.

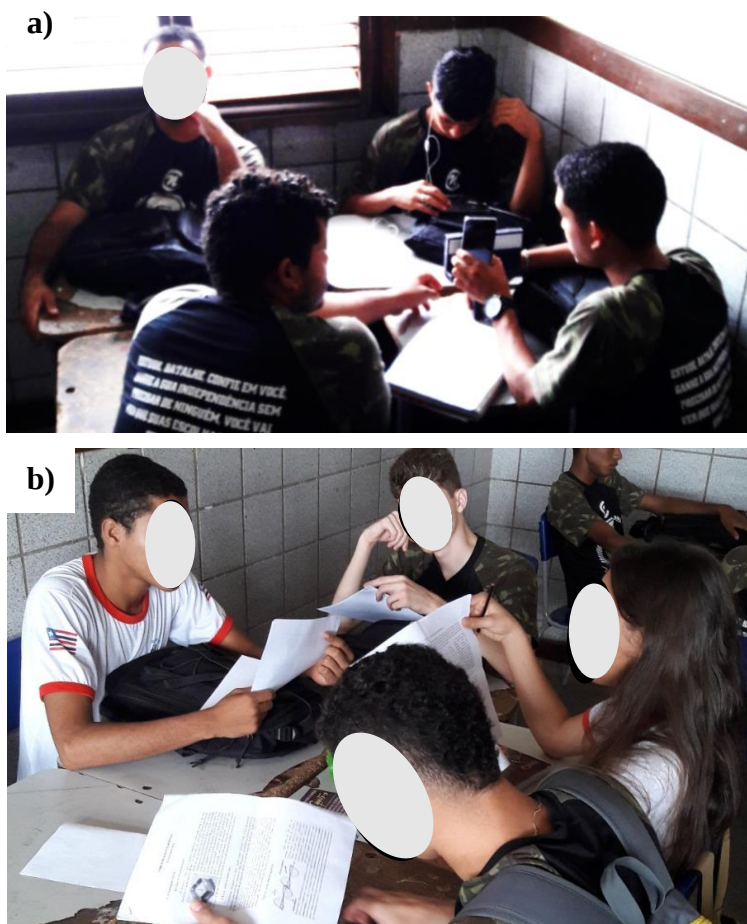
Trazer para a discussão as mudanças que a invenção dos polarizadores sintéticos provocou no campo das artes audiovisuais, por exemplo, contribuiu para que os estudantes pudessem entender de que forma o desenvolvimento científico e suas aplicações podem modificar a sociedade – o que propicia o desenvolvimento do espírito crítico e reflexivo, levando-os a reconhecer as mudanças que podem promover no meio em que vivem. Prosseguimos então para a próxima aula da etapa.

Aula 4

Essa aula serviu como uma espécie de tutorial. Informamos aos estudantes que a avaliação seria dividida em duas partes. Na primeira parte seria realizada uma oficina onde os alunos, divididos em grupos (Figura 5.9), deveriam produzir e exibir imagens 3D além de explicar o funcionamento do estereoscópio. Na segunda parte, os estudantes seriam submetidos a um questionário contendo situações-problemas que deveriam ser solucionados com base nas definições e conceitos estudados a respeito da polarização da luz.

Distribuímos um guia (“Produção de imagens” – capítulo 2 do Produto Educacional) que foi elaborado para servir de orientação à preparação de imagens estereoscópicas. Comentamos todos os passos e esclarecemos as dúvidas. Mostramos às equipes os pares de imagens por nós preparadas, explicamos os detalhes de tamanho, recortes e os cuidados quanto a impressão.

Figura 5.9 – Imagem dos alunos em equipes de estudo (a) e (b).



Fonte: Arquivo próprio.

A atividade desenvolvida nessa aula promoveu uma interação proveitosa entre os estudantes e o professor. Os alunos tiveram a oportunidade de expor suas dúvidas, compartilhar conhecimentos e demonstrar habilidades. O desenvolvimento do indivíduo é um processo que se constrói pelas interações que ele estabelece no contexto histórico e cultural do qual faz parte (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010).

Alguns alunos relataram ter experiência em edição de imagens e ofereceram ajuda aos demais, outros, habilidades em matemática, auxiliando os colegas nos cálculos da distância do objeto e o deslocamento lateral do celular entre as fotos. Além do mais, naquele momento, os alunos estavam deixando de ser apenas detentores de conhecimento e se transformando em atores do conhecimento. Finalizamos a aula definindo que no próximo encontro as equipes deveriam estar com suas imagens prontas e recomendamos, também, que estudassem sobre a polarização da luz, pois deveriam mostrar entendimento de como o fenômeno estava sendo utilizado para aquela finalidade.

Função de elaboração e compreensão conceitual

Aulas 5 e 6 – Realização da oficina

As aulas 5 e 6 fazem parte da última etapa da SE, denominada Função de elaboração e compreensão conceitual, na qual realizamos uma oficina para produção e projeção de imagens tridimensionais. Essa atividade pretendia proporcionar aos alunos a oportunidade de aprender sobre o assunto a partir da realização de uma tarefa para eles significativa, motivando-os a buscarem o entendimento dos conceitos envolvidos e favorecendo a troca de experiências com os colegas e com o professor. Os objetivos de aprendizagem foram: observar a relação entre os eixos de polarização de dois polarizadores e intensidade da luz transmitida e de que forma a luz polarizada é utilizada na produção de imagens tridimensionais.

Aproveitamos a primeira aula dessa etapa para orientar os estudantes quanto aos ajustes das imagens. Algumas equipes trouxeram as imagens sem recortá-las e sem identificar a posição (direita ou esquerda) de cada par estéreo. Fizemos os recortes de algumas e mostramos de que forma se identifica as posições de cada par de imagens. Além disso, demonstramos como deveriam ser fixadas e ajustadas no estereoscópio. Segundo Vygotsky (2001), é importante que o professor, na condição de parceiro mais capaz, demonstre, faça e realize tarefas, a fim de que o aprendiz, imitando-o, alcance um estágio de desenvolvimento que o permita desempenhá-las com autonomia.

Disponibilizamos um estereoscópio e alguns acessórios para auxiliar nos ajustes das imagens como fita adesiva, tesoura, marcadores e papel. Foram utilizados materiais de fácil aquisição e de simples manipulação no intuito de diminuir custos e, principalmente, mostrar que a atual tecnologia do cinema 3D pode ser entendida e reproduzida de forma simples, sem o auxílio de computação gráfica ou equipamentos sofisticados. Ao final das apresentações os alunos explicaram os conceitos físicos envolvidos na atividade realizada.

A seguir, temos os registros dessa etapa da SE em que os estudantes realizam a preparação das imagens, fazem os ajustes no estereoscópio (Figura 5.10) e exibem as imagens (Figura 5.11 à Figura 5.13).

Figura 5.10 – Imagem de estudantes fazendo ajustes no esteresoscópio.



Fonte: Arquivo próprio.

Figura 5.11 – Par de imagens estereoscópicas produzida por alunos (boneco).



Fonte: Arquivo próprio.

Figura 5.12 – Par de imagens estereoscópicas produzida por alunos (flores).



Fonte: Arquivo próprio.

Figura 5.13 – Par de imagens estereoscópicas produzida por alunos (pessoa).



Fonte: Arquivo próprio.

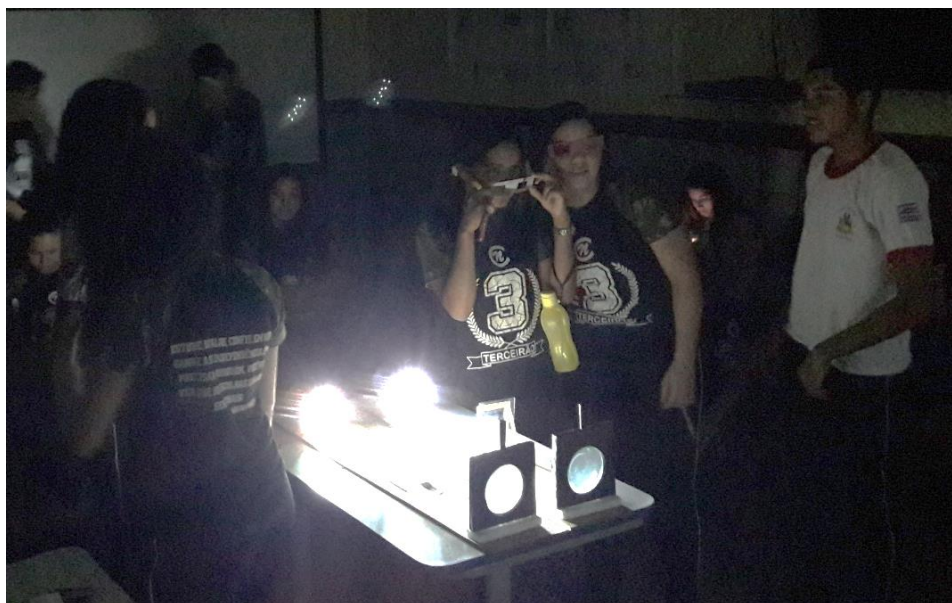
Após os recortes das imagens e a identificação dos lados de cada par estéreo, os grupos utilizaram o estereoscópio para fazer a exibição das imagens (Figura 5.14 e Figura 5.15).

Figura 5.14 – Alunos exibindo imagens tridimensionais (a).



Fonte: Arquivo próprio.

Figura 5.15 – Alunos visualizando imagens tridimensionais (b).



Fonte: Arquivo próprio.

A seguir, na Figura 5.16, temos as imagens de cada grupo projetada na tela.

Figura 5.16 – Imagens das projeções feitas pelos estudantes.



Fonte: Arquivo próprio.

Os alunos mostraram-se ansiosos por ver o resultado de seus trabalhos. Estavam a todo tempo disputando os óculos para visualizar suas imagens e as dos colegas. Essa animação em torno da atividade reafirma que as aulas práticas, de fato, têm a capacidade de motivar e envolver os alunos em uma situação de aprendizagem.

Acreditamos que, se, além de tudo, o aluno tiver a oportunidade de participar da construção e/ou montagem do experimento, o seu entusiasmo poderá ser ainda maior uma vez que ele passa a manusear algo que ele próprio criou (ou ajudou a criar) e, por tanto, deseja que o resultado seja positivo.

5.2 A análise dos dados

Nesta seção apresentamos os dados coletados a partir dos instrumentos descritos na seção 6.2 bem como a análise dos resultados. Primeiramente apresentamos os dados obtidos com a aplicação do questionário de levantamento inicial. A seguir, expomos os resultados, os materiais produzidos pelos estudantes e discutimos informações relevantes registradas durante a realização da oficina. Por fim, apresentamos o desempenho dos estudantes na prova escrita.

Análise do questionário de levantamento inicial

O questionário de levantamento inicial, como já mencionamos anteriormente, foi aplicado uma semana antes do início do desenvolvimento da SE a fim de constatar se a tecnologia 3D, de fato, fazia parte da vivência dos estudantes.

32 estudantes participaram do levantamento. A primeira pergunta buscava detectar a familiaridade dos estudantes com a tecnologia 3D. Um total de 27 estudantes firmam já ter assistido exibições no formato. O local apontado como de maior contato foi o cinema, apenas 1 aluno informou ter assistido uma exibição 3D em um parque de diversões. A sensação de realidade, a riqueza de detalhes e a ausência do efeito sem o uso dos óculos foram citados como os aspectos que mais despertam curiosidade. Um total de 26 estudantes não souberam indicar a diferença fundamental entre uma imagem 2D e uma imagem 3D. Somente 4 alunos associaram imagens tridimensionais a uma ilusão de ótica provocada pela percepção de profundidade que a imagem proporciona, sensação que inexiste em imagens 2D.

A terceira pergunta objetivava averiguar como os estudantes classificariam as imagens que nosso sistema de visão reproduz naturalmente. 11 entrevistados afirmaram que o sistema de visão do homem é 2D; 8 responderam que não sabiam e 13 responderam corretamente que nosso sistema de visão é 3D. A quarta pergunta buscou evidenciar se os alunos já tinham lido, pesquisado ou ouvido falar a respeito de como eram produzidas imagens 3D. Todos responderam nunca ter recebido nem buscado informações a respeito.

A quinta e última pergunta pretendia chamar a atenção dos alunos quanto a função dos óculos 3D. Perguntamos por que sem o auxílio deles enxergamos tudo embaçado e qual seria sua função. Evidentemente, não estávamos em busca de respostas plenamente corretas. A intenção era tão somente constatar se obteríamos repostas que relacionassem as lentes dos óculos a alguma propriedade das imagens refletidas na tela. Somente 4 alunos responderam apontando essa relação, 18 responderam não saber e 10 responderam que os óculos servem para melhorar a imagem, fazer a imagem ficar mais próxima ou simplesmente para enxergar em 3D.

O resultado do questionário inicial mostrou que a tecnologia 3D está presente nas relações estabelecidas no convívio social dos estudantes. Porém, seus princípios científicos eram praticamente desconhecidos, constituindo-se num tema promissor a ser trabalhado como pano de fundo para o estudo da polarização da luz, fenômeno que é a base da tecnologia 3D empregada nos cinemas. A partir dos resultados obtidos elaboramos uma sequência de ensino baseada na estratégia de Situação de Estudo que, em um nível de abordagem compatível com

as necessidades dos estudantes, pudesse promover o entendimento do fenômeno no contexto proposto.

Análise da atividade prática – Oficina

A turma foi dividida em 7 grupos. Deixamos os estudantes livres para definirem a composição dos grupos, apenas estabelecemos a quantidade máxima de 5 alunos por grupo. Já tínhamos combinado, no encontro anterior, que cada equipe deveria preparar até duas imagens tridimensionais para serem exibidas. Para cada grupo entregamos duas transparências para impressão das imagens. A Tabela 5.1 abaixo mostra a composição dos grupos, onde cada aluno está representado pela letra A seguido de um número de identificação individual.

Tabela 5.1 – Distribuição dos alunos por grupos.

GRUPO	ALUNOS
1	A3, A2, A12, A21, A35
2	A7, A9, A11, A30, A34
3	A1, A20, A23, A27, A31
4	A4, A10, A22, A2, A28, A29
5	A6, A13, A19, A24, A33
6	A8, A14, A25, A32
7	A5, A15, A16, A17, A18

Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Iniciada a aula, constatamos que somente 4 grupos, grupos 2, 5, 6 e 7, tinham preparado as imagens. Os demais grupos atribuíram o não cumprimento da atividade a dificuldades com a impressão das imagens. Argumentaram não ter encontrado locais que fizessem impressão em transparências. Entretanto, identificamos que esses grupos tinham deixado para imprimir as fotos às vésperas do dia da apresentação (muitos estudantes mantinham esse costume desde a 1ª série), não encontraram na localidade em que residiam a oferta do serviço e não tiveram tempo hábil para buscá-lo em regiões vizinhas. De fato, apesar da escola estar localizada em São Luís, capital do estado do Maranhão, a maioria dos estudantes residiam em uma região rural próxima que pertence ao município vizinho, São José de Ribamar, localidade com poucas ofertas desse tipo de serviços, mas que fica próxima de regiões urbanizadas. Se as equipes tivessem se planejado, como fizeram as outras, esse

problema teria sido superado sem maiores transtornos. Esse tipo de atitude não deveria ocorrer numa situação ideal de aprendizagem. Todavia, fazem parte da rotina diária do trabalho de um professor e devem ser contornados de acordo com as condições e limitações da realidade escolar.

Por conhecer a dinâmica da escola e termos ciência das atividades que outras disciplinas desenvolviam naquele período, decidimos não buscar um horário extra e nem estender o prazo para que as equipes pudessem preparar suas imagens, pois essa atitude, apesar de recorrente em trabalhos de pesquisas, não é algo facilmente executável em uma situação concreta de ensino. Além do mais, ao nosso ver, contornar problemas utilizando estratégias excepcionais aumenta o risco de “contaminação” dos resultados por alterar substancialmente as condições do ambiente e o estado de ânimo dos sujeitos envolvidos na pesquisa. Avaliamos que poderíamos dar prosseguimento às etapas da SE, de forma que a apresentação das equipes que estavam prontas, a discussão em torno da atividade realizada e a colaboração do professor, seria suficiente para promover o entendimento teórico-prático do fenômeno.

Os grupos imprimiram as imagens, mas não fizeram os recortes, talvez por receio de cortar errado ou simplesmente por descuido. Instruímos cada equipe quanto ao corte, fixação e ajustes das imagens no estereoscópio.

É importante que o professor, na condição de mediador e parceiro mais capaz, oriente os estudantes quanto a realização das tarefas e quanto ao aprendizado dos conceitos científicos, pois segundo Vigotski, “o que a criança é capaz de fazer hoje em colaboração conseguirá fazer amanhã sozinha”(VYGOTSKY, 2001, p. 331). A seguir transcreveremos as falas do diálogo estabelecido durante as apresentações dos grupos (registradas em áudio). Os estudantes foram identificados pelo timbre de voz, já que conhecíamos a todos por trabalharmos com eles desde a 1ª série do ensino médio. Os códigos grifados em azul indicam os comentários dos alunos não pertencentes ao grupo que se apresentava no momento.

O **grupo 2** foi o primeiro a exibir suas imagens.

A11: “Professor, temos duas imagens, mas ainda não recortamos.”

Professor: “Então recortem agora, vou auxiliar vocês.”

A34: “Terminamos. Agora vamos projetar?”

Professor: “Vocês sabem qual a imagem do lado esquerdo e qual a do lado direito?”

A34: “Eita! Não marcamos.”

Professor: “É só colocar uma sobre a outra alinhando as bordas que dá pra identificar”.

A11: “Tá certo professor.”

Terminado os cortes e ajustes, os alunos começaram a visualizar a imagem projetada na tela.

A11: “Olha... ficou legal!”

Professor: “Vocês conseguem perceber que alguns objetos parecem estar mais à frente da tela?”

A6: “Sim professor.”

A33: “Parece uma imagem normal... não sei...”

Aluno A30: “O efeito existe, mas está bem de leve.”

Professor: “Talvez seja por conta de alguma falha na hora de fazer as fotos ou de erros no cálculo das distâncias.” “Além disso, as cores presentes nessa imagem são pouco contrastantes, o que piora a qualidade da projeção e da percepção do efeito tridimensional.”

A24: “mas está bom professor!”

O **grupo 5** se voluntariou para ser o próximo. (A animação trazida pela primeira apresentação encorajou as demais)

A24: “Eu já posso botar minha imagem aí?” (Perguntou referindo-se ao estereoscópio)

Professor: “Já! Vamos lá!”

A24: “Professor, o senhor tem que direcionar a gente... direita e esquerda...” (Falou referindo-se à colocação do par de fotos no estereoscópio).

Professor: “A foto do lado direito você já identificou?”

A24: “Sim. Olha aqui ó!”

Professor: “Vocês recortaram as fotos deixando pouca sobra para colocá-las no suporte.” (Mesmo assim conseguimos fixá-las).

A19: “Foi tu que cortou errado.” (Falou dirigindo-se ao colega de equipe).

A24: “Tem que botar de cabeça para baixo é?”

Professor: “Sim.”

A6: “As duas?”

Professor: “Tem que ser as duas, lembra que já foi explicado que as duas imagens são projetadas uma sobre a outra?” “Se invertermos só uma, a imagem na tela ficará indefinida.”

Professor: “Agora temos que focalizar as imagens.” (Os alunos A6, A19 e A24 começam a movimentar os suportes das imagens)

A19: “É bem aqui ó!”

A6: “Um pouco mais pra lá.”

A14: “Não está bom não!” (Disse após visualizar a imagem com os óculos 3D)

A8: “Dar pra ver que tem duas imagens...” (Disse olhando para a imagem sem os óculos).

A19: “Mas tem que botar os óculos...”

O par de imagem preparada pela equipe, apesar de apresentar cores fortes e contrastantes, não teve, a princípio, um bom resultado quanto à percepção do efeito tridimensional. Detectamos que as fotos não tinham o mesmo tamanho e apontamos o que poderia ter ocasionado essa falha. Explicamos que a pessoa que tirou as fotos talvez tenha aproximado ou afastado a câmera do celular no momento do segundo clique, ou então, a pessoa que fez a impressão deixou as fotos com tamanhos diferentes durante a edição. Nesses casos, é possível tirar essas diferenças nos ajustes das lupas ou do suporte de fixação das imagens, porém se torna mais trabalhoso, requerendo mais tempo.

Depois de algumas tentativas conseguimos alinhar as imagens e a sensação de profundidade foi notável.

A8: “Agora ficou qualidade... ficou bacana!”

A14: “Éguas!”

A24: “O senhor gostou professor?”

Professor: “Gostei... quero só ver qual vai ficar com o efeito 3D mais perceptível.”

A8: “A nossa! A nossa vai ficar melhor!”

Professor: “Então vamos ver?” (Nesse momento o aluno se prepara para apresentar a imagem de seu grupo)

O **grupo 6** foi o próximo a se apresentar.

Professor: “Tentem ajustar as imagens sozinhos!” (Os alunos começaram a fazer os ajustes)

Professor: “O par de imagens de vocês não têm o mesmo tamanho, tirem a diferença aproximando ou afastando uma delas da lupa.”

O grupo 6, diferentemente das demais, fez a imagem de um de seus componentes, A32. Olhar a foto de um colega em outro contexto e com aparência totalmente diferente, provocou muitos sorrisos e descontração na turma.

Após alguns minutos a imagem parecia estar pronta para visualizar.

A8: “Ficou *rochedo*!” (jargão local que significa bom, legal...)

A10: “Deixa eu ver também!” “... Dá pra ver que ele está na frente das coisas.”

A32: “A nossa ficou melhor por que fotografou o mais bonito da sala.” (Fala do aluno fotografado)

A25: “Assombrou a sala agora!” (Muitos risos).

Professor: “Está bom mesmo!” (Foi bem perceptível o efeito 3D)

A8: “Está melhor que o de vocês.” (Se referindo ao grupo 5)

A19: “Ficou bom mesmo ó!”

A24: “Parece que esse bicho feio vai pular em cima da gente.”

“É 10 hein professor!”. Diziam ou integrantes da equipe devido ao sucesso da apresentação.

Aproveitamos para reforçar a importância de entender os fenômenos físicos que estavam por trás da exibição das imagens. Relembramos que o objetivo principal das atividades desenvolvidas era compreender como ocorre a polarização da luz e que os grupos ainda deveriam demonstrar esse entendimento. Em meio à euforia da turma solicitei que a próxima equipe se apresentasse.

O **Grupo 7** iniciou os ajustes para sua apresentação.

A15: “Eu já identifiquei o lado de cada imagem.”

A5: “Então vamos logo botando no lugar.”

Professor: “Tomem cuidado pra deixar cada imagem no braço correto do estereoscópio.”

Professor: “Onde vocês fizeram essas imagens?”

A15: “Em casa mesmo... são meus esses bonecos.”

Professor: “Hum... Tá certo.”

A24: “Está bom assim professor?” (Essa aluna era de outro grupo, mas estava auxiliando a equipe)

A16: “Acho que já dar pra olhar com os óculos.”

A17: “Vamos... Vamos...”

A11: “Dar pra ver bem a imagem, mas o 3D parece que não...”

A5: “Tá 3D sim! Bem legal...”

A aula estava terminando e deveríamos realizar a discussão do fenômeno da polarização da luz aplicada a produção de imagens 3D. Solicitamos que os estudantes parassem de manusear o estereoscópio e que atentassem para as explicações.

Professor: “Agora quero ver o que vocês sabem me dizer a respeito da polarização da luz nessa demonstração que vocês acabaram de realizar!”

Dois alunos, A19 e A24, do grupo 5 se voluntariaram para explicar. A24 utilizou acessórios feitos de papel para mostrar o eixo de polarização dos polarizadores e como a luz se propagava ao atravessá-los. Analisando os registros em áudios dessa etapa, percebemos uma evolução quanto ao uso da linguagem e definições específicas da área de conhecimento em estudo.

A24: “Se o polarizador tiver assim (A aluna mostra o acessório indicando o eixo de polarização na direção vertical), a onda vai passar na vertical. “Se ele (Referindo-se ao polarizador) tiver na horizontal, a onda passará nessa”. (Completa utilizando a mão para indicar a direção horizontal de propagação das ondas). “E impede que as ondas verticais passem.” (Acrescentou A19).

Professor: “Certo.” “Tem que ficar bem claro que as ondas eletromagnéticas que vibram em direções diferentes do eixo de transmissão do polarizador, não passam, são absorvidas.”

A24: “Exatamente... ela (A onda) vai ficar absorvida aqui.” (Aponta para o acessório).

Aluno A19: “Eu entendi assim professor: de um lado é horizontal e do outro lado é vertical”. (Comenta mostrando as lupas do estereoscópio recobertas com filmes polarizadores).

Professor: “Exatamente.”

A24: “Aí o cérebro depois consegue juntar as duas imagens.”

Professor: “Muito bem!”

A24: “As ondas não polarizadas vêm todas aleatórias né professor?”

Professor: “Sim. Os campos elétricos e magnéticos vibram de forma totalmente aleatória.”

A10, componente do grupo 4, que não trouxe imagem para visualizar, diz: “Eu quero explicar ali (Aponta para o estereoscópio), não quero explicar assim (Referindo-se aos alunos que tinham acabado de explicar usando outros acessórios).

Professor: “Fique à vontade!” (Nesse momento chamamos a atenção da turma para a explicação da colega).

A10: “Eu sei que existem vários íons que estão agitados (Aponta para a luz da lanterna).

“... formando ondas que estão em várias direções, e essas ondas batendo aqui (Mostra o filme polaroide das lupas) são polarizadas...”

“... Aí elas passam numa certa direção.”

“Batendo aqui (aponta para as lupas) a lupa consegue inverter a foto e vai refletir lá (Aponta para a tela de projeção) uma certa onda assim (Faz o desenho de uma onda oscilando na

direção vertical) e nesse outro lado assim (Faz desenho de uma onda oscilando na direção horizontal) e as imagens para os nossos olhos têm direções diferentes”.

Professor: “Então cada olho enxerga as duas imagens?”

A10: “Cada olho enxerga uma delas.” (Uma das imagens)

Professor: “Os polarizadores que estão sobre as lupas têm seus eixos de polarização dispostos em direções perpendiculares.”

A10: “E vai passar aqui (Aponta para uma das lupas) as ondas só na direção vertical e aqui (Aponta para a outra lupa) só as na direção horizontal.”

Professor: “Isso.” “Exatamente!”

A24: “E se elas caminharem na mesma direção”? (Referindo-se à direção de polarização da luz transmitida em cada lupa).

Professor: “As duas imagens são refletidas com o mesmo plano de polarização, quando você utilizar os óculos 3D, em uma das lentes você não enxergará nada e na outra enxergará as duas imagens ao mesmo tempo, o efeito tridimensional não ocorrerá.”

Professor: “Atenção turma! Resumindo...”

“Para esse sistema de projeção tridimensional funcionar, que é basicamente o mesmo do cinema 3D, devemos fazer com que as imagens do par estéreo sejam projetadas com planos de polarização perpendiculares entre si. Depois utilizar óculos com lentes polarizadas de tal forma que cada olho perceba somente uma das imagens.” “Não se pode deixar os dois olhos enxergar as duas imagens ao mesmo tempo, por isso que olhando para as imagens sem os óculos vemos tudo borrado.”

A10: “A tá!”

A24: “Exatamente.”

Acabamos investindo nas projeções das imagens mais tempo do que tínhamos programado. Nossa intenção era utilizar dois estereoscópios para dar celeridade as apresentações. No entanto, durante o transporte dos materiais, acabamos esquecendo uma das lanternas. A utilização de apenas um dispositivo retardou a finalização das apresentações das imagens (restando pouco tempo para a discussão) e causou, em alguns momentos, uma certa dispersão dos alunos que não faziam, no momento, uso do equipamento. Portanto, dependendo da quantidade de alunos e do perfil comportamental da turma, se faz necessário que o professor disponha de pelo menos dois estereoscópios e que busque formas de manter os alunos sempre ocupados.

O tempo já tinha se esvaído, encerramos a aula e acertamos de continuar a averiguação dos conhecimentos na semana seguinte com a aplicação da prova escrita bimestral.

A projeção das imagens causou animação na turma. Foi perceptível o entusiasmo dos estudantes ao verem o resultado de seus trabalhos. A maioria fez imagens de objetos pessoais e de uso doméstico. Uma das equipes fez a imagem estereoscópica de um de seus integrantes. Algumas expressões e comentários feitos durante a atividade prática traduzem o clima de competição e satisfação dos estudantes: “A nossa ficou melhor”; “Agora sim ficou de mais qualidade”; “Éguas”; “tá rochedo”. Essas frases revelam a motivação dos alunos em torno da realização da atividade proposta.

Para alguns, a motivação estava relacionada a objetivos extrínsecos (motivação intrínseca) como ser o melhor, fazer a melhor imagem, obter a maior nota ou algum outro tipo de reconhecimento. Para outros, a curiosidade e o desejo de entender os conteúdos relacionados a atividade prática foram os principais propulsores das ações desenvolvidas (motivação extrínseca). Conforme Boruchovitch e Bzunec (2009), o envolvimento em uma atividade por razões intrínsecas gera maior satisfação, facilitando a aprendizagem e o desempenho, entretanto, mesmo permanecendo instrumentais a aprendizagem e ao desempenho, os comportamentos extrinsecamente motivados, quando regulados de forma integrada, têm importância similar aos comportamentos intrinsecamente motivados”.

Ensinar sobre a polarização da luz em um contexto no qual os estudantes estavam inseridos fomentou a discussão do fenômeno. Acreditamos que a realização de qualquer experimento ou aplicação tecnológica, por mais simples ou complexa que seja, só poderá motivar os estudantes a aprender se estiverem relacionadas a situações concretas de suas experiências diárias as quais possam atribuir-lhes sentido. Quanto a apropriação dos conhecimentos, os alunos demonstraram um bom entendimento a respeito das características de uma fonte de luz não polarizada, do significado físico de polarizar a luz e das definições de eixo de polarização e de absorção.

Ficou evidente que os estudantes ainda não estavam habituados com as palavras e termos específicos da linguagem científica, vez ou outra utilizavam palavras de outros contextos para explicar determinados aspectos relacionados ao objeto de estudo como podemos constatar nas palavras sublinhadas nas transcrições destacadas a seguir:

“... a onda vai passar na vertical.” (Oscilar)

“... se elas caminharem na mesma direção.” (Vibrarem)

“... e essas ondas batendo aqui...” (Incidindo)

Contudo, a gesticulação e uso de acessórios, deixava claro a representação mental e as ideias que tinham sobre o assunto. Mesmo assim, percebemos o esforço e a evolução dos estudantes quanto a esse aspecto nas falas destacadas a seguir:

“A onda fica absorvida aqui.” (Referência a absorção das ondas pelo polarizador)

“... de um lado é horizontal e do outro lado é vertical.” (Referência aos eixos de polarização)

“As ondas não polarizadas vêm aleatórias...” (Referência a uma fonte de luz não polarizada)

Essa dificuldade dos estudantes em utilizar palavras específicas da área de estudo para expressar o pensamento não indica, necessariamente, que não houve aprendizado, mas que os alunos ainda não desenvolveram completamente em suas estruturas mentais as funções psicológicas capazes de fazer a associação entre essas novas palavras (ou palavras conhecidas com outros significados) e o objeto ou fato concreto que elas representam. Essa habilidade será alcançada à medida que as palavras e os conceitos, até então recém apresentados, se tornarem de uso cada vez mais frequente. Segundo Vigotski, aprendizado e desenvolvimento, apesar de estarem articulados entre si, são processos diferentes. Segundo o autor, existe uma relação dialética em que a aprendizagem influencia o desenvolvimento, assim como o desenvolvimento influencia a aprendizagem.

[...] a aprendizagem não é, em si mesma, desenvolvimento, mas uma correta organização da aprendizagem da criança conduz ao desenvolvimento mental, ativa todo um grupo de processos de desenvolvimento, e esta ativação não poderia produzir-se sem a aprendizagem. Por isso, a aprendizagem é um momento intrinsecamente necessário e universal para que se desenvolvam na criança essas características humanas não-naturais, mas formadas historicamente (VYGOTSKY, 2001, p. 115).

Por tanto, o papel do professor enquanto mediador do conhecimento, é organizar e orientar os conteúdos a fim de facilitar a aprendizagem que, por sua vez, levará o sujeito ao desenvolvimento das funções psicológicas superiores (memória, atenção, pensamento, consciência).

Análise da prova escrita

A prova escrita compôs, juntamente com as atividades da oficina, a última etapa da SE e foi realizada uma semana depois do encontro anterior seguindo o cronograma das avaliações bimestrais da escola. Elaboramos 7 questões subjetivas a fim de investigar a compreensão dos estudantes quanto aos conceitos estudados e quanto a capacidade de utilizarem esses conceitos na solução de outras situações-problemas. Os critérios definidos e adotados nesse trabalho para categorizar as respostas dos alunos estão apresentados na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 – Quadro de critérios de classificação das respostas do teste avaliativo.

Categorias	Crítérios de classificação
Resposta Correta (RC)	Apresenta conceitos e/ou representações que respondem adequadamente o problema proposto.
Resposta Parcialmente Correta (RPC)	Apresenta o conceito central relacionado a solução do problema, porém não indica corretamente as proposições necessárias ao pleno entendimento da situação apresentada.
Resposta Errada (RE)	Demonstra não possuir conhecimento sobre o assunto ou a não compreensão do enunciado da questão, apresentando uma resposta completamente alheia à situação proposta.
Branco (B)	Deixou o questionamento sem resposta.

Fonte: Autoria própria.

A primeira questão buscou saber se os estudantes eram capazes de definir o conceito de polarização da luz fazendo uso adequado da linguagem escrita e dos termos científicos específicos da área de estudo. De acordo com (GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012), nessa etapa da SE espera-se que o estudante comece a dominar uma nova linguagem, em que terá uma compreensão conceitual do assunto abordado. A segunda questão buscou averiguar o entendimento dos estudantes em relação a utilização do fenômeno da polarização da luz na concepção de imagens ou filmes 3D. De acordo com a dinâmica da SE, “outro aspecto a destacar na função da elaboração e compreensão conceitual é a retomada das questões iniciais apresentadas na problematização, pois há a finalidade de se obter uma compreensão conceitual dessas”(GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012, p. 14).

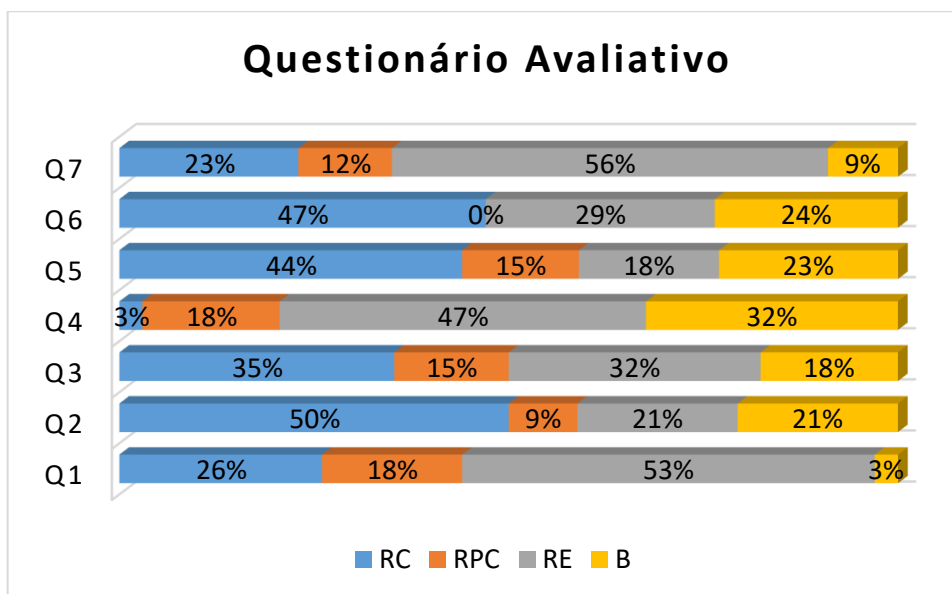
Nesse quesito, optamos pela utilização de formas e desenhos para auxiliar na demonstração do conhecimento adquirido pelos estudantes acerca do problema proposto.

A terceira questão ilustrou uma situação prática onde os estudantes deveriam utilizar os conceitos estudados para explicá-la. A questão objetivou averiguar se estudantes eram capazes de explicar a diminuição ou aumento da intensidade da luz (de uma fonte de luz polarizada) ao atravessar um polarizador em função da posição relativa de seus eixos de polarização. A quarta pergunta buscou evidenciar os conhecimentos dos estudantes acerca dos processos de polarização da luz, onde foram indicados os quatro processos e solicitado que o aluno comentasse pelo menos dois. A quinta questão solicitou que os estudantes indicassem quais processos de polarização estavam presentes na prática dos fotógrafos de utilizarem lentes polarizadoras para melhorar a qualidade das fotografias, pois “a partir da formação de um pensamento conceitual, o estudantes poderão ter condições de compreender outras situações, para além daquelas que lhe foram apresentadas durante o desenvolvimento da Situação de Estudo”(GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012, p. 14).

A sexta questão abordou os mesmos conceitos da terceira: a relação entre os eixos de polarização e a intensidade da luz transmitida por dois polarizadores. Solicitava que o aluno fizesse uma linha reta indicando como deveria estar orientado o eixo de polarização de um polaroide colocado à frente do feixe de luz de um laser para que a luz fosse bloqueada e não bloqueada. A intenção era averiguar se os estudantes conseguiriam dar respostas equivalentes a um problema apresentado de duas formas diferentes.

A sétima e última questão faz referência direta ao problema discutido no desenvolvimento da SE e utiliza o contexto para apresentar um problema hipotético que os alunos serão capazes de resolver se o conceito de polarização da luz e os mecanismos pelos quais o fenômeno é empregado na exibição de filmes 3D estiverem perfeitamente entendidos. Os estudantes são indagados sobre o que ocorreria se uma pessoa utilizasse óculos de sol (com lentes polarizadas em um único plano) para assistir a um filme 3D no cinema. Apresentamos no Gráfico 5.1 o desempenho da turma na prova escrita em termos percentuais.

Gráfico 5.1 – Desempenho dos estudantes na avaliação individual subjetiva.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

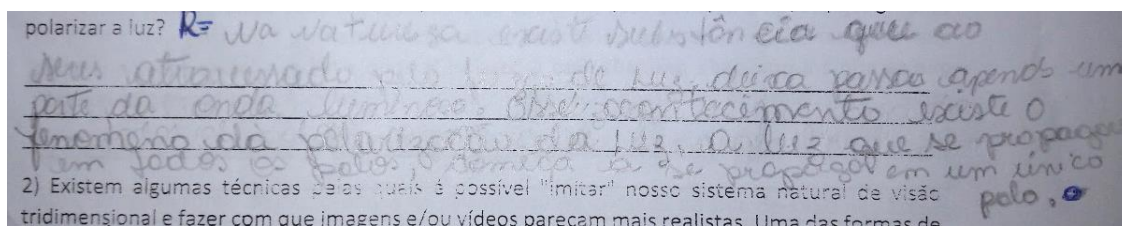
Questão 1

Todos os 34 estudantes da turma participaram da prova. Um total de 9 estudantes conseguiram apresentar o conceito de polarização da luz de forma clara; 6 apresentaram o conceito parcialmente correto; 18 deram respostas distantes do conceito científico e 1 deixou de responder. Consideramos importantes as respostas parcialmente corretas, visto que indicam um entendimento introdutório do conceito abordado que poderá ser aperfeiçoado à medida que os estudantes se deparem com outras situações nas quais estejam presentes. Assim, tomamos a soma do percentual de respostas corretas com o percentual de respostas parcialmente para definir o índice de desempenho dos estudantes em cada questão. Dessa forma, 15 estudantes, 44% da turma, apresentaram repostas que indicam compreensão do conceito que a questão aborda. A seguir, destacamos as respostas que selecionamos de alguns estudantes.

Algumas respostas à questão 1

A6: “Na natureza existe substância que ao ser atravessada pelo feixe de luz, deixa passar apenas uma parte da onda luminosa. Esse acontecimento existe o fenômeno da polarização da luz, a luz que se propagar em todos os polos começa a se propagar em único polo.”

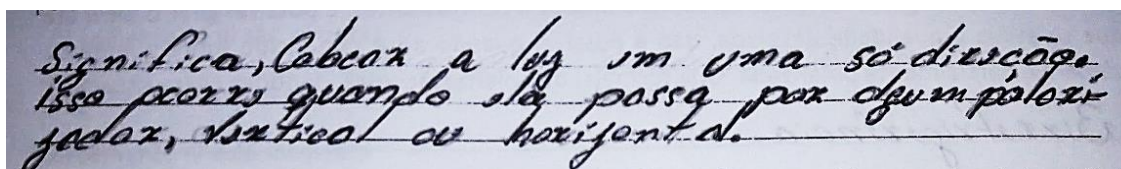
Figura 5.17 – Resposta de A6 à primeira questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A17: “Significa colocar a luz em uma só direção. Isso ocorre quando ela passa por algum polarizador vertical ou horizontal.”

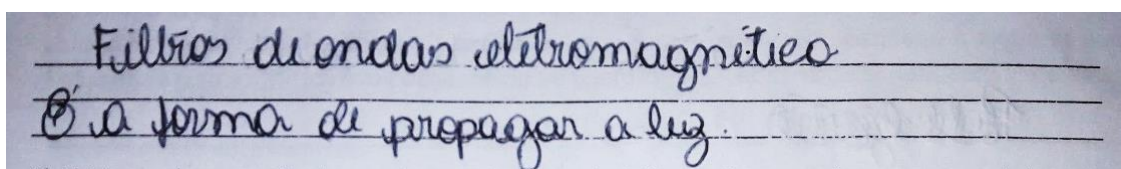
Figura 5.18 – Resposta de A17 à primeira questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A29: “Filtros de Ondas eletromagnéticas. É a forma de propagar a luz.”

Figura 5.19 – Resposta de A29 à primeira questão.



Fonte: Arquivo próprio.

Percebemos a dificuldade dos estudantes com relação a escrita. O vocabulário carente de palavras e termos específicos do campo de estudo e a consequente recorrência a palavras genéricas dificultou, em muitos casos, a expressão da ideia que os estudantes possuíam sobre a questão levantada. A6, por exemplo, fez uma boa conceituação, mas utilizou a palavra “polo” no lugar de plano. A17 escreveu “colocar a luz em uma só direção” em vez de propagar em um único plano de vibração. A29, por sua vez, demonstra não saber o conceito de polarização da luz ou não ter desenvolvido ainda a capacidade de manifestar o pensamento por meio da linguagem escrita. Mesmo assim, percebemos uma evolução conceitual por conta da inclusão de palavras específicas como por exemplo, feixe de luz, propagar e onda luminosa, em boa parte das repostas.

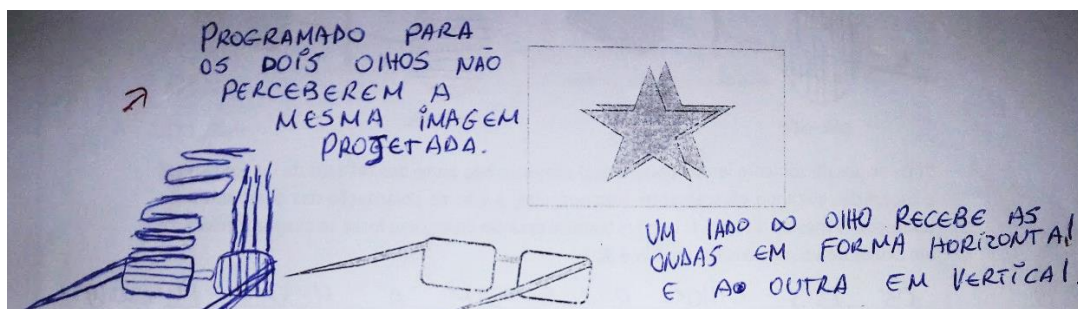
Questão 2

Em resposta a segunda questão, 17 estudantes demonstraram corretamente os planos de polarização da luz de cada imagem refletida na tela de projeção e como devem estar dispostos os eixos de polarização nas lentes dos óculos 3D; 3 apresentaram esquemas parcialmente corretos; 7 apresentaram representações incorretas e 7 deixaram de responder. Essa questão foi a que apresentou o melhor resultado. Acreditamos que o fato da questão recepcionar os principais conceitos e ideias diretamente relacionados ao tema da SE tenha contribuído para esse resultado. Acreditamos que utilização de desenhos como forma de apresentação das respostas também deve ter contribuído, visto que a representação por meio de figuras e/ou desenhos elimina o risco de se transmitir uma ideia diferente da que realmente se tem sobre determinado assunto. Um total de 20 alunos, que corresponde a 59% da turma, apresentou esquemas que indicam entendimento dos conceitos básicos que a questão aborda.

Algumas respostas à questão 2

A33:

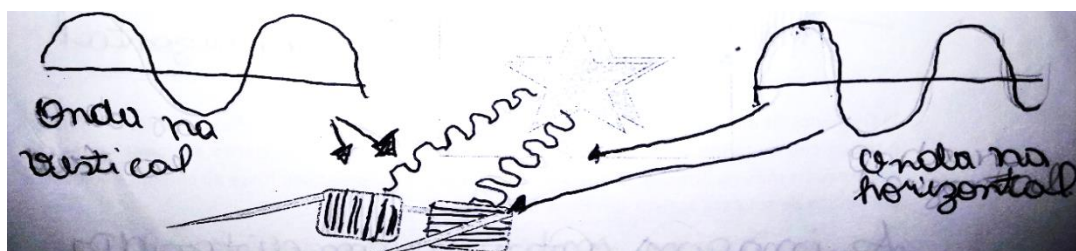
Figura 5.20 – Resposta de A33 à segunda questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A10:

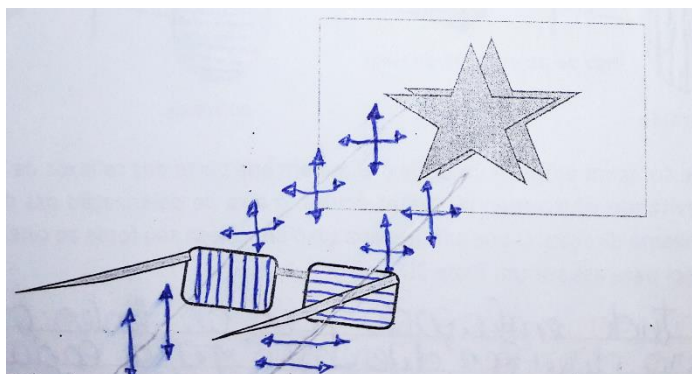
Figura 5.21 – Resposta de A10 à segunda questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A34:

Figura 5.22 – Resposta de A34 à segunda questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A10 e A33 desenharam linhas em forma de ondas para representar o plano de vibração da luz incidente em cada lado dos óculos. Os esquemas sugerem que a luz refletida na tela de projeção seja polarizada e indicam corretamente o eixo de polarização de cada lente dos óculos. Por outro lado, os desenhos não indicam que as ondas luminosas das duas imagens incidem nas duas lentes e que estas absorvem a luz de uma das imagens e transmite a luz da outra imagem. A34 utilizou linhas retas cruzadas para representar os planos de vibração da luz que incide nos óculos. Nesse esquema não é possível afirmar se, no entendimento do aluno, cada imagem é refletida despolarizada ou se cada par de linhas cruzadas representa a sobreposição das ondas luminosas de cada imagem.

Contudo, percebemos que os estudantes mostraram entendimento de que na técnica de projeção de filmes 3D por polarização é necessário que a luz das imagens refletidas na tela de projeção se propague em planos de vibração ortogonais e que as lentes dos óculos também devem estar com eixos de polarização dispostos nas mesmas orientações, de forma que cada lente só transmita uma das imagens. Os estudantes apresentaram respostas que nos levam a crer que os conceitos gerais abordados na SE foram compreendidos.

Questão 3

Na terceira questão, 12 estudantes apresentaram respostas científicas; 5 apresentaram respostas parcialmente corretas; 11 respostas incorretas e 6 deixaram de responder. As respostas indicam que houve compreensão da relação existente entre a intensidade da luz transmitida por um polarizador em função da variação angular entre o seu eixo de polarização

e os planos de polarização da luz incidente. Um total de 17, 50% da turma, demonstraram ter alcançado certo entendimento acerca dos conhecimentos que a questão recepciona.

Algumas respostas à questão 3

A15: “Isso ocorre porque as duas lentes dos óculos de sol são polarizadas no mesmo eixo, logo, só será possível enxergar bem, no ângulo no qual a polarização da imagem coincide com a polarização das lentes dos óculos.”

Figura 5.23 – Resposta de A15 à terceira questão.

Fonte: Arquivo próprio.

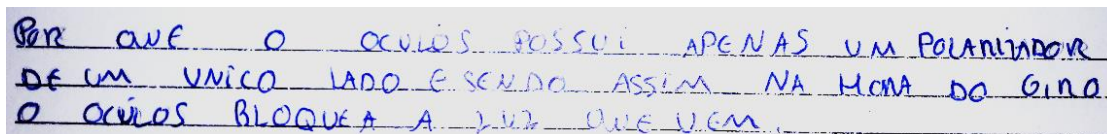
A10: “Porque o polarizador está em uma posição (vertical ou horizontal) e ao fazer o giro dos óculos os polarizadores dos óculos estão em direções oposta do polarizador do monitor. Os polarizadores se cruzam impedindo a passagem de ondas.”

Figura 5.24 – Resposta de A10 à terceira questão.

Fonte: Arquivo próprio.

A19: “Porque os óculos possuem apenas um polarizador de um único lado. Sendo assim, na hora do giro os óculos bloqueiam a luz que vem.”

Figura 5.25 – Resposta de A19 à terceira questão.

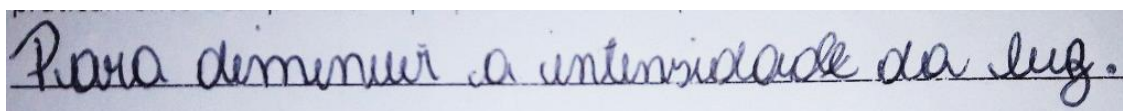


Por que o óculos possui apenas um polarizador de um único lado e sendo assim na hora do giro o óculos bloqueia a luz que vem.

Fonte: Arquivo próprio.

A29:

Figura 5.26 – Resposta de A29 à terceira questão.



Para diminuir a intensidade da luz.

Fonte: Arquivo próprio.

A15 demonstrou um bom domínio conceitual empregando as palavras específicas apresentadas durante a intervenção didática. Em sua escrita utilizou a palavra eixo para designar a direção do plano de polarização das lentes dos óculos e a palavra ângulo para relacionar as direções dos planos de polarização luz incidente e dos óculos de sol.

A10 também utilizou bem a escrita e ainda reforçou sua explicação recorrendo a desenhos esquemáticos que deixaram claro a sua explicação para a situação levantada na questão. A19 demonstrou não ter alcançado ainda um bom desenvolvimento da linguagem escrita e não ter se apropriado das palavras específicas da área em estudo. Em sua exposição utilizou a palavra “lado” no lugar de eixo ou plano e o termo “a luz que vem” no lugar de a luz incidente. Também não indicou como deveriam estar orientados o plano de polarização da luz incidente e o eixo de polarização dos óculos para que houvesse o bloqueio da luz. Mesmo assim, considerando sua participação nas demais etapas da SE, principalmente na atividade prática, acreditamos que o aluno conseguiu compreender os princípios básicos envolvidos no problema proposto.

A resposta de A29 não apresenta qualquer relação com o problema proposto. Podemos deduzir que o aluno não alcançou um entendimento mínimo do fenômeno em estudo bem como dos conceitos a ele subjacentes ou que não tenha compreendido o problema proposto na questão.

Questão 4

Na quarta questão, somente 1 estudante apresentou resposta científica; 6 apresentaram respostas parcialmente corretas; 16 respostas incorretas e um total de 11 deixaram de responder. Somando os percentuais de respostas corretas e parcialmente corretas temos que somente 7 estudantes, 21% da turma, apresentaram repostas adequadas.

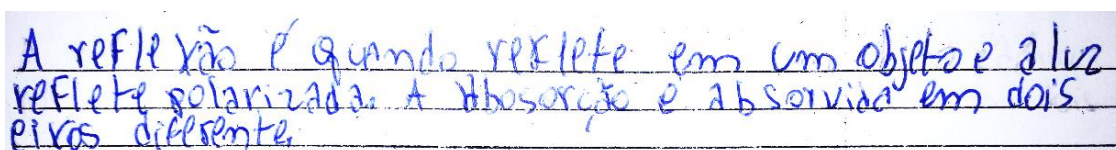
Acreditamos que o mau desempenho dos estudantes nessa questão pode ser explicado, dentre outras razões, pela dificuldade ou resistência que eles apresentavam em escrever. Esses dois fatores foram amplificados pelas condições a que os estudantes estavam submetidos, principalmente, nos momentos finais da avaliação: turma lotada, um dia de avaliação de três disciplinas e a aproximação do horário de término do turno. É provável que essa situação tenha contribuído para que os estudantes não tivessem mais o mesmo ânimo e disposição para responderem as questões que exigiam um pouco mais de tempo e esforço mental.

Também é importante considerar a dificuldade dos estudantes em compreender, interpretar e generalizar modelos teóricos. Dos processos de polarização abordados durante a aplicação da SE, dois deles, birrefringência e espalhamento, foram explicados por meio de exposição oral e com o auxílio de figuras. Os outros dois, absorção e reflexão, além da exposição oral, foram demonstradas com o auxílio de materiais educativos e experimentos práticos. A quase totalidade dos estudantes que conseguiram esboçar algum comentário pertinente o fez citando os processos de polarização por absorção e/ou reflexão, sugerindo que o desenvolvimento das atividades da SE proporcionou uma apropriação mais significativa desses dois processos.

Algumas respostas à questão 4

A16: “A reflexão é quando reflete em um objeto e a luz reflete polarizada. A absorção é absorvida em dois eixos diferentes.”

Figura 5.27 – Resposta de A16 à quarta questão.

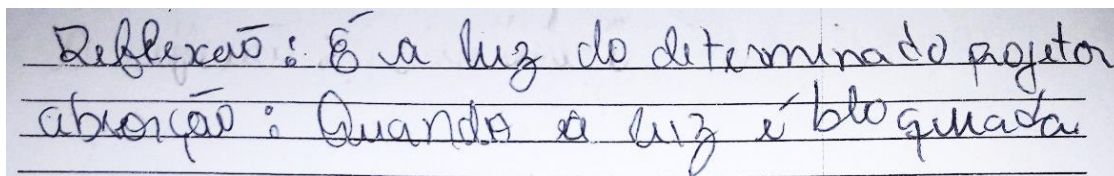


A reflexão é quando reflete em um objeto e a luz reflete polarizada. A absorção é absorvida em dois eixos diferentes.

Fonte: Arquivo próprio.

A12: “Reflexão: É a luz do determinado projetor. Absorção: Quando a luz é bloqueada.”

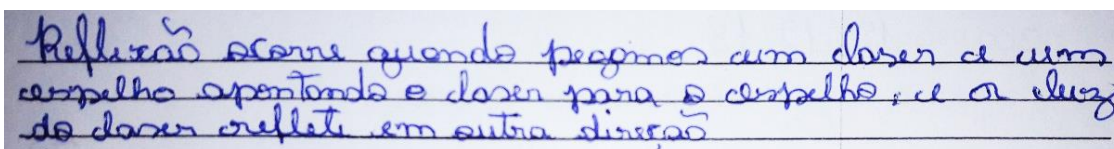
Figura 5.28 – Resposta de A12 à quarta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A5: “Reflexão ocorre quando pegamos um laser e um espelho apontando o laser para o espelho e a luz do laser reflete em outra direção.”

Figura 5.29 – Resposta de A5 à quarta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

Percebemos a dificuldade de A16 em sistematizar as ideias. A colocação indevida e a ausência de algumas palavras dificultaram a compreensão do texto. A12 apresentou uma resposta que, além de não recepcionar os aspectos que a questão aborda, não representa nenhum conceito ou ideia válida na disciplina em estudo. A5, por sua vez, apresentou um conceito existente em Física, porém não relacionado ao tema que a questão trata, confundiu o conceito de polarização por reflexão com o conceito de reflexão da luz.

Questão 5

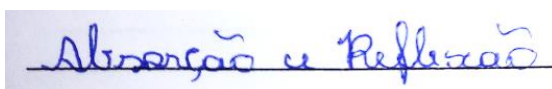
Na quinta questão, um total de 15 estudantes apresentaram respostas científicas indicando a polarização por reflexão (a luz refletida por algumas superfícies dielétricas é parcialmente polarizada) e a polarização por absorção (quando parte da luz é absorvida pelo filtro fixado a câmera fotográfica); 5 apresentaram respostas parcialmente corretas nas quais pelo menos um dos dois processos de polarização foram indicados; 6 apresentaram respostas incorretas e 8 deixaram de responder. Dessa forma, 20 estudantes, cerca de 59% da turma, conseguiram identificar pelo menos um dos processos de polarização presentes na situação

descrita. Segundo Vygotsky (2001), para que um conceito seja de fato internalizado é necessário que o aprendiz seja capaz de generaliza-lo.

Algumas respostas à questão 5

A5:

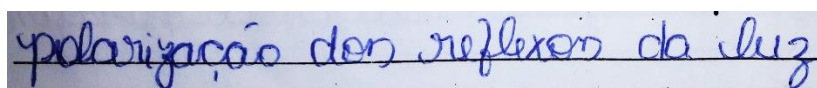
Figura 5.30 – Resposta de A5 à quinta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A34:

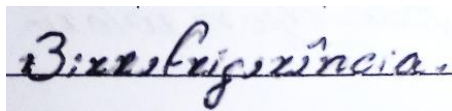
Figura 5.31 – Resposta de A34 à quinta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A17:

Figura 5.32 – Resposta de A1 à quinta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

Questão 6

Na sexta questão, 16 estudantes indicaram corretamente a orientação do eixo de polarização para cada caso representado; 10 apresentaram esquemas incorretos e 8 deixaram de responder. Essa questão não apresentou respostas parcialmente correta, visto que a forma de apresentação da resposta não dar margem a outras interpretações.

Respostas à questão 6

A24:

Figura 5.33 – Resposta de A24 à sexta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A15:

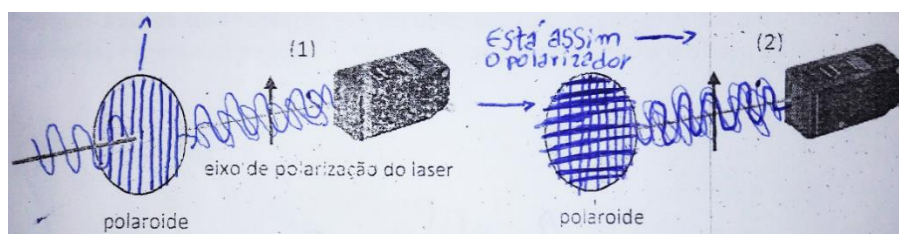
Figura 5.34 – Resposta de A15 à sexta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A16:

Figura 5.35 – Resposta de A16 à sexta questão.



Fonte: Arquivo próprio.

A maioria dos estudantes utilizou linhas paralelas (verticais e horizontais) para indicar o eixo de polarização em cada caso, sendo que a questão solicitava a indicação de apenas uma reta. Essa forma de apresentação pode sugerir, a princípio, que os estudantes tenham representado a direção de alinhamento das moléculas (condutores) que absorvem os campos elétricos oscilantes em direções paralelas. Entretanto, as atividades desenvolvidas durante a intervenção didática e, inclusive, as respostas dadas a segunda questão, nos faz crer que, pelo menos a maioria, estaria indicando o eixo de polarização.

A24 indicou corretamente como deve estar o eixo de polarização do polaroide nos casos considerados. A15 acrescentou a representação ondulatória da luz do laser indicando corretamente a propagação de uma única componente e a direção do plano de vibração. O

esquema apresentado por A16 demonstra que ele não percebeu, ou não entendeu, que a seta utilizada na figura indicava que a luz incidente nos polaroides provinha de uma fonte de luz (laser) polarizada na direção vertical – nota-se pelo desenho que o estudante fez representando as ondas de luz do laser se propagando em dois planos). Mesmo não considerando as especificidades da questão, o aluno descreveu corretamente o comportamento da luz comum ao atravessar a superfície de um polaroide (o esquema 1 indica que uma das componentes é bloqueada enquanto a outra é transmitida) e de dois polaroides dispostos com eixos de polarização perpendiculares (o esquema 2 indica o bloqueio, no segundo polaroide, da componente da onda que foi transmitida no primeiro).

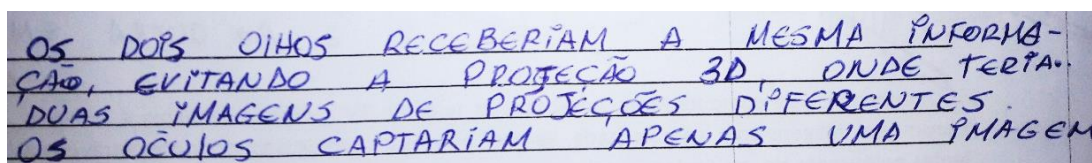
Questão 7

Na sétima questão, 8 estudantes conseguiram responder cientificamente o problema proposto; 4 apresentaram respostas parcialmente corretas; 19 apresentaram respostas incorretas e 3 deixaram de responder. O desempenho dos estudantes nessa questão foi muito próximo ao desempenho na primeira questão. Essa coincidência se mostra coerente, pois os estudantes que apresentaram corretamente o conceito de polarização da luz (Q1) também conseguiram entender o significado físico do fenômeno e seus mecanismos de atuação na concepção de imagens tridimensionais (Q7). Um total de 12 estudantes, 35% da turma, conseguiu demonstrar algum entendimento acerca dos conceitos necessários a solução do problema proposto.

Algumas respostas à questão 7

A33: “Os dois olhos receberiam a mesma informação, evitando a projeção 3D, onde teria duas imagens de projeções diferentes. Os óculos captariam apenas uma imagem.”

Figura 5.36 – Resposta de A33 à sétima questão.

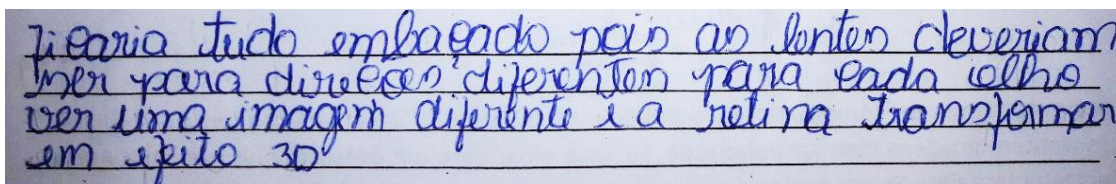


OS DOIS OLHOS RECEBERIAM A MESMA INFORMAÇÃO, EVITANDO A PROJEÇÃO 3D, ONDE TERIA DUAS IMAGENS DE PROJEÇÕES DIFERENTES. OS ÓCULOS CAPTARIAM APENAS UMA IMAGEM

Fonte: Arquivo próprio.

A34: “Ficaria tudo embaçado, pois as lentes deveriam ser para direções diferentes para cada olho ver uma imagem diferente e a retina transformar em efeito 3D.”

Figura 5.37 – Resposta de A34 à sétima questão.

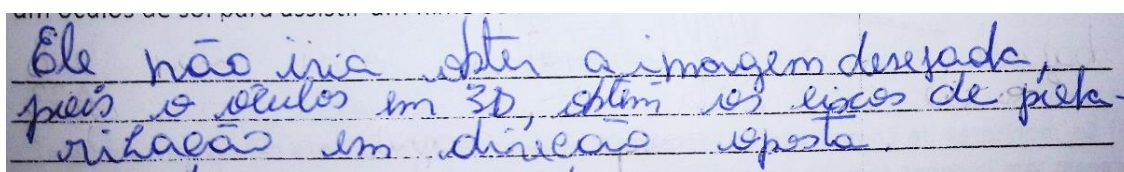


Ficaria tudo embaçado pois as lentes deveriam ser para direções diferentes para cada olho ver uma imagem diferente e a retina transformar em efeito 3D

Fonte: Arquivo próprio.

A22: “Ele não iria obter a imagem desejada, pois os óculos em 3D obtêm os eixos de polarização em direção oposta.”

Figura 5.38 – Resposta de A22 à sétima questão.



Ele não iria obter a imagem desejada, pois os óculos em 3D, obtêm os eixos de polarização em direção oposta.

Fonte: Arquivo próprio.

As repostas apresentadas por A33, A34 e A22, de forma geral, demonstram que houve o entendimento que a sensação de profundidade em filmes 3D se dá por conta do direcionamento de imagens diferentes para cada olho e que as lentes dos óculos, polarizadas em direções perpendiculares, fazem a separação das imagens sobrepostas na tela de projeção. Analisando de forma mais criteriosa cada resposta é possível identificar os diferentes níveis de argumentações apresentadas. A22 afirma que utilizando óculos de sol não é possível assistir um filme 3D porque ele não possui os eixos de polarização em direções opostas. A resposta está correta, mas o aluno não informa qual a relação entre os eixos de polarização dos óculos com o efeito tridimensional e nem como seria percebido o filme com o uso dos óculos de sol.

A33 apresenta argumentos mais específicos. Afirma que ao utilizar óculos de sol o espectador receberia a mesma informação (imagem) nos dois olhos e consequentemente não teria a percepção tridimensional das imagens, ou seja, relaciona a ortogonalidade dos eixos de polarização das lentes dos óculos com a separação das imagens refletidas na tela de projeção. Por outro lado, não percebe que, mesmo que os eixos de polarização das lentes dos óculos de

sol estejam dispostos na mesma direção, os olhos não receberiam a mesma imagem, pois as imagens refletidas pela tela de projeção estão polarizadas em direções opostas.

A34, utilizando outras palavras, se ampara nos mesmos argumentos de A33 e inclui a retina como um elemento importante no processo de percepção das imagens, um indicativo de que a discussão do tema desenvolvido em diálogo com as áreas do conhecimento que lhes são correlatas possibilitou o entendimento mais amplo e significativo, atendendo a um dos principais pressupostos epistemológicos de uma SE (SANGIOGO *et al.*, 2013).

Das respostas dadas aos questionamentos constatamos deficiência da escrita para expressar conceitos e ideias. Questões que solicitavam definir, explicar ou comentar (Q1, Q3, Q4 e Q7) apresentaram um percentual de acertos menor em comparação àquelas que solicitavam representações esquemáticas ou simplesmente alguma classificação (Q2, Q5 e Q6). Notamos também que as questões com melhores índices foram aquelas relacionados às situações trabalhadas especificamente no contexto da SE como por exemplo os processos de polarização por reflexão e absorção. Ao nosso ver, trata-se de um resultado esperado, pois não tendo tempo hábil para realizar outras interações sociais, o aluno remeteu-se aos modelos que foram construídos ao longo da implementação da Sequência de Ensino. Por sua vez, questões que objetivavam averiguar a possibilidade de utilização dos conhecimentos adquiridos para explicar novas situações (Q3 e Q7) apresentaram bons resultados, porém em percentuais menos expressivos. Entendemos que, com o tempo, os estudantes poderão associar outras situações do cotidiano aos fenômenos estudados e conseguirão entendê-los utilizando os conceitos científicos aprendidos pois,

A aprendizagem escolar orienta e estimula processos internos de desenvolvimento. A tarefa real de uma análise do processo educativo consiste em descobrir o aparecimento e o desaparecimento dessas linhas internas de desenvolvimento no momento em que se verificam, durante a aprendizagem escolar. Esta hipótese pressupõe necessariamente que o processo de desenvolvimento não coincide com o da aprendizagem, o processo de desenvolvimento segue o da aprendizagem, que cria a área de desenvolvimento potencial (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010, p. 116).

Um outro aspecto relevante, e que já havíamos detectado antes mesmo do início da pesquisa, se refere a dificuldade dos estudantes em trazer para a realidade concreta o significado dos signos e dos símbolos utilizados principalmente em ciências da natureza, o que retarda o aprendizado e requer do professor a organização de atividades em que os alunos possam exercitar a linguagem e o raciocínio, conduzindo-os ao desenvolvimento de processos psicológicos mais elaborados que facilitarão a apropriação dos conhecimentos científicos.

Os resultados obtidos, mesmo diante de todos os fatores que interferem no ensino e na aprendizagem escolar, os quais optamos por não eliminar de nossa intervenção, mostram que a aplicação da Sequência de Ensino proposta foi exitosa. Em nossa análise constatamos que houve apropriação dos principais conceitos científicos relacionados ao tema discutido e uma boa parte dos estudantes conseguiu explicar novas situações a partir da generalização dos conhecimentos adquiridos. Obviamente, os erros cometidos mostraram que para a completa compreensão do conteúdo se faz necessário a discussão de mais problemas que envolvam os conceitos estudados. A aprendizagem de determinado assunto é um processo que se inicia com a exposição. O aperfeiçoamento, por sua vez, só ocorre quando o sujeito desenvolve as estruturas mentais necessárias para seu alcance.

5.3 Opinião dos estudantes quanto ao produto educacional

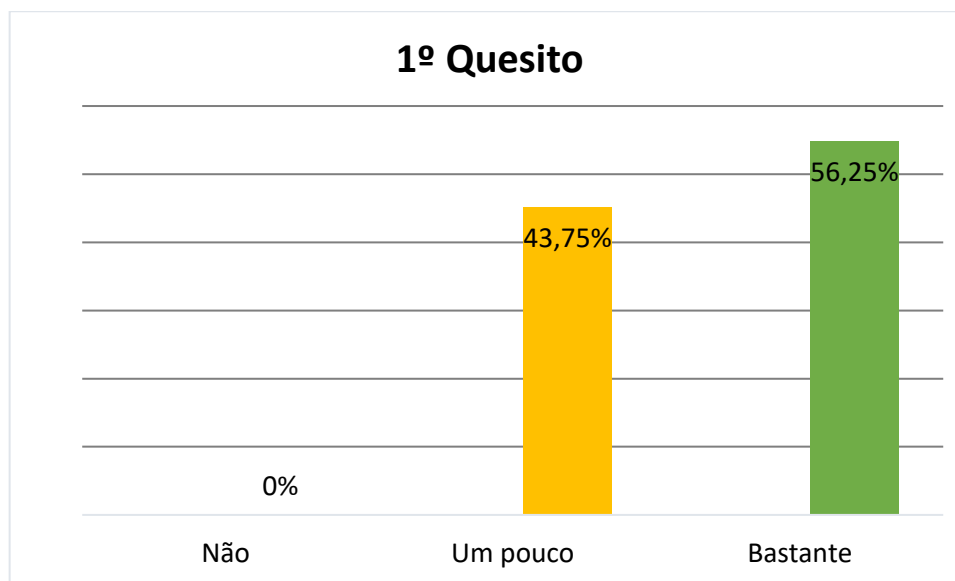
Ao final das atividades da SE disponibilizamos um questionário composto de 4 quesitos a fim de que os estudantes pudessem manifestar suas opiniões sobre a experiência do estudo do conceito de polarização com a proposta utilizada. 32 estudantes participaram da entrevista. Utilizamos uma escala do tipo *likert*²³ para avaliar as respostas em cada item.

Questionamento 1

Abordar o assunto (polarização da luz) a partir da construção de imagens tridimensionais despertou mais seu interesse em entender os conceitos envolvidos?

²³ A escala likert é um tipo de escala de resposta psicométrica usada habitualmente em questionários, e é a escala mais usada em pesquisas de opinião.

Gráfico 5.2 - Motivação em torno da produção de imagens 3D.



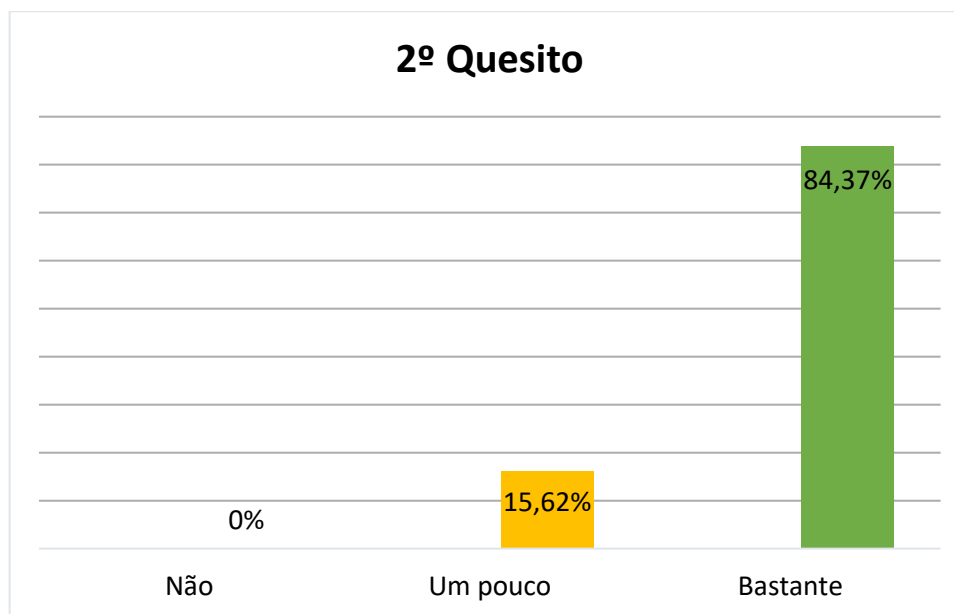
Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

O Gráfico 5.2 indica que 18 estudantes afirmaram que o problema prático proposto na SE despertou bastante interesse pelo aprendizado dos conceitos físicos bem como pela realização das tarefas propostas enquanto 14 afirmaram que o tema apresentado despertou um pouco mais o interesse pelo aprendizado.

Questionamento 2

A utilização do estereoscópio e demais acessórios como películas polarizadoras, lanternas, o celular e outros, o ajudou a assimilar o conceito de polarização da luz e sua utilização no cinema 3D? Comente.

Gráfico 5.3 – O auxílio do estereoscópio para o entendimento dos conceitos.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Quanto ao segundo quesito, o Gráfico 5.3 mostra que um total de 27 estudantes concordam que o estereoscópio e os demais acessórios utilizados contribuíram bastante para o entendimento do conceito de polarização da luz e sua utilização do cinema 3D. Um total de 5 estudantes afirmaram que esses acessórios contribuíram somente um pouco e nenhum estudante informou que o instrumento não contribuiu para o entendimento dos conceitos estudados. O resultado positivo revela o quanto a utilização de objetos, materiais ou instrumentos com finalidades didáticas são úteis para transmitir ideias e conceitos que de outra forma ficariam perdidos por conta da dificuldade de abstração e interpretação que muitos estudantes apresentam.

Vejamos alguns comentários apresentados pelos estudantes como justificativas às suas respostas:

“Porque me fez aprender mais sobre a imagem 3D. Porque sempre quis saber como seria essa imagem.”

Figura 5.39 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (a).

() Não ajudou () Ajudou pouco ☒ Ajudou bastante

Porque me fez aprender mais sobre a imagem 3D porque eu sempre quis saber como seria esta imagem

Fonte: Arquivo próprio.

“Sim, porque a polarização da luz é um fenômeno muito curioso.”

Figura 5.40 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (b).

() Não ajudou () Ajudou pouco ☒ Ajudou bastante

Sim, porque a polarização da luz é um fenômeno muito curioso.

Fonte: Arquivo próprio.

“Sim, entendi bem mais como ocorre o fenômeno e a explicação com o equipamento sempre é a melhor forma.”

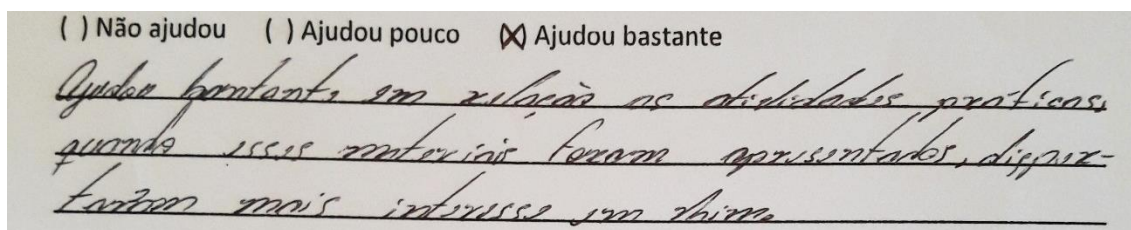
Figura 5.41 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (c).

Sim, entendi bem mais como ocorre o fenômeno e a explicação com o equipamento sempre é a melhor forma

Fonte: Arquivo próprio.

“Ajudou bastante em relação as atividades práticas. Quando esses materiais foram apresentados despertaram mais interesse em mim.”

Figura 5.42 – Opinião dos estudantes quanto a utilização didática do estereoscópio (d).

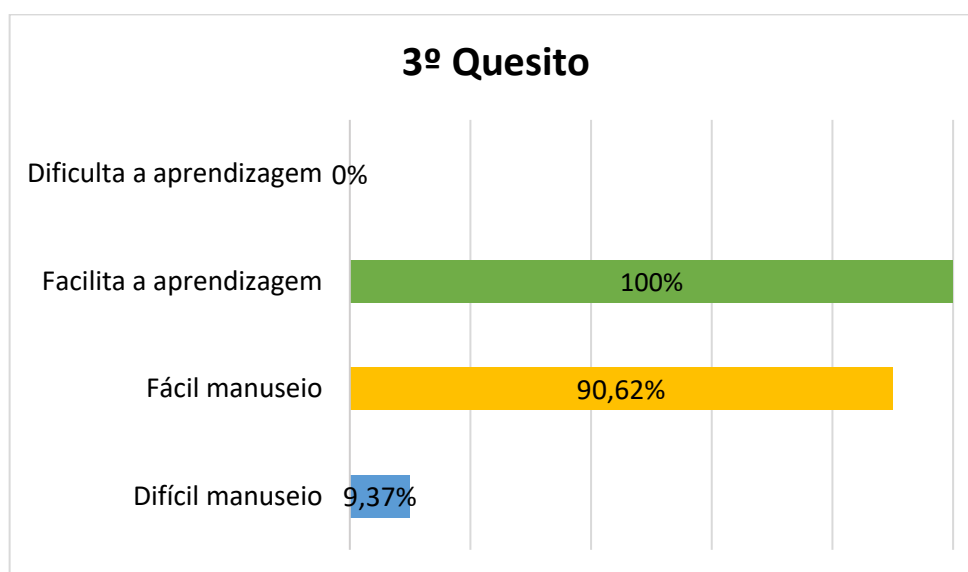


Fonte: Arquivo próprio.

Questionamento 3

Como você avalia o estereoscópio que foi construído e utilizado para auxiliar no estudo da polarização da luz?

Gráfico 5.4 – Avaliação dos estudantes em relação ao estereoscópio.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

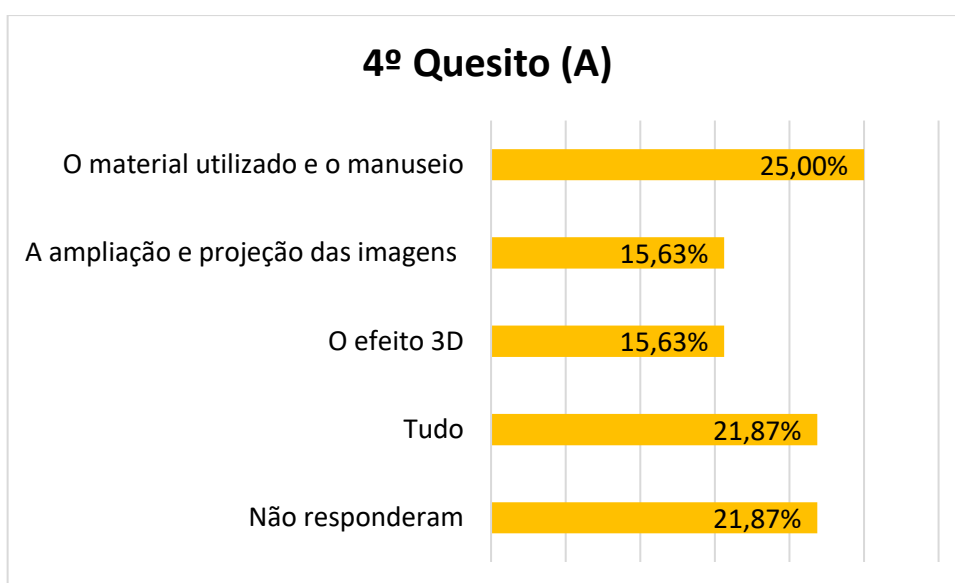
Em relação ao terceiro quesito, o Gráfico 5.4 mostra que todos os estudantes avaliaram o estereoscópio como um instrumento que facilita a aprendizagem. Destes, 29 afirmaram que é um equipamento de fácil operação e 3 afirmaram que o instrumento é de difícil operação. A avaliação positiva que o estereoscópio obteve nesse quesito evidencia dois aspectos importantes que, a nosso ver, fazem de um determinado instrumento um bom aliado em abordagens práticas, principalmente do âmbito do ensino básico: 1- a capacidade de reproduzir fenômenos ou processos tecnológicos significativos e, 2 - a facilidade de operação do equipamento. Sem o primeiro, os alunos dificilmente compreenderão a finalidade dos

conteúdos ensinados. Sem o segundo, provavelmente tanto professores quanto alunos não terão tempo hábil para realizar a tarefa.

Questionamento 4

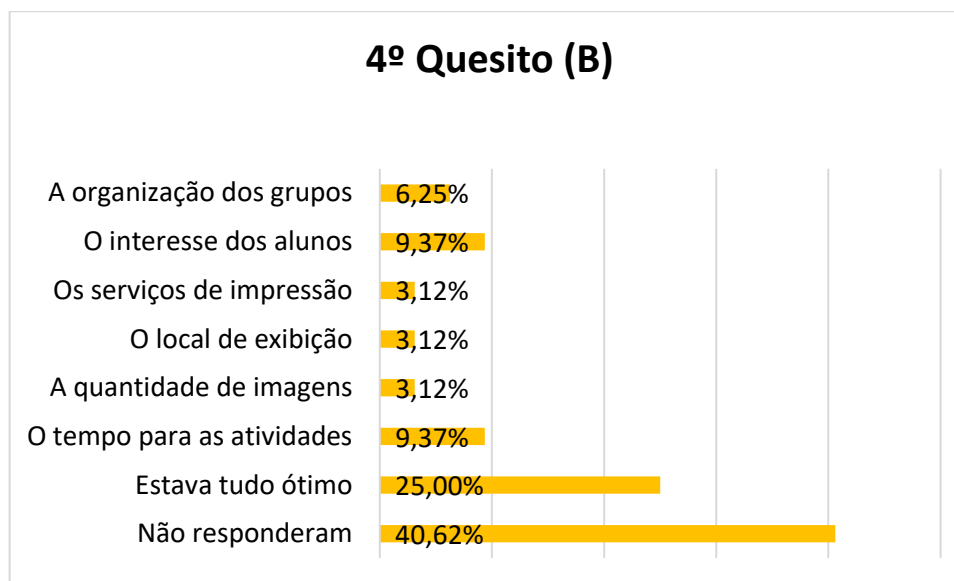
(A) O que você achou mais interessante no estereoscópio e, (B) o que você acha que poderia ter sido melhor?

Gráfico 5.5 – Aspectos mais interessantes do estereoscópio.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Gráfico 5.6 – Sugestão dos estudantes para melhorar a aplicação do produto educacional.



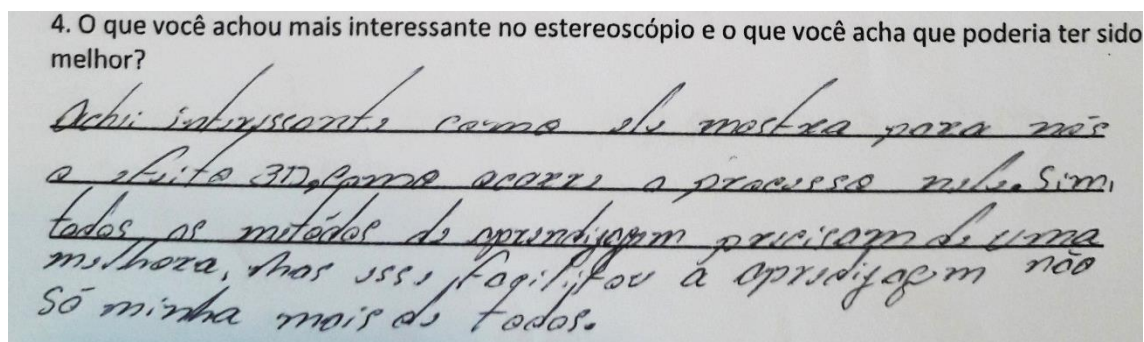
Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Quanto ao quarto quesito (A), o Gráfico 5.5 mostra que os aspectos do estereoscópio que mais chamaram a atenção dos estudantes foram: os materiais utilizados e a forma de ajustes (8); a ampliação e projeção das imagens (5) e o efeito 3D (5). Um total de 7 estudantes afirmaram que ficaram entusiasmados com tudo no equipamento e 7 não responderam.

Nesse quesito, também foi perguntado aos estudantes o que poderia ter sido melhor (B) durante o desenvolvimento das atividades da SE. Como mostra o Gráfico 5.6, 13 estudantes deixaram de responder esse item; 8 informaram que tudo foi ótimo e 11 estudantes apontaram que a organização dos grupos (2); o interesse dos alunos (3); os serviços de impressão (1); o local de exibição das imagens (1); a qualidade das imagens (1) e o tempo para a realização das atividades (3) poderiam ter sido melhor. Seleccionamos e transcrevemos o depoimento de alguns estudantes.

“Achei interessante como ele mostra para nós o efeito 3D, como ocorre o processo nele. Sim, todos os métodos de aprendizagem precisam de uma melhora, mas esse facilitou a aprendizagem não só minha mas de todos.”

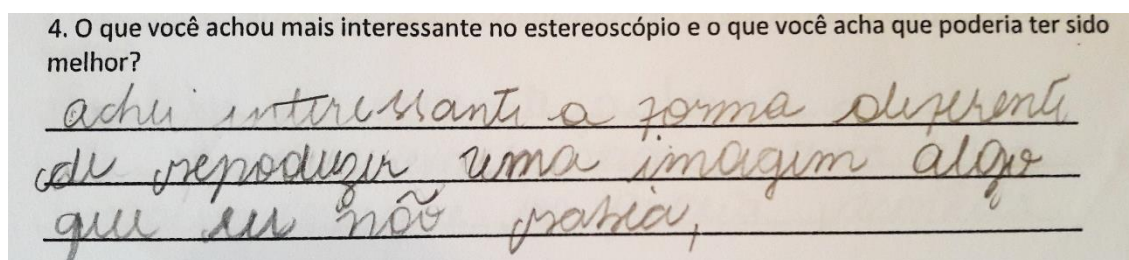
Figura 5.43 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (a).



Fonte: Arquivo próprio.

“Achei interessante a forma diferente de reproduzir uma imagem, algo que eu não sabia.”

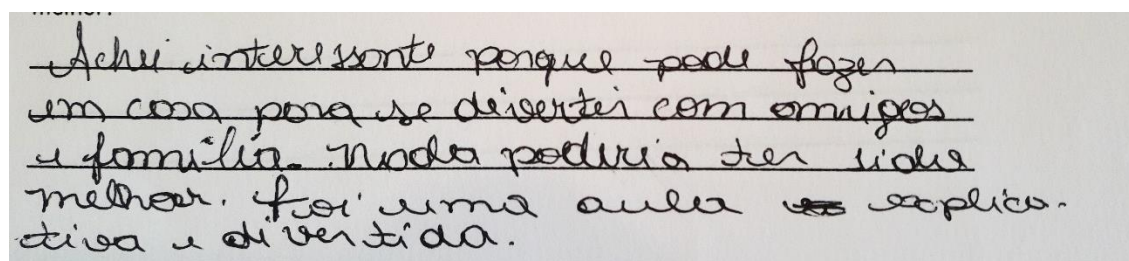
Figura 5.44 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (b).



Fonte: Arquivo próprio.

“Achei interessante porque pode fazer em casa para se divertir com amigos e família. Nada poderia ter sido melhor, foi uma aula explicativa e divertida.”

Figura 5.45 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (c).

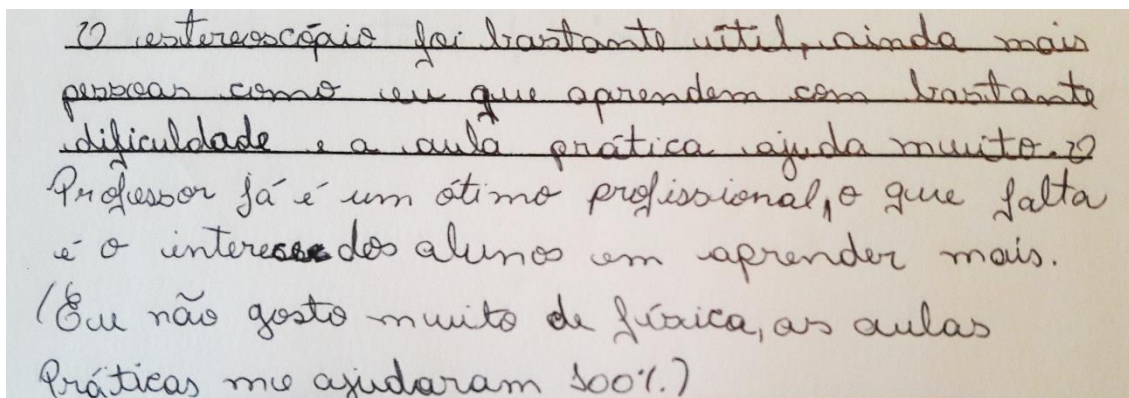


Fonte: Arquivo próprio.

“O estereoscópio foi bastante útil, ainda mais pessoas como eu que aprendem com bastante dificuldade e a aula prática ajuda muito. O professor já é um ótimo profissional, o

que falta é o interesse dos alunos em aprender mais. Eu não gosto muito de física, as aulas práticas me ajudaram 100%.”

Figura 5.46 – Aluno informando o que mais lhe atraiu e o que pode ser melhorado (d).



O telescópio foi bastante útil, ainda mais
 pessoas como eu que aprendem com bastante
 dificuldade e a aula prática ajuda muito. O
 Professor já é um ótimo profissional, o que falta
 é o interesse dos alunos em aprender mais.
 (Eu não gosto muito de física, as aulas
 práticas me ajudaram 100%.)

Fonte: Arquivo próprio.

De acordo com o feedback dos estudantes, acreditamos que a proposta didática sugerida atingiu os objetivos pretendidos. As atividades realizadas estabeleceram um elo entre o aprendizado adquirido pelos estudantes na escola e sua importância em outros contextos, promovendo uma correlação com suas experiências cotidianas e ajudando-os a alcançar familiaridade e melhor domínio dos conceitos científicos. Segundo Vygotsky (2001), o estabelecimento de uma relação dialógica entre o conhecimento informal e o conhecimento científico aprendido na escola favorece o desenvolvimento das funções psicológicas superiores: atenção voluntária; percepção; a memória e pensamento. A SE mostrou-se atraente e capaz de provocar atitudes que propiciam a ressignificação dos conceitos espontâneos que os estudantes trazem de suas experiências pessoais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentamos uma proposta de abordagem da polarização da luz no ensino médio a partir da discussão de uma situação que faz parte da vivência dos estudantes. Para isso, desenvolvemos, com materiais simples e de fácil aquisição, um dispositivo para a projeção de imagens tridimensionais pela técnica de luz polarizada (estereoscópio) e elaboramos uma sequência de ensino para nortear sua aplicação didática. Buscamos traçar uma metodologia capaz de despertar a curiosidade e a motivação dos estudantes colocando-os como atores no processo da aprendizagem.

A proposta de ensinar sobre a polarização da luz a partir da discussão da tecnologia 3D gerou expectativa, uma vez que se tratava de algo conhecido dos estudantes e sobre a qual poderiam expor suas concepções. O contato com o estereoscópio foi significativo, pois os estudantes acreditavam que só era possível obter imagens tridimensionais com o auxílio de programas, aplicativos ou computação gráfica. A visualização de imagens nesse formato a partir de um equipamento construído com materiais simples, frequentemente utilizados para outros fins, causou surpresa e gerou muitas indagações. Aproveitando a curiosidade, desafiamos os alunos a aprender sobre os princípios físicos envolvidos na tecnologia 3D para que eles mesmos pudessem produzir imagens tridimensionais.

Nas primeiras aulas da SE realizamos demonstrações e apresentamos os conteúdos específicos relacionados ao problema proposto. Os estudantes foram participativos, relatando suas experiências, apresentando suas ideias e fazendo perguntas. A princípio, apresentaram dificuldades em traduzir os conceitos e entender determinados modelos teóricos. No entanto, a utilização de objetos e materiais didáticos facilitou o entendimento.

Na etapa em que foi realizada a oficina para a produção das imagens estabeleceram-se interações que propiciaram o espírito de equipe e a participação dos estudantes no processo. Além do entusiasmo em torno da exposição das imagens, alguns estudantes manifestaram espontaneamente o desejo de expor o entendimento que tinham alcançado dos conceitos envolvidos naquela aplicação, um indicativo de que a proposta adotada foi instigante. Apesar do contato frequente com a tecnologia 3D, os estudantes não tinham conhecimento algum acerca dos fenômenos físicos e das técnicas envolvidos na concepção dela. Com a implementação da SE os estudantes tomaram conhecimento dos principais conceitos de Física que, articulados com outros de Biologia e Matemática, estão envolvidos na percepção e produção de imagens tridimensionais. O fenômeno da polarização da luz foi

abordado como subsídio necessário ao entendimento do problema proposto e, para isso, os estudantes tiveram a oportunidade de entender o significado físico de polarizar uma onda, conhecer os processos pelos quais a luz pode ser polarizada e algumas aplicações.

Os resultados obtidos indicam que é possível ensinar sobre a polarização da luz no ensino médio por meio de um estereoscópio a partir de uma Situação de Ensino baseada na teoria sociocultural de Vigotski. Ressaltamos o interesse que o tema despertou de imediato nos estudantes e o engajamento deles nas atividades propostas. Acreditamos que a realização de atividades nas quais o aluno possa conhecer, entender e participar das etapas e dos processos envolvidos, propicia o estabelecimento de uma relação de afetividade com o objeto de estudo tornando o aprendizado mais significativo e prazeroso.

A falta de computadores, rede de internet e instrumentos de medidas (já que a escola não dispunha de laboratórios de ciência e informática), além da notória dificuldade dos estudantes em matemática, nos levou a trilhar um caminho onde somente os aspectos qualitativos do fenômeno fossem enfatizados. Uma proposta contemplando aspectos matemáticos exigiria algumas aulas de revisão e extrapolaria em muito o tempo que tínhamos à disposição – em um contexto educacional mais favorável é possível promover uma abordagem com esse enfoque.

Utilizando o estereoscópio com o apoio de ferramentas digitais, é possível analisar a qualidade das películas polarizadoras utilizadas para recobrir as lupas a partir do cálculo de transmitância e absorbância (utilizando aplicativo instalado em um PC ou celular para medir a intensidade da luz que incide e que emerge das lentes/lupas) ou verificar a Lei de Malus, por exemplo. Outro aspecto que enseja investigação é a possibilidade do uso didático do estereoscópio em uma Situação de Estudo que congregue outros componentes curriculares (além de Biologia e Matemática) como por exemplo: Artes (desenhos e formas que provocam sensação de profundidade, fotografia, TV e cinema), Filosofia (estudo da percepção enquanto atividade intelectual importante para se compreender as características da consciência ou da capacidade humana em obter o conhecimento de si e de mundo) e Geografia (aplicação de mapas com perspectiva 3D nas aulas de geomorfologia).

Longe de nós a pretensão de esgotarmos neste trabalho um tema que, apesar de pouco explorado nas escolas, tem aplicações em diversas áreas e, por isso mesmo, muitas possibilidades de intervenções didáticas. Nossa intenção, foi, tão somente, elaborar uma proposta didática motivadora, contextualizada e que possa ser implementada nas escolas de nível médio. Pelos resultados obtidos, acreditamos que alcançamos esses objetivos.

REFERÊNCIAS

- AUTH, M. A. **Formação de Professores de Ciências Naturais na Perspectiva Temática e Unificadora**. 2002. 250 p. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- AZEVEDO, De E. R. *et al.* **Utilização de um espectógrafo de projeção como uma ferramenta para demonstrações sobre polarização da luz**. Scielo, 2010. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000500036&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt%0D>. Acesso em: 5 mar. 2018.
- BARRETO, B.; XAVIER, C. **Física Aula po Aula**. 3. ed, v. 2. São Paulo: FTD, 2016.
- BOAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCOULA, G. J. **Física 2**. 3. ed, v. 2. São paulo: Saraiva, 2016.
- BONJORNIO, J. R. *et al.* **Física 2**. 3. ed, v. 2. São Paulo: FTD, 2016.
- BORUCHOVITCH, E., BZUNEC, J. A. **A motivação do Aluno: contribuições da psicologia conemporânea**. 4. ed. Petrópolis: Vozes, 2009.
- BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **PCN + Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: 2002.
- BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **Orientações Curriculares para o Ensino Médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias**. Brasília: 2006.
- BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **Base Nacional Comum Curricular**. 2015. Disponível em: <<http://revistas.pucsp.br/index.php/curriculum/article/view/21666/15916>>. Acesso em: 16 ago. 2019.
- CARLIN, N. *et al.* Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 27, n. 3, p. 349–355, 2005.
- CARNEIRO, J. L. P.; RIBEIRO, M. H. da S. A reflexão da luz nos periódicos de Ensino de Física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 33, n. 2, p. 355–398, ago. 2016.
- CARRON; GUIMARÃES; PIQUEIRA. **Física**. 2. ed, v. 2. São paulo: Atica, 2016.
- CATTANI, M.; BASSALO, J. M. F. Atividade óptica de um meio dielétrico diluído: Pasteur e as simetrias moleculares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 31, n. 3, nov. 2009.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; GUIMARÃES, D. A luz Laser é Polarizada? **Física na Escola**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 73–75, out. 2006.

CHRISTOFOLI, E. P. O Renascimento do 3d. **Contemporânea**, Rio de Janeiro, v. 9, v. 17, p. 511–526, out. 2011.

COELLHO, L.; PISONI, S. Vygotsky : sua teoria e a influência na educação. **Revista e - Ped – FACO/CNEC**, Osório, v. 2, n.1, p. 144–152, ago. 2012.

COLOMBO, E. Polarização da luz: uma proposta de experiências simples. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 280–296, abr. 1991.

COSTA, E. V. Medidas de intensidade luminosa: polarização. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 37–40, mar. 2002.

DUMKE, V. R.; JR, G. W. Preparação de Lâminas Polarizadoras. **Revista Brasileira de Física**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 405–410, mar. 1982.

EMILIANO, J. M.; TOMÁS, D. N. Vigotski : a relação entre afetividade , desenvolvimento e aprendizagem e suas implicações na prática docente. **Cadernos de Educação: Ensino e Sociedade**, Bebedouro, v. 2, n. 1, p. 59–72, abr. 2015.

FABRIS, J. L; MULLER, M.; MULLER, L.V. Sistema sensor com câmera USB para uso em experimentos de polarização da luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 636–648, ago. 2017.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. P.; SANDS, M. **Lições de Física The Feynman Lectures on Physics Volume I**. São Paulo: Bookman, 2009.

FILHO, A. G.; TOSCANO, C. **Física: Interação e Tecnologia**. 2. ed, v. 2. São paulo: Leya, 2016.

FLEMMING, J.; ROSA, C. A. Análise da luz circularmente polarizada produzida por um ser vivo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, n. 4, dez. 2015.

FUKE, F. I; YAMAMOTO, K. **Física para o Ensino Médio**. 3. ed, v. 2. São Paulo: Saraiva, 2016.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física**. 3. ed, v. 2. São Paulo: Atica, 2016.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. D. C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 227–254, ago. 2005.

GEHLEN, S. T.; MALDANER, O. A.; DELIZOICOV, D. Momentos pedagógicos e as etapas da situação de estudo: complementaridades e contribuições para a Educação em Ciências. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 18, n. 1, p. 1–22, mar. 2012.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALLKER, J. **Física, Vol. 4 - Ótica E Física Moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. a.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALLKER, J. **Física, Vol. 2v - Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. b.

LALIC, M. **Física C.** São Cristovão: UFS/CESAD, 2011.

LONDRINA, U. E. De. Mexendo com polaróides e mostradores de cristais líquidos (O Ensino da Física Contemporânea, tendo como pano de fundo a Física do cotidiano). **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 192–205, 1998.

LUNAZZI, J. J.; FRANÇA, M. C.; MORI, Da A. S. Revivendo o estereoscópio de Wheatstone. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, n. 2, jun. 2015.

LUZ, A. M. R. Da; ÁLVARES, B. A.; GUIMARÃES, C. da C. **Física - Contexto e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2016.

MALDANER, O. A.; ZANON, L. B. Situação de Estudo: uma organização do ensino que extrapola a formação disciplinar em ciências. **Espaço da Escola**, Ijuí, n. 41, p. 45–60, 2001.

MASCHIO, A. V. A Estereoscopia: Investigação de processos de aquisição, edição e exibição de imagens estereoscópicas em movimento. 2008. 231 p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) - Universidade Estadual Paulista “ Júlio de Mesquita Filho”, Campus Bauru, São paulo, 2008.

MONTEIRO, I. C. C.; MONTEIRO, M .A .A; GASPAR, A. Atividades de demonstração em conferências ou palestras: In: V ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS 2005, Bauru. **Anais...** Bauru: Associação brasileira de pesquisa em educação em ciências, 2005. Disponível em: <fep.if.usp.br/~profis/arquivos/ivenpec/Arquivos/Orais/ORAL044.pdf%0D>. Acesso em: 10 jul. 2019.

ORTIZ, A. J.; LABURÚ, C. E. Proposta simples para o experimento de espalhamento rayleigh. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, Florianópolis, v. 27, n. 3, p. 599–608, dez. 2010.

PINHO, J. De; FILHO, A. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 17, n. 2, p. 174–188, ago. 2000.

POGIBIN, A. *et al.* **Física em Contextos**. 1. ed, v. 2. São paulo: Editora do Brasil, 2016.

REZENDE, F.; OSTERMANN, F.; FERRAZ, G. Ensino-aprendizagem de física no nível médio: o estado da arte da produção acadêmica no século XXI. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 32, n. 1, abr. 2009.

RIBEIRO, J. P. ; VERDEAUX, M. de F. da S. Experimento simples, explicação nem tanto! Reflexão e polarização em óculos 3D. **Física na Escola**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 14–16, mai. 2012.

RIBEIRO, P.; VERDEAUX, S. Atividades experimentais no ensino de óptica : uma revisão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 34, n. 4, dez. 2012.

SANGIOGO, F. A. *et al.* Pressupostos epistemológicos que balizam a Situação de Estudo: algumas implicações ao processo de ensino e à formação docente. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 19, n. 1, p. 35–54, 2013.

SANT'ANNA, B. *et al.* **Conexões com a Física**. 3. ed, v. 3. São paulo: Moderna, 2016.

SANTOS, M. A. D. C. Dos *et al.* Geração de imagens animadas GIF com o Mathematica®: Simulações didáticas de ondas eletromagnéticas e polarização da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 1–8, 2016.

SANTOS, M. A. da C. Dos. Ferramentas didáticas e a aprendizagem sobre ondas eletromagnéticas e a polarização da luz. In: 2016, Maringá. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2016.

SÉRÉ, M. G; COELHO, S. M; NUNES, A. D. O papel da experimentação no ensino de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 20, n. 1, p. 30–42, abr. 2003.

SILVA, E. L. Da; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed, v. 29. Florianópolis: UFSC, 2005.

SOGA, D.; TOLEDO, S. P.; MURAMATSU, M. Receitas doces e coloridas: Demonstrações com luz polarizada. **Física na Escola**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 45–50, mai. 2017.

TOMOYOSE, A. N. **Estereoscopia para realidade aumentada e jogos**. 2010. 215 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São paulo, São Paulo, 2010.

TORRES, C. M. A. *et al.* **Física - Ciência e Tecnologia**. 4. ed, v.2. São paulo: Moderna, 2016.

VÁLIO, A. B. M. *et al.* **Ser Protagonista, Física 2**. 3. ed, v. 2. São paulo: SM, 2016.

VIEIRA, L. P.; AGUIAR, C. E. Verificação da lei de malus com um Smartphone. In: XXI SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 2015, Vitória. **XXI Simpósio...** Vitória: SNEF, 2015. p. 1-7. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0583-1.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

VIGOTSKII, L. S.; LURIA, A. R.; LEONTIEV, A. N. **Linguagem desenvolvimento e aprendizagem**. 11. ed. São Paulo: ícone, 2010.

VYGOTSKI, L. S. **A formação social da mente**. 4. ed. São paulo: Martins Fontes, 1991.

VYGOTSKY, L. S. **A construção do pensamento e da linguagem**. São paulo: Martins Fontes, 2001.

VYGOTSKY, L. S. **Pensamento e linguagem**. São Paulo: Martins Fontes, 2005.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV - Ótica e Física Moderna**. 12. ed. São paulo: Pearson, 2009. a.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III - Eletromagnetismo**. 12. ed. São paulo: Pearson, 2009. b.

APÊNDICE A
Questionários e testes

A.1 – Questionário de levantamento inicial**Escola:** _____**Prof(a):** _____ **Disciplina:** _____**Aluno:** _____ **Série:** _____ **Turma:** _____**Tecnologia 3D**

1. Você já assistiu algum vídeo, filme ou qualquer outra exibição em 3D? Onde? O que mais lhe chamou atenção?

2. No seu entendimento, qual a diferença entre imagens (fotos, desenhos ou vídeos) 3D e imagens 2D?

3. As imagens que nosso sistema de visão capta naturalmente dos objetos a nossa volta são tridimensionais ou bidimensionais? Por quê?

4. Você já pesquisou ou ouviu falar a respeito de como são produzidas imagens 3D? Comente.

5. Provavelmente você já deve ter utilizado óculos de cores (azul e vermelho) para visualizar imagens ou vídeos tridimensionais em notebook, tablets ou celulares. Nos cinemas 3D também são utilizados óculos especiais, pois o efeito tridimensional não é perceptível olhando diretamente (sem os óculos) para a imagem (ou filme). Você sabe por que isso ocorre e qual a função dos óculos?

A.2 – Avaliação subjetiva individual

Escola: _____

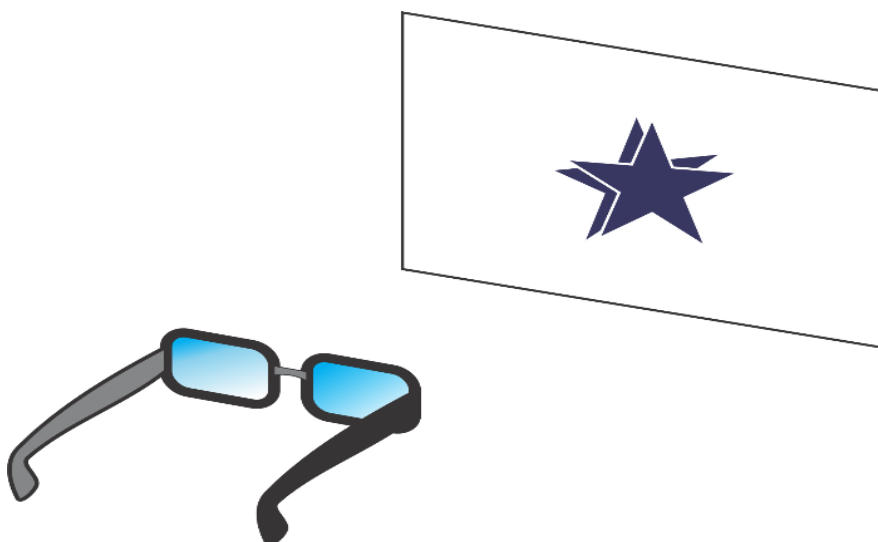
Prof(a): _____ Disciplina: _____

Aluno: _____ Série: _____ Turma: _____

Avaliação da aprendizagem
Polarização da Luz

1. A luz visível pode ser entendida como um tipo de onda eletromagnética que resulta do movimento de elétrons em átomos que receberam determinadas “doses” de energia. Uma fonte comum de luz possui uma quantidade enorme de elétrons que vibram de forma desorganizada e aleatória. De acordo com o que você aprendeu, o que significa polarizar a luz?

2. Existem algumas técnicas pelas quais é possível "imitar" a percepção tridimensional que temos naturalmente do mundo à nossa volta e fazer com que imagens e/ou vídeos pareçam mais “realistas”. Uma das formas de se conseguir essa ilusão de ótica é obter duas imagens em ângulos diferentes de um objeto ou paisagem, projetá-las em uma tela e depois fazer com que cada olho veja, simultaneamente, apenas uma das imagens. O cinema 3D utiliza o fenômeno da polarização para fazer a separação das imagens. Utilizando o esquema abaixo, desenhe como deve se propagar a luz de cada imagem que “sai” da tela de projeção e como devem estar orientados os eixos de polarização das lentes dos óculos 3D.



3. Os monitores de computadores, notebook, as telas de TV's, tablets celulares e similares, transmitem imagens com luz polarizada. Se você olhar para um desses monitores através de uma película polarizadora (ou óculos de sol) e começar a fazer um giro na película, irá perceber que em uma determinada posição a imagem que vem do monitor é nítida e em outra a imagem praticamente desaparece. Explique ou descreva (com desenhos) por que isso ocorre.

4. A luz pode ser polarizada por meio de alguns processos naturais: birrefringência, espalhamento, reflexão e absorção. Descreva como ocorre a polarização em pelo menos dois desses processos.

5. Os fotógrafos profissionais utilizam filtros polarizadores em suas câmeras para melhorar a qualidade das imagens, obtendo cores mais nítidas e contrastantes. É possível girar o filtro até que se atinja a qualidade desejada. Isso é possível quando a luz dos objetos presentes na cena incide parcialmente polarizada na lente da câmera. Quais processos de polarização você identifica nessa situação?

6. A figura abaixo representa a luz de um laser polarizada em um plano vertical. Desenhe linhas retas indicando como devem estar orientadas as grades absorvedoras (longas cadeias de hidrocarbonetos) de um polaroide colocado à frente do laser para que a luz seja transmitida (1) e não transmitida (2).



7. Os óculos de sol (com lentes polarizadas) eliminam boa parte dos reflexos da luz em objetos e superfícies evitando ofuscamento. Nestes óculos, os eixos de polarização das duas lentes são dispostos na mesma direção. O que aconteceria caso um colega seu fosse ao cinema e colocasse óculos de sol para assistir um filme 3D?

A.3 – Questionário de satisfação

Informações para o(a) participante:

Você está convidado(a) a responder esta pesquisa de satisfação que faz parte da coleta de dados referente a pesquisa **“Construção de estereoscópio: Uma proposta para o ensino da polarização da luz no Ensino Médio”**. Sob responsabilidade do pesquisador Prof. Carlos Adriano da Conceição Cardoso, professor desta unidade de Ensino, Coelho Neto-Turu, e aluno de Pós-Graduação da Universidade Federal do Maranhão. Contamos com a sua colaboração!

- ✓ O resultado desse levantamento não irá interferir de forma alguma em sua avaliação bimestral. Por isso, não há a necessidade de se identificar.
- ✓ O único objetivo é saber sua opinião a respeito do método e da dinâmica empregada durante as aulas para que possamos melhorar nossa prática de ensino.
- ✓ Nesse sentido, solicitamos apenas que responda cada quesito com franqueza.

1. Abordar o assunto (polarização da luz) a partir da construção de imagens tridimensionais despertou mais seu interesse em entender os conceitos envolvidos?

☐ Não ☐ Um pouco ☐ Bastante

2. A utilização do estereoscópio e demais acessórios como películas polarizadoras, lanternas, o celular e outros, o ajudou a assimilar o conceito de polarizar a luz e sua utilização no cinema 3D? Comente.

☐ Não ajudou ☐ Ajudou pouco ☐ Ajudou bastante

3. Como você avalia o estereoscópio que foi construído e utilizado para auxiliar no estudo da polarização da luz?

- ☐ Uma ferramenta de difícil manuseio
- ☐ Uma ferramenta de fácil manuseio
- ☐ Uma ferramenta que facilita a aprendizagem

() Uma ferramenta que não facilita a aprendizagem

4. O que você achou mais interessante no estereoscópio e o que você acha que poderia ter sido melhor?

APÊNDICE B

Autorização para aplicação do Produto



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
 Fundação Instituída nos termos da Lei nº 5.152, de 21/10/1966 - São Luís - Maranhão.

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

OFÍCIO Nº 06/18- PROFIS São Luís, 19 de novembro de 2018.

Ilmo. Sr.
 Prof. Raphael Schliebe
 M.D. Diretor da Escola Centro de Ensino Coelho Neto - Turu

Assunto: Solicitação de sala para implementação do Produto Educacional

Prezado(a) Diretor(a),

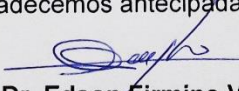
Considerando que o **Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Maranhão (PROFIS-UFMA)** objetiva a melhoria da qualificação profissional de professores de física em exercício na Educação Básica, visando tanto o desempenho do professor em sala de aula como o desenvolvimento de técnicas e produtos de aprendizagem de Física;

Considerando, ainda, que o Programa destina-se a formar recursos humanos para a pesquisa, o desenvolvimento e aplicação de conhecimentos científicos, tecnológicos e de inovação voltados às questões práticas relacionadas à atuação profissional.

Solicitamos a V. Sa. a possibilidade de disponibilizar a Sala da escola durante corrente semestre, para implementação do PRODUTO EDUCACIONAL: **“Construção de um estereoscópico para estudo da Polarização da luz no Ensino Médio”**, de autoria do aluno Carlos Adriano da Conceição Cardoso, deste Mestrado, sob orientação do Prof. Dr. Clenilton Costa dos Santos.

Informamos que o Produto Educacional é constituído das seguintes etapas: 1 - Questionários. 2 - Aulas expositivas e atividades práticas nas dependências da escola.

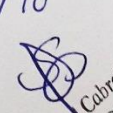
Na certeza de poder contar com a sua sensibilidade e compreensão, lhe agradecemos antecipadamente.



Prof. Dr. Edson Firmino Viana de Carvalho
 Coord. do PROFIS – Polo UFMA
 Mat. UFMA. 1910383

Recebido em

21/11/18



Raphael Cabral Schliebe
 Gestor Geral
 Mat. 20740352

Consolidar
avanços
e vencer
desafios

Cidade Universitária Dom Delgado - CCET
 Avenida dos Portugueses, 1.966 - São Luís - MA - CEP: 65080-805
 Fone: (98) 3272-8278

APÊNDICE C
Produto Educacional

CONSTRUINDO UM ESTEREOSCÓPIO

Ensinando a polarização da luz a partir
da produção de imagens...



Carlos Adriano da C. Cardoso

Guia de montagem e aplicação didática

Autor:

Carlos Adriano da Conceição Cardoso

Orientador:

Prof. Dr. Clenilton Costa dos Santos

Criação de Capa:

Clenilton Costa dos Santos

São Luís – MA

2019

© Carlos Adriano da Conceição Cardoso – 2019.

O material apresentado neste documento pode ser reproduzido livremente desde que citadas as fontes. As imagens apresentadas são de propriedade dos respectivos autores e utilizadas para fins didáticos. Por favor, contate os autores caso constate que houve violação de seus direitos autorais. Este documento é veiculado gratuitamente, sem nenhum tipo de retorno comercial a nenhum dos autores, e visa apenas a divulgação do conhecimento científico.

Apresentação

Prezado(a) professor(a),

Este guia foi elaborado com o intuito de servir de referência quanto a construção e utilização didática de um estereoscópio para apoiar o estudo da polarização da luz. O referido material resulta de um produto educacional referente à conclusão de dissertação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Sociedade Brasileira de Física em parceria com a Universidade Federal do Maranhão – MNPEF – Polo 47 – UFMA, intitulada: **“Construção de um estereoscópio: uma proposta para o ensino da polarização da luz no ensino médio”**.

O guia está dividido em quatro partes assim estruturadas: primeiro, uma breve introdução pontuando alguns aspectos relevantes deste trabalho e suas aplicações no Ensino Médio; no capítulo um, um resumo histórico do fenômeno seguido de sua descrição físico-matemática e algumas considerações a respeito dos princípios da visão binocular; no capítulo dois, orientações para a construção do estereoscópio, produção das imagens, confecção dos óculos 3D, preparação da tela de projeção, ajustes das imagens e demais acessórios; por fim, no capítulo três, uma sugestão de aplicação didática em que a polarização da luz é estudada no contexto de sua aplicação no cinema 3D.

Bom trabalho!

São Luís, 2019

Carlos Adriano da C. Cardoso

Índice

Palavra do autor.....	5
Introdução	7
Capítulo um: Contexto histórico e descrição físico-matemática	9
Capítulo dois: Construção do estereoscópio.....	31
Capítulo três: Proposta de aplicação didática.....	53
Referências	62
Apêndices	64
C.1 – Sugestão de slides para exposição das aulas	64
C.2 – Texto de apoio (Visão binocular e Estereoscopia).....	67
C.3 – Óculos 3D (Moldes)	72
C.4 – Problemas propostos	73
C.5 – Perspectivas de respostas aos problemas	76

Palavra do autor...

A melhoria dos indicadores da educação formal básica depende do ajuste de várias variáveis e, por essa razão, a solução para esse problema se mostra um tanto complexa. É consenso que um dos fatores que exerce forte influência na qualidade do ensino é a competência técnica do professor, pois só é possível ensinar bem quando se tem domínio daquilo que se pretende ensinar. Se, de um lado, a capacitação profissional do professor se mostra indispensável para a prática de ensinar, do outro, o interesse dos estudantes não pode ser desconsiderado no processo de aprendizagem.

Com vista nessa díade, além da formação continuada, tenho buscado formas de alcançar e unificar dois fatores que, a meu ver, são essenciais para tornar as aulas de Física mais atraentes: o primeiro, é fazer com que os alunos reconheçam a utilidade do assunto abordado; o segundo, motivá-los a realizarem as atividades propostas. Com o intuito de oferecer uma abordagem para o ensino da polarização da luz no ensino médio que contemplasse esses dois aspectos, desenvolvi meu trabalho de mestrado com base nas concepções da teoria da aprendizagem de Vigotski (VIGOTSKII; LURIA; LEONTIEV, 2010), na qual o desenvolvimento do indivíduo é um processo que se constrói a partir das interações que ele estabelece no contexto histórico e cultural que está inserido.

Segundo Vigotski, a socialização não é simplesmente um fator de manifestação do desenvolvimento cognitivo, e sim o elemento que desenvolve os processos mentais superiores: pensamento, linguagem e memória. Dessa forma, os conhecimentos espontâneos e informais adquiridos pelo estudante, mesmo que ainda não definidos conceitualmente, se mostram carregados de significado uma vez que se desenvolvem a partir de situações empíricas e factuais decorrentes de suas experiências diárias, ao passo que os conhecimentos científicos, que primeiramente são apresentados formalmente pelo professor, carecem dessa correlação com as experiências cotidianas para que ganhem sentido. O professor tem um papel de destaque na concepção vigotskiana de ensino-aprendizagem por ser aquele que possui os conhecimentos que os estudantes devem aprender e as

habilidades que devem “imitar” para avançar no campo das suas potencialidades intelectuais.

O produto educacional descrito neste guia foi aplicado em uma turma de 35 alunos da terceira série do ensino médio regular de uma escola localizada na cidade de São Luís, capital do Maranhão. A época da intervenção didática a escola não dispunha de laboratório de ciências, quadra poliesportiva e nem auditório. A rede *wifi* não tinha capacidade suficiente para atender a demanda da escola e o laboratório de informática encontrava-se inoperante. Tínhamos à disposição uma sala de vídeo a qual utilizamos para fazer a projeção das imagens.

Apesar do contato frequente com a tecnologia 3D, os estudantes não tinham conhecimento algum acerca dos fenômenos físicos e das técnicas envolvidas na concepção desse tipo de imagens. Com a implementação da estratégia de ensino aqui apresentada, os estudantes tomaram conhecimento dos princípios fundamentais utilizados na produção de imagens tridimensionais e, principalmente, da técnica de polarização da luz. O contato com o estereoscópio foi significativo, pois a visualização de imagens tridimensionais a partir de um equipamento construído com materiais simples, frequentemente utilizados para outros fins, causou surpresa e gerou muitas indagações. Aproveitando a curiosidade dos estudantes os desafiei a produzirem suas próprias imagens 3D.

Ressalto o interesse que o assunto (imagens 3D) despertou de imediato nos estudantes e o fato de que mesmo não fazendo uso expressivo de tecnologias digitais, recurso muito utilizado atualmente em propostas didáticas, houve engajamento dos estudantes na realização das tarefas e assimilação dos principais conceitos relacionados à polarização da luz. Creio que a realização de atividades em que o aluno possa conhecer, entender e participar das etapas e dos processos envolvidos, propicia o estabelecimento de uma relação de afetividade com o objeto de estudo, tornando o aprendizado mais significativo e prazeroso.

Introdução

A luz polarizada é utilizada em diversas áreas para os mais variados fins. É também, antes de tudo, um fenômeno natural que ocorre todos os dias em muitas situações as quais, na maioria das vezes, nem percebemos. Ocorre com a luz do sol espalhada pela atmosfera terrestre ou refletida na superfície de um lago, de uma lâmina de vidro ou em qualquer outra superfície não condutora, por exemplo. A descoberta e o entendimento desse fenômeno (uma propriedade típica das ondas eletromagnéticas) possibilitaram aplicações importantes no campo da medicina, biologia, engenharia, artes visuais, designer e outros. Além disso, seus benefícios estão presentes no dia a dia das pessoas por meio da popularização dos eletrônicos portáteis e da indústria do entretenimento: “os polaroides¹ (ou polarizadores) são de grande importância na pesquisa em física e também em usos mais cotidianos como na fotografia, nas telas de LCD e na projeção de filmes 3D” (VIEIRA; AGUIAR, 2015, p. 4). Por outro lado, mesmo com todas essas implicações, a polarização da luz é um assunto que tem sido pouco explorado no campo do ensino de Física e os estudantes acabam não tendo a oportunidade de estudar essa temática tão presente em seus dia-a-dias.

Em pesquisa de estado da arte, Ribeiro e Vedeaux (2012) relatam que as propostas em experimentação de Ótica no período de 2001 a 2009 tiveram um surpreendente crescimento de 276% em relação ao período de 1992 a 2000. Porém, dentre os fenômenos estudados nessa disciplina: natureza da luz, reflexão, refração, difração, interferência, polarização e espalhamento, há uma grande lacuna em relação aos três últimos mencionados, sendo que a polarização figura como último no ranking com apenas quatro publicações entre 1992 e 2010. Em pesquisa mais recente sobre a reflexão da luz em periódicos de ensino de física, Ribeiro e Carneiro (2016) concluíram que alguns fenômenos, inclusive a polarização da luz (novamente), são considerados como férteis áreas de pesquisa, dada a carência que a revisão apontou.

¹ Material polarizador da luz, usado especialmente em lentes de óculos e lâmpadas, para evitar deslumbramento, e em diversos dispositivos ópticos.

Com o intuito de oferecer ao professor uma forma de trazer para a sala de aula a discussão desse fenômeno, comum na natureza e tão presente na vida dos estudantes, o presente guia propõe uma metodologia para o estudo da polarização da luz no Ensino Médio na qual os estudantes sejam motivados a aprender os conceitos envolvidos a partir da produção de imagens tridimensionais. Para isso, é descrita a construção de um estereoscópio para projeção de imagens 3D por luz polarizada com materiais e instrumentos de fácil aquisição (alguns deles reaproveitados). Para apoiar o trabalho do professor quanto ao uso pedagógico do estereoscópio sugere-se uma Situação de Estudo (SE) que traz a tecnologia 3D empregada no cinema como tema geral de discussão. Nela aborda-se os conceitos relacionados à polarização da luz como: ondas eletromagnéticas; direção de propagação; planos de vibração; polarizar uma onda; processos de polarização, além das características da visão binocular e os princípios básicos da estereoscopia.

Preferencialmente, a SE pode ser aplicada em uma turma onde os estudantes possuam os conhecimentos relacionados às características e propriedades das ondas eletromagnéticas. Entretanto, caso o professor disponha de mais tempo, poderá desenvolvê-la sem esse requisito, uma vez que no decorrer das atividades esses conhecimentos prévios poderão ser apresentados. Dessa forma, esta proposta didática pode ser trabalhada tanto na 3ª quanto na 2ª série do Ensino Médio.

Obviamente, a SE aqui apresentada é apenas uma das formas pelas quais o professor pode utilizar o estereoscópio no estudo da polarização da luz, pois promovendo algumas adequações, é possível abordar, também, outros conteúdos em física: óptica geométrica (formação das imagens nas lupas) e óptica da visão (formação das imagens na retina), bem como conteúdo de outros componentes curriculares: Biologia – visão binocular (percepção de profundidade) e os cones e bastonetes da retina (percepção das cores); Matemática – unidades de medidas (medida de distâncias entre objeto e câmera) e trigonometria (cálculo da distância horizontal da câmera na produção do par de imagens estereoscópicas) e Artes – manifestações artísticas (fotografia e cinema).

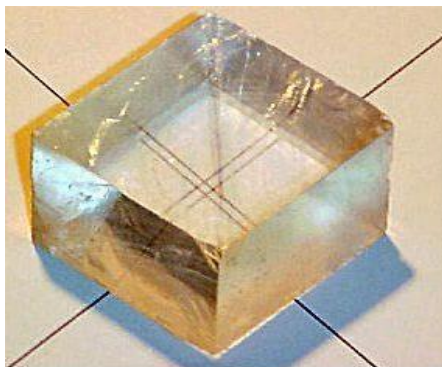
Outro aspecto a ser considerado na presente proposta é a possibilidade da participação dos estudantes na construção do estereoscópio e/ou na produção das imagens tridimensionais. Esse tipo de atividade pode proporcionar um

aprendizado mais prazeroso por agregar valores que vão além da mera sequência de um roteiro ou manipulação de números. Além disso, promove maior interação entre os sujeitos no processo da aprendizagem, favorecendo o compartilhamento de saberes e aproximando mais o ambiente escolar da investigação e do fazer científico.

Capítulo um: Contexto histórico e descrição físico-matemática

A literatura relata que o primeiro fenômeno relacionado com o que hoje denomina-se **polarização da luz**, foi observado em 1669 pelo dinamarquês Erasmó Bartholin, ao perceber que o cristal de calcita (Figura 1), conhecido também como cristal da Islândia (por ser muito abundante nessa ilha) produzia duas imagens de um mesmo objeto.

Figura 1 - Dupla imagem no cristal de calcita



Fonte: <http://www.pedraluz.com.br/>

O físico holandês Christian Huygens (1629-1695) ao fazer incidir sobre um **cristal de calcita** os raios de luz transmitidos por um outro cristal, também de calcita, percebeu que ao girar o segundo, em uma determinada orientação era produzida uma única imagem. Na época, isso mostrou que a luz que sai de um cristal de calcita não tem as mesmas propriedades que a luz comum (AZEVEDO et al., 2010).

LUZ: ONDA OU PARTÍCULA?

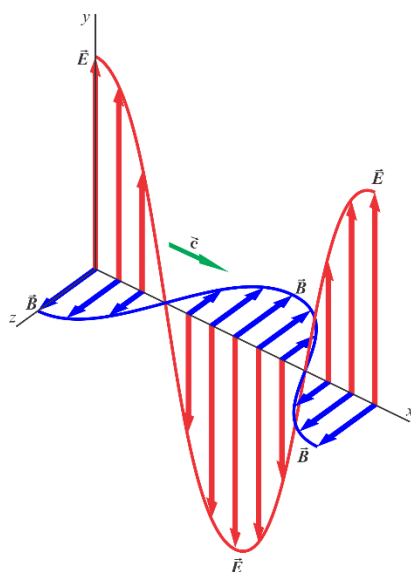
Christian Huygens e o físico inglês Isaac Newton (1643–1727) levantaram hipóteses para explicar o fenômeno. Para Huygens, que defendia a natureza ondulatória da luz, a velocidade de propagação da luz na calcita dependia da direção. Porém, essa hipótese não era capaz de explicar por que o segundo cristal não produzia também duas imagens. Segundo Newton, que defendia a natureza corpuscular, a partícula de luz tinha “lados”, sendo cada uma refratada de maneira diferente dependendo do “lado” da partícula que incide sobre a superfície do cristal de calcita. Após a passagem pela calcita as partículas em cada raio ficam com seus “lados” orientados (quando isso acontece se diz que a luz é polarizada, e a orientação dos “lados” define o que hoje se conhece como plano de polarização). Apesar de equivocada, a explicação deu origem ao termo “polarização”, devido à analogia com polos de um ímã.

Assim, o segundo cristal, desde que alinhado corretamente, não produz a dupla imagem porque todas as partículas incidem com o mesmo “lado”. Isso proporcionava um método de testar se a luz era polarizada (em outras palavras, se os “lados” das partículas que compunham o raio estão ou não alinhados). “Essa ideia não está longe do que se entende por correto atualmente” (AZEVEDO *et al.*, 2010, p. 1204).

A LUZ ENQUANTO ONDA ELETROMAGNÉTICA

Após cerca de 200 anos de embate entre as ideias de Huygens e Newton sobre a natureza da luz, James Clerck Maxwell, físico e matemático escocês, apresentou em 1873 a **Teoria Eletromagnética**, unindo eletricidade, magnetismo e ótica (antes acreditava-se não existir ligação alguma entre esses fenômenos). Maxwell previu a existência de ondas que envolviam oscilações de **campos elétricos** e **campos magnéticos** e que poderiam se propagar no espaço livre (vácuo) como **ondas transversais**, ou seja, os campos elétricos e magnéticos vibrando perpendicularmente à direção de propagação (Figura 2).

Figura 2 - Representação de uma onda eletromagnética.



Fonte: próprio autor

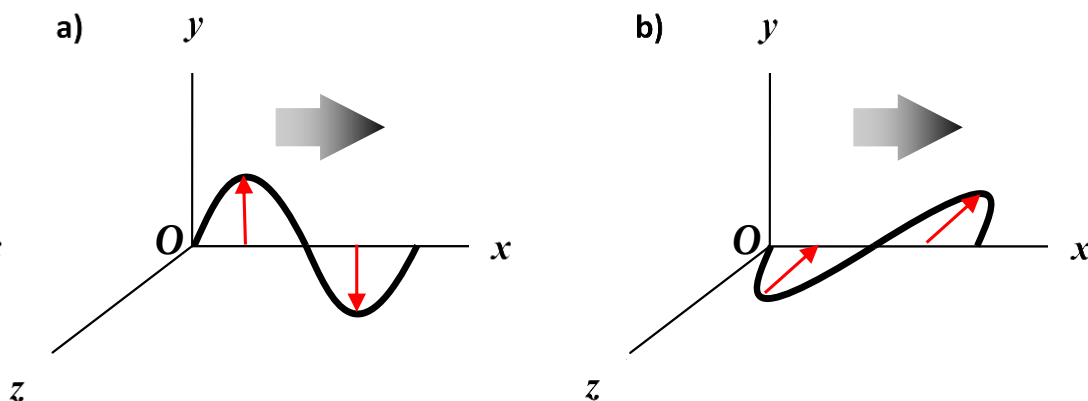
Maxwell encontrou teoricamente a velocidade de propagação dessas ondas, prevendo que seria numericamente igual a velocidade de propagação da luz (já conhecida à época), aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s. Essa previsão foi confirmada com os trabalhos do físico alemão Heinrich Hertz iniciados em 1887, quando um sinal elétrico foi emitido e detectado à distância, demonstrando que a luz era, de fato, uma onda eletromagnética. Hoje sabemos que a luz visível é produzida pelo movimento de elétrons que constituem as fontes de luz e representa apenas uma estreita faixa do **espectro eletromagnético**, compreendendo as radiações com frequências entre $4,3 \times 10^{14}$ Hz e $7,5 \times 10^{14}$ Hz.

O QUE SIGNIFICA POLARIZAR A LUZ?

As fontes comuns de luz: o sol, uma lâmpada e a chama de uma vela, por exemplo, emitem ondas (luz visível) que vibram em todos os planos possíveis, pois os milhares de elétrons ou moléculas que as compõe têm movimentos totalmente aleatórios e desorganizados. Esse tipo de luz é chamado de luz não polarizada. **Polarizar a luz** significa transmitir somente as ondas luminosas que vibram em uma determinada direção.

Uma onda é linearmente polarizada ao longo da direção y , quando a vibração ocorre somente no eixo y (Figura 3.a); quando a vibração ocorre somente no eixo z , dizemos que ela é polarizada ao longo da direção z (Figura 3.b).

Figura 3 - Representação de ondas polarizadas.



Fonte: próprio autor.

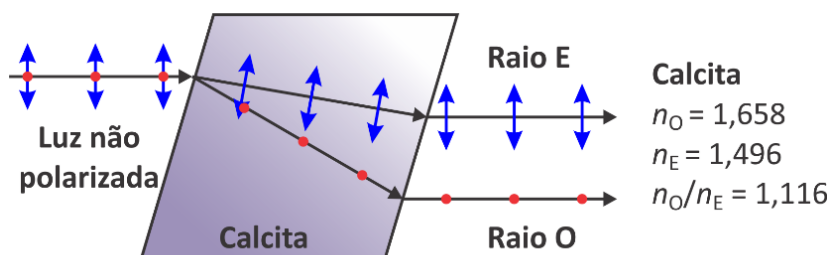
FORMAS DE POLARIZAR A LUZ

Existem alguns processos pelos quais a luz proveniente de uma fonte comum pode ser polarizada. Em alguns casos por processos naturais e em outros por meio de dispositivos desenvolvidos especialmente para essa finalidade. Vejamos:

Polarização por Birrefringência

A **birrefringência** é a propriedade óptica de determinados minerais transparentes (certos cristais como, a calcita, a turmalina e o quartzo por exemplo) que faz com que a radiação luminosa incidente seja dividida em dois feixes com polarizações ortogonais que se propagam com velocidades diferentes dentro do corpo do mineral (Figura 4).

Figura 4 - Polarização por dupla refração – materiais birrefringentes.



Raio ordinário O: o índice de refração n_O é o mesmo em todas as direções de propagação.

Raio extraordinário E: o índice de refração n_E depende da direção de propagação.

Fonte: adaptado de: <https://slideplayer.com.br/slide/1609675/>

Para entender como isso corre, consideremos um material composto de moléculas longas (onde seu comprimento seja muito maior que sua largura) arrançadas na substância com os seus eixos longos paralelos. Então, quando o campo elétrico oscilante passa por esta substância, os elétrons na substância respondem mais facilmente às oscilações na direção paralela aos eixos das moléculas do que eles responderiam caso o campo elétrico tentasse empurrá-los na direção perpendicular ao eixo molecular (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Desse modo temos respostas diferentes para a polarização em uma e outra direção. A refração para a luz polarizada perpendicularmente ao eixo ótico é chamada **refração ordinária**, enquanto a refração para a luz polarizada num plano que contém o eixo ótico é chamada **refração extraordinária**.

Por uma razão ou por outra, em uma substância birrefringente deve haver uma certa quantidade de alinhamento de moléculas não simétricas. Certamente um cristal cúbico, que tem a simetria de um cubo, não pode ser birrefringente. Mas os cristais longos em forma de agulha como, por exemplo, a calcita, a turmalina e o quartzo, sem dúvida contêm moléculas que são assimétricas, e esse efeito pode ser observado muito facilmente. Existem outros materiais que em certas condições, por serem compostos de longas moléculas, também podem se tornar birrefringentes: o celofane, o plástico quando submetido à tensões mecânicas, substâncias líquidas compostas por moléculas assimétricas quando submetidas a um campo elétrico (YOUNG; ROGER A. FREEDMAN, 2009).

Assim um feixe luminoso pode ser separado em dois feixes perpendicularmente polarizados a partir de luz não polarizada.

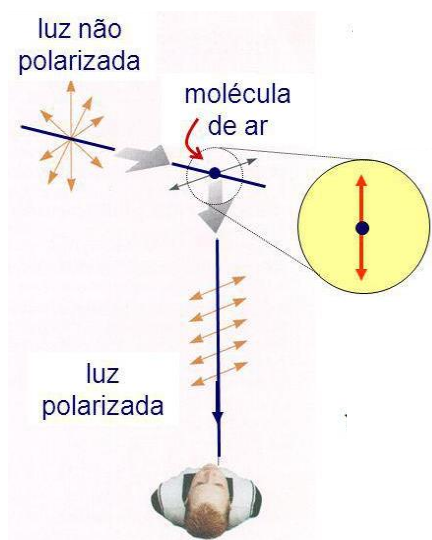
Polarização por espalhamento

Essa importante e curiosa propriedade da luz também se manifesta em fenômenos típicos e corriqueiros do dia a dia. Ao olhar para o céu durante o dia, a luz que vemos é a luz solar que foi absorvida e depois transmitida em várias direções. Esse fenômeno denomina-se **espalhamento**.

No espalhamento, uma radiação que incide sobre um núcleo espalhador é absorvida e irradiada e, dependendo do ângulo de espalhamento, a radiação será polarizada (Figura 5). Se considerarmos a luz espalhada em 90° , a vibração das partículas carregadas irradia na direção do observador somente quando a vibração for perpendicular à sua linha de visão, e assim a luz será polarizada ao longo da direção de vibração. Essa polarização por espalhamento vem da interação entre o campo elétrico da onda e as moléculas das partículas espalhadoras. O campo elétrico da radiação incidente produz um momento de dipolo² induzido sobre as partículas carregadas no ar. Esse dipolo elétrico, então, oscila em uma direção fixa gerando uma onda eletromagnética plana com intensidade máxima em um plano normal à direção da vibração das cargas, que será a onda espalhada. Dessa forma, além da cor azulada, dependendo da direção que observamos a luz do céu ela é também parcialmente ou totalmente polarizada (ORTIZ; LABURÚ, 2010).

² Um dipolo elétrico é um par de cargas de mesma magnitude e sinais contrários, q e $-q$, situadas em pontos diferentes a uma certa distância. A carga total do dipolo é zero. Se $\mathbf{l}$ é o vetor de posição da carga positiva em relação à negativa, então o momento de dipolo elétrico do dipolo é o vetor $\mathbf{p}=q\mathbf{l}$.

Figura 5 - Polarização por espalhamento.



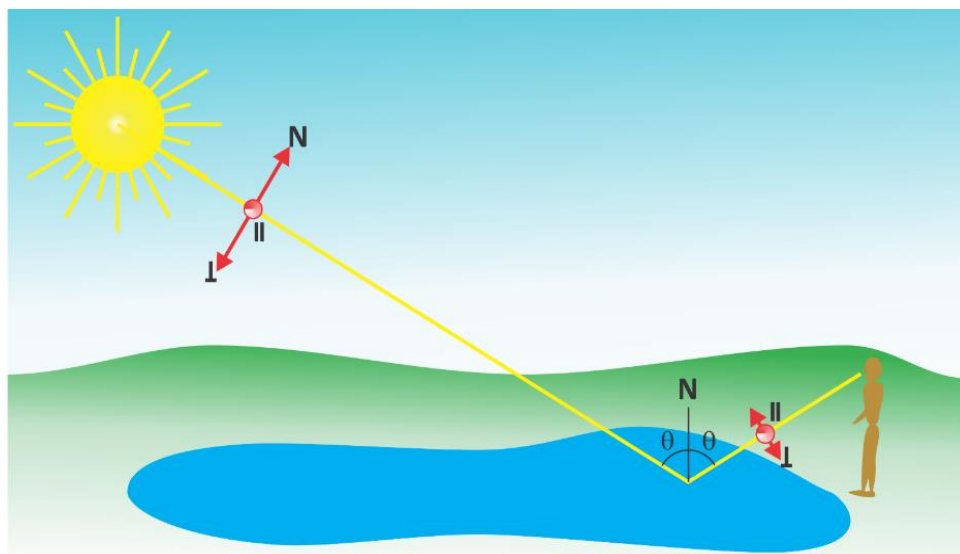
Fonte: adaptado de: <https://slideplayer.com.br>

A luz espalhada em um ângulo de 90° em relação à luz do sol incidente será parcialmente polarizada. Por esse motivo, quando usamos óculos com lentes polarizadas, o céu parece mais escuro quando olhamos em determinadas direções.

Polarização por reflexão

Quando a luz incide sobre uma superfície de um material dielétrico (não condutor), pode ocorrer a polarização parcial ou total da parte refletida (Figura 6).

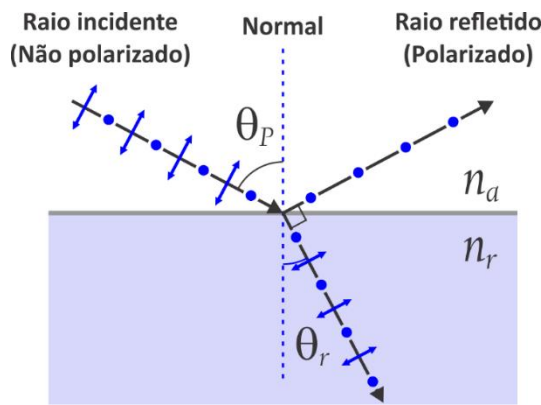
Figura 6 - Representação da polarização por reflexão.



Fonte: próprio autor.

Nessa situação, uma parte da luz é transmitida e outra é refletida, conforme mostra a Figura 7. As ondas provenientes da radiação luminosa se propagam nos mais variados planos, mas na maior parte dos ângulos de incidência, as ondas refletidas mais acentuadamente são aquelas em que o campo elétrico $\vec{E}$ é perpendicular ao plano de incidência, ou seja, paralelo ao plano da interface refletora. Nesse caso, as ondas são parcialmente polarizadas na direção perpendicular ao plano de incidência. Contudo, existe um determinado ângulo de incidência, denominado ângulo de polarização θ_p para o qual os componentes de $\vec{E}$ paralelos ao plano de incidência são totalmente refratados e os componentes de $\vec{E}$ perpendiculares ao plano de incidência são parcialmente refletidos e parcialmente refratados.

Figura 7 - Representação da Polarização em ângulo de Brewster.



Fonte: próprio autor.

O cientista inglês Sir David Brewster descobriu em 1812 que, se o ângulo de incidência coincidir com o ângulo de polarização θ_p , então o raio refletido é perpendicular ao raio refratado (figura 7). Assim, o ângulo de refração θ_r fica igual ao complemento de θ_p . Sendo n_a o índice de refração do meio em que se propaga o raio incidente e n_r o índice de refração do meio em que se propaga o raio refratado, então;

$$\theta_r = 90^\circ - \theta_p \text{ e } n_a \sin \theta_p = n_r \sin \theta_r$$

onde, encontramos;

$$n_a \sin \theta_p = n_r \sin(90^\circ - \theta_p) = n_r \cos \theta_p;$$

$$\operatorname{tg} \theta_p = \frac{n_r}{n_a} \text{ (Lei de Brewster para o ângulo de polarização)} \quad (1)$$

Para o caso particular em que n_a é o índice de refração do ar, então $\operatorname{tg} \theta_p = n_r$. Para a água $n_r = 1,33$, logo, $\theta_p = 53^\circ$.

Essa relação é conhecida como lei de Brewster. Ela foi obtida experimentalmente, mas é possível deduzi-la teoricamente a partir das equações de Maxwell.

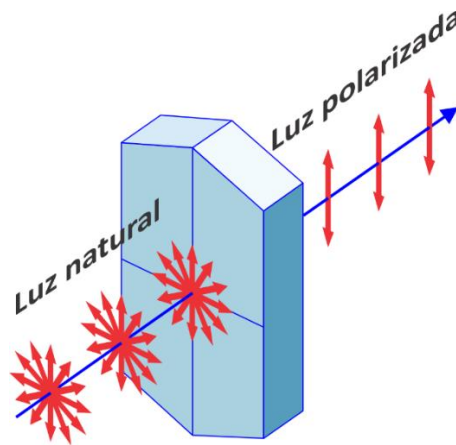
Em resumo, para incidência em ângulo de Brewster, a luz refletida é completamente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência. Em particular, se a polarização da luz incidente é paralela ao plano de incidência, o feixe refletido não será observado. Se a luz incidente é não polarizada, a luz refletida é parcialmente polarizada (ou totalmente polarizada para incidência em ângulo de Brewster), exceto para incidência normal.

A polarização por reflexão possibilita o uso eficiente de filtros polarizadores em óculos de sol. Quando uma superfície horizontal reflete a luz solar, o plano de incidência é vertical e a luz refletida contém majoritariamente luz polarizada na direção horizontal. Quando a reflexão ocorre na superfície lisa do asfalto ou de um lago, ela produz um ofuscamento indesejável. Os fabricantes de óculos de sol produzem lentes com eixo de polarização na direção vertical, a fim de que a maior parte da luz refletida com plano de polarização horizontal não atinja os olhos do observador. Os óculos também reduzem a intensidade global da luz não polarizada que incide em suas lentes em cerca de 50% (YOUNG; ROGER A. FREEDMAN, 2009).

Polarização por absorção seletiva

Em certos cristais e outras substâncias não só o índice de refração, mas também o coeficiente de absorção, é diferente para a luz polarizada em direções distintas. A partir dos mesmos argumentos que apoiaram a ideia de birrefringência, é compreensível que a absorção possa variar com a direção na qual as cargas são forçadas a vibrem em uma substância anisotrópica (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Essa forma de polarização, também conhecida como **dicróismo**, consiste na absorção seletiva da onda linearmente ou circularmente polarizada. Um cristal de turmalina, por exemplo, absorve a radiação em determinados planos de oscilação, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Representação da polarização por absorção seletiva.



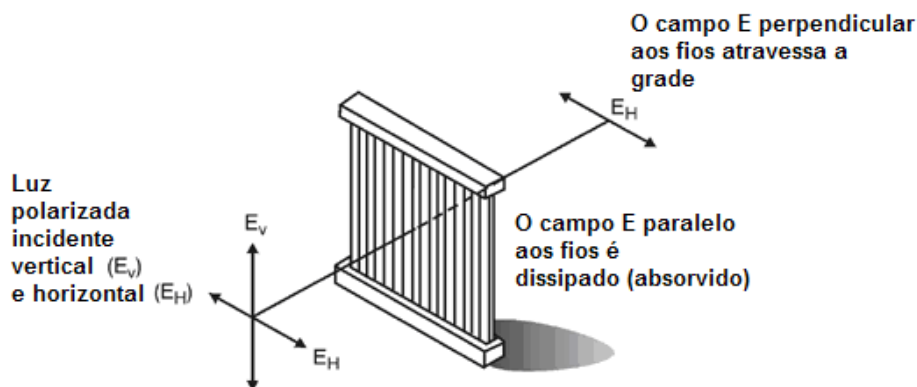
Fonte: próprio autor.

O entendimento dessa forma de polarização deu origem ao desenvolvimento de películas polarizadoras cuja concepção descreveremos a seguir.

As ondas produzidas por uma emissora de rádio, por exemplo, são, em geral, linearmente polarizadas. Em uma antena de TV que possui um elemento na direção horizontal, são captadas ondas polarizadas na direção horizontal, e, se o elemento da antena estiver disposto na direção vertical, serão captadas ondas polarizadas na direção vertical, visto que os elétrons livres do metal têm maior grau de liberdade para movimentos na direção ao longo do comprimento do elemento condutor. Mas no caso da luz visível, a situação é mais complicada, pois as fontes comuns emitem luz não polarizada. Nesse caso, a emissão total é resultado da emissão individual de cada molécula que constitui a fonte de luz. A luz emitida por uma única molécula pode ser linearmente polarizada como a onda emitida por uma antena de rádio. Todavia, como o número de moléculas de qualquer fonte comum de luz é muito grande, existe uma infinidade de ondas polarizadas aleatoriamente em todas as direções transversais possíveis (YOUNG; ROGER A. FREEDMAN, 2009).

Para se conseguir polarizar um feixe de luz natural é necessário a utilização de filtros. Esses filtros apresentam diferentes detalhes de construção, definidos de acordo com o comprimento de onda da luz a ser polarizada. Para micro-ondas com comprimentos de onda da ordem de alguns centímetros, um bom filtro polarizador consiste de uma grade de fios condutores próximos e paralelos, isolados entre si e igualmente espaçados (Figura 9).

Figura 9 - Representação esquemática de filtros construídos para polarizar uma radiação incidente.



Fonte: <http://www.novacon.com.br/basean3.htm>

A onda que possui um campo $\vec{E}$ paralelo aos fios, provoca o movimento dos elétrons que estão livres para mover-se ao longo do comprimento dos fios. Essa corrente resultante dissipa boa parte da energia proveniente das ondas na forma de calor com a taxa I^2R , de forma que as ondas que atravessam a grade possuem amplitudes menores do que as amplitudes das ondas incidentes. Por outro lado, as ondas que chegam a grade com um campo $\vec{E}$ perpendicular a direção de disposição dos fios, atravessam-na praticamente sem nenhuma alteração, pois os elétrons não podem se mover através do ar entre os fios (YOUNG; ROGER A. FREEDMAN, 2009). Portanto, um feixe de ondas que passa através desse tipo de filtro emerge polarizado em um plano perpendicular ao plano dos fios.

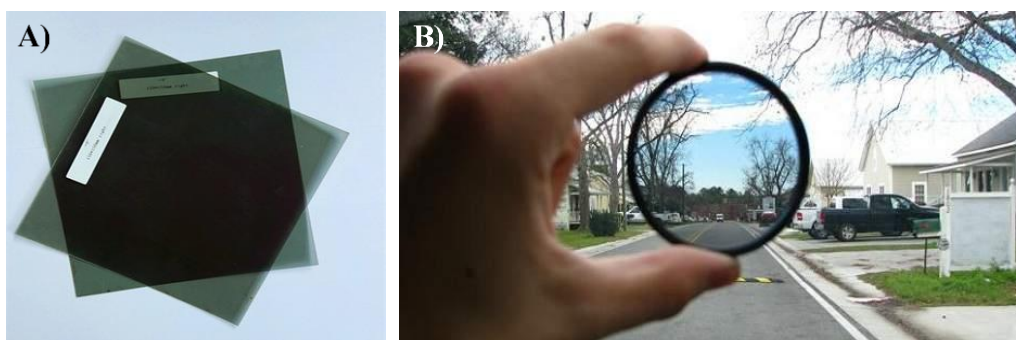
O polarizador sintético

Uma forma simples de polarizar a luz visível é usando o filtro sintético inventado em 1938 por Edwin H. Land, cientista norte-americano. Esse filtro, conhecido como polaroide³ (Figura 10.a), é amplamente usado em óculos de sol e em câmeras fotográficas, por exemplo. Funciona baseado no princípio da absorção seletiva, onde um dos componentes da onda que incide sobre ele é absorvido de forma muito mais acentuada do que o outro (Figura 10.b).

³ Polaroides ou polarizadores sintéticos são largamente utilizados para diversas finalidades. O presente trabalho não tem a pretensão de fazer um levantamento e/ou descrição geral de suas aplicações. Assim, nos deteremos a descrever os princípios básicos envolvidos na construção de imagens 3D e mostrar como esse efeito pode ser obtido com a utilização desses polarizadores.

Um **filtro polaroide** transmite mais de 80% da intensidade da luz polarizada em uma direção paralela a certo eixo do material, chamado **eixo de polarização**, porém transmite menos de 1% da luz polarizada em uma direção perpendicular a esse eixo (YOUNG; ROGER A. FREEDMAN, 2009).

Figura 10 - Imagens de Filmes polaroide.

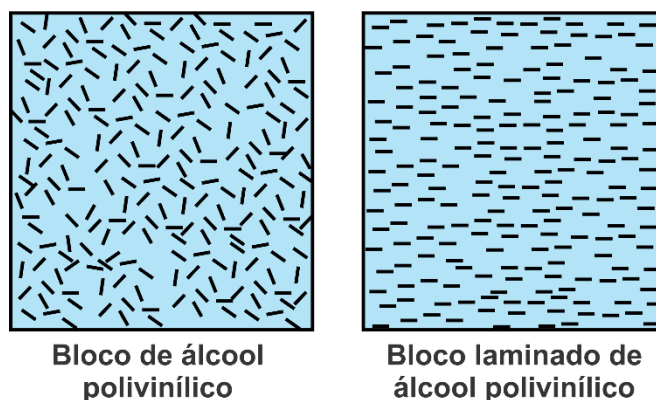


Fonte: <http://nanotechcameras.blog.br/tag/canon/>

A construção do polarizador sintético para a luz segue o mesmo princípio do filtro para micro-ondas. O polaroide consiste em uma fina camada de pequenos cristais de herapathite (um sal de iodo e quinina), todos alinhados paralelamente e incorporado em um filme de polímero de nitrocelulose transparente. Esses cristais absorvem a luz quando as oscilações estão em uma direção, mas não absorvem tanto quando as oscilações estão em outra direção. Um tipo comum de filme polaroide é feito utilizando-se uma lâmina de *PVA* (álcool polivinílico) que contém longas cadeias de hidrocarbonetos⁴ dispostas aleatoriamente. Quando a lâmina sofre uma deformação (estiramento), produzida por uma tração a quente (60°), as longas cadeias de hidrocarbonetos se alongam segundo a mesma direção da deformação. Em seguida as lâminas são impregnadas com iodo afim de se tornarem condutoras para frequências óticas (aprox. 10^{14}Hz) e absorverem a luz com polarização paralelas às cadeias moleculares (DUMKE; JR, 1982).

⁴ Na química, um hidrocarboneto é um composto químico constituído por átomos de carbono e de hidrogênio unidos tetraedricamente por ligação covalente assim como todos os compostos orgânicos.

Figura 11 - Cadeias carbônicas em um filme polarizador.

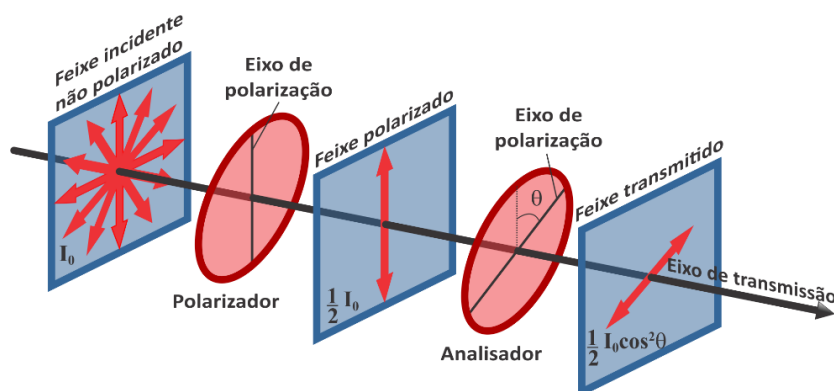


Fonte: próprio autor.

Um polarizador ideal transmite 50% da intensidade da luz não polarizada incidente. Uma vez que a luz completamente não polarizada apresenta estados de polarização aleatórios, podemos considerar que, na média, os dois componentes do campo $\vec{E}$ (um paralelo e outro perpendicular ao eixo do polarizador) são iguais.

É possível analisar agora o que ocorre quando a luz polarizada que emerge de um polarizador incide sobre um segundo polarizador, como indicado na Figura 12.

Figura 12 - Representação esquemática da Lei de Malus.



Fonte: próprio autor.

Supondo que os eixos de polarização dos polarizadores estejam dispostos em um ângulo θ , que intensidade da luz emergirá do segundo polarizador, ou analisador?

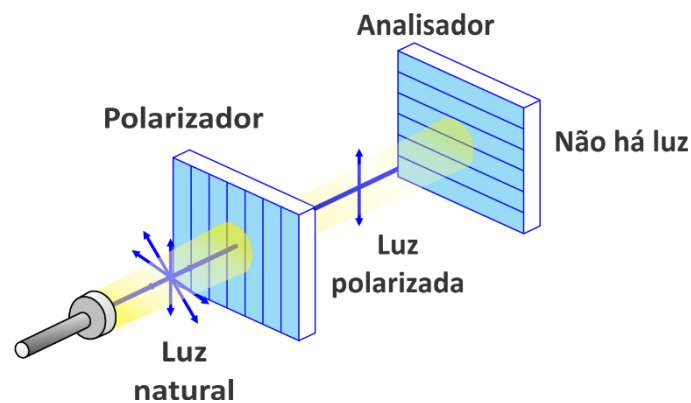
A luz incidente no analisador pode ser decomposta em um componente perpendicular ao eixo de transmissão, proporcional a $\sin \theta$, e um componente paralelo ao eixo de transmissão, proporcional a $\cos \theta$. A amplitude da luz que emerge do polaroide-analisador é somente a parte cossenoidal; o componente $\sin \theta$ é absorvido.

A amplitude que “sai” pelo polaroide é menor do que a amplitude que “entrou”, por um fator $\cos \theta$. Sabe-se que a intensidade de uma onda eletromagnética é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. Logo, a razão entre as intensidades das ondas incidente e transmitida é igual a $\cos^2 \theta$ (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2009). Consequentemente, a intensidade da luz que emerge do analisador é:

$$I = I_{\text{máx}} \cos^2 \theta \quad (2)$$

Onde $I_{\text{máx}}$ é a intensidade máxima da luz transmitida (para $\theta = 0^\circ$) e I é a intensidade transmitida para um dado ângulo θ . A intensidade da luz transmitida será igual a zero quando o eixo do polarizador estiver cruzado com o do analisador, ou seja, quando $\theta = 90^\circ$ (Figura 13).

Figura 13 - Polarizadores com eixos em direções perpendiculares.



Fonte: próprio autor.

Essa relação, descoberta experimentalmente por Etienne Louis Malus em 1809, denomina-se **Lei de Malus** e só é válida quando a luz incidente sobre o analisador já estiver polarizada (YOUNG; ROGER A. FREEDMAN, 2009).

As relações anteriores foram obtidas considerando polarizadores ideais. Um polarizador real é caracterizado por transmitâncias⁵ principais K_1 e K_2 :

K_1 é a fração transmitida da intensidade na polarização desejada ($0 \leq K_1 \leq 1$)

K_2 é a fração transmitida da intensidade na polarização não desejada ($0 \leq K_2 \leq 1$)

K_1 deve ser maior possível e K_2 menor possível, por isso a razão K_1/K_2 pode ser considerada um indicador de qualidade do polarizador.

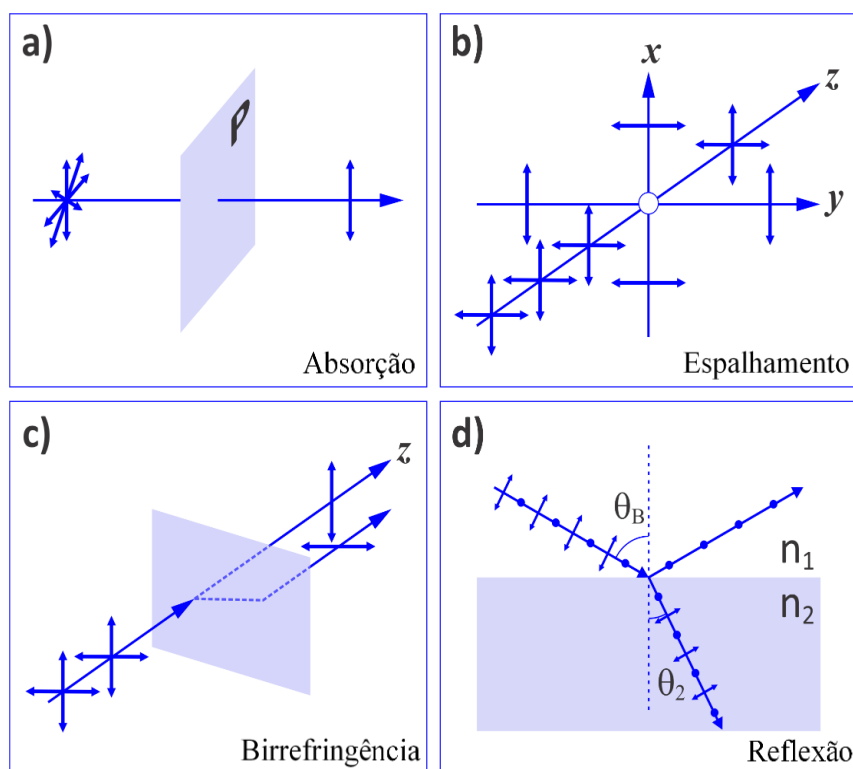
O polarizador sintético é utilizado em várias aplicações, dentre as quais:

- **Mostrador de cristal líquido:** são essenciais na construção de displays e monitores em geral.
- **Cinema 3D:** sistema de projeção e óculos polarizadores adequados
- **Óculos de pescador e de sol:** reduz a luz refletida na água e a luz espalhada pelo céu.
- **Filtros fotográficos:** reduzem reflexos e escurecem o céu.
- **Filtros para microscópio:** permitem acentuar contraste.
- **Filtro antirreflexo:** polarizador circular permite eliminar reflexos em mostradores.
- **Chaves óticas:** baseadas em efeitos *Kerr* (efeito, no qual um campo elétrico é capaz de produzir birrefringência em certos líquidos).

⁵ Em óptica e espectroscopia, Transmitância é uma grandeza que representa a fração da luz incidente, com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria. É um fenômeno relacionado diretamente à absorbância.

Quadro resumo – Processos de polarização

Quadro 1 - Resumo esquemático dos processos de polarização da luz

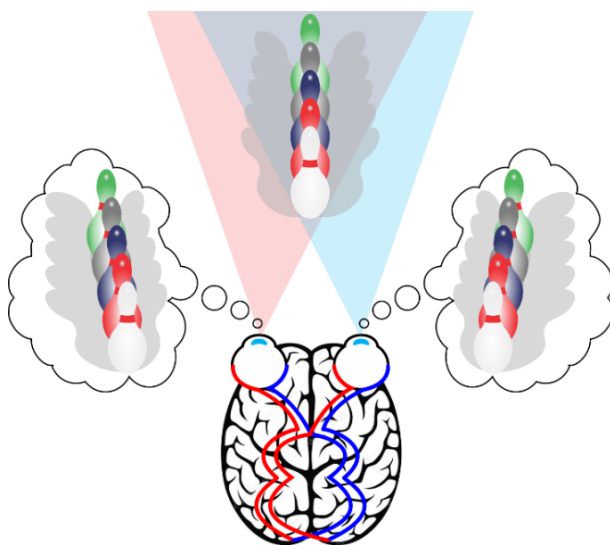


Fonte: adaptado de Hecht (2002).

ESTEREOSCOPIA, POLARIZAÇÃO DA LUZ E O CINEMA 3D

A concepção de imagens tridimensionais é baseada na técnica da **estereoscopia**: utilização da sobreposição de duas imagens planas de um mesmo objeto e ligeiramente distintas devido a diferença de enquadramento, o que provoca a sensação de profundidade. Estereoscopia é uma palavra que tem origem em dois termos gregos que representam: “visão” e “sólido” (TOMOYOSE, 2010).

Figura 14 - Representação esquemática da visão binocular do homem.



Fonte: <http://www.vision3d.com/stereo.html>

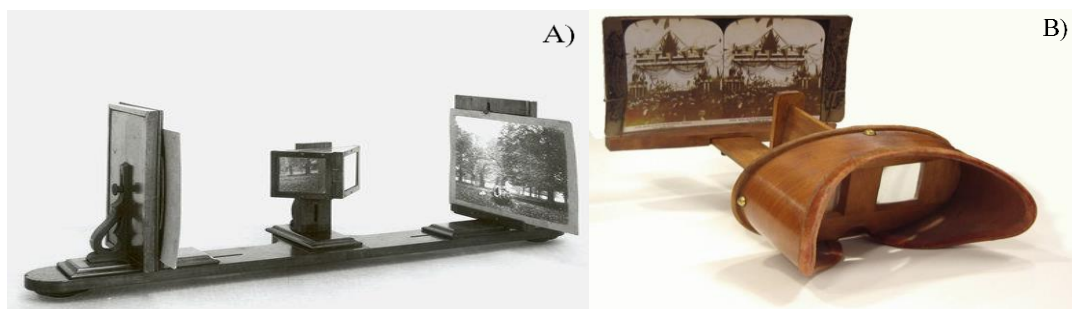
Essa técnica é uma forma de simular a **visão binocular** do homem e de alguns animais, pois embora apenas uma parcela das aves possua sinais de visão estereoscópica, praticamente todos os mamíferos possuem este recurso ainda que de forma rudimentar. A visão estereoscópica advém da natureza óptica de nossa fisiologia, pelo fato de possuímos dois olhos voltados para a mesma direção e separados um do outro por uma distância média de 6,5 cm. As duas imagens, uma de cada olho, cada uma processada por um lado do de nosso cérebro, forma uma imagem final única (MASCHIO, 2008), conforme Figura 14.

O entendimento desse processo proporcionou o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que provocam a sensação visual de profundidade em imagens planas. No começo do século XIX, antes mesmo da consolidação da fotografia, o cientista inglês Sir Charles Wheatstone (1802-1875), partindo de experiências de Leonardo da Vinci e dos binóculos primitivos, apresentou o **estereoscópio**, em 1838. (MASCHIO, 2008). O princípio de funcionamento é simples: dois espelhos em ângulo de noventa graus colocados em frente a cada olho do observador, o qual vê as fotografias (ou eventualmente desenhos) de um

par estéreo⁶ que são localizadas paralelas e a cada lado, a noventa graus da visão dele, à esquerda e à direita (LUNAZZI *et al.*, 2015).

Em sua primeira exibição, Charles Wheatstone utilizou como imagens dois pares de figuras geométricas desenhadas cuidadosamente (Figura 15.a). Posteriormente, o escocês Sir David Brewster (1781-1868), combinando o estereoscópio de wheatstone e a fotografia (outra invenção recente à época), aperfeiçoou o dispositivo utilizando lentes no lugar dos espelhos do estereoscópio original (Figura 15.b), criando assim as primeiras câmeras fotográficas binoculares. Os novos estereoscópios fizeram sucesso por permitirem tirar ou ver cartões em terceira dimensão.

Figura 15 - Estereoscópio de wheatstone (a) e o estereoscópio aperfeiçoado por Brewster (b).



Fonte: <http://setimacabine.com.br/a-historia-de-seculos-do-3d/>

Com o desenvolvimento da fotografia e dos sistemas ópticos, o estereoscópio também foi sendo aperfeiçoado. A Figura 16.a mostra um homem visualizando imagens em um estereoscópio que utiliza espelhos dispostos em ângulo de 45° para fazer a junção do par de imagens que foram produzidas em computador e a e Figura 16.b mostra um outro tipo de estereoscópio que consiste de uma pequena caixa que lembra um binóculos, na qual um par de slides estéreo é colocado em um dos lados e o lado oposto possui dois orifícios para que o observador possa posicionar os olhos.

⁶ Refere-se ao conjunto de duas imagens obtidas em ângulos de visão diferentes de uma cena e que serão processadas de forma a transmitir a sensação de profundidade ao observador.

Figura 16 – Jovem visualizando um estereoscópio (a) e slides estéreos (b).

Fonte: Lunazzi *et al.* (2015)

São várias as técnicas que nos permitem a visualização de imagens tridimensionais estereoscópicas, mas os princípios básicos envolvidos são os mesmos: obter duas imagens (ou vídeos) de um mesmo objeto ou paisagem, com um deslocamento angular horizontal adequado, e depois fazer com que cada olho visualize apenas uma das imagens. A fusão e ajuste dessas duas imagens pelo cérebro nos dão a sensação de imersão e profundidade. Quase sempre é necessário se fazer uso de óculos especiais para separar a informação que cada olho deve receber. Para isso, são utilizadas técnicas associadas a alguma propriedade ou fenômeno ótico. Vejamos algumas:

Efeito Pulfrich

Baseado na característica da visão humana de perceber mais lentamente a luz menos intensa. O observador deve usar um filtro que torna a visão mais escura para um dos olhos, assim, ao observar uma animação, os olhos têm velocidades diferentes de percepção, levando a um pequeno deslocamento entre as imagens vistas por cada olho, o que gera a sensação de profundidade e o efeito tridimensional. O inconveniente dessa técnica é o pouco controle da profundidade e a limitação de funcionar somente com cenas em movimento.

ChromaDepht

Esta técnica utiliza as cores para definir a profundidade dos elementos. As lentes dos óculos com tecnologia ChromaDepth são capazes de desviar a luz de acordo com a sua cor, proporcionando a disparidade entre a visão de cada olho provocando assim o efeito tridimensional. Nessa técnica à medida que a cor de um objeto se aproxima do vermelho, mais próximo o objeto parece estar do observador e quanto mais a cor do objeto se próximo do azul, mais distante parece estar do observador.

Anáglifo

Técnica que consiste em dividir a imagem em seu espectro de cor e enviar uma faixa delas para cada olho. Para visualizar uma imagem ou vídeo em anáglifo o observador deve fazer uso de óculos especiais com filtros de cores (azul e vermelho) a fim de permitir a passagem somente das cores selecionadas para cada olho. Dessa forma o olho que vê através da lente vermelha percebe apenas luz na faixa do espectro relativa à cor vermelha e o olho que vê através do filtro azul percebe apenas a luz nessa faixa do espectro. Essa foi a técnica que levou as projeções 3D para as salas do **cinema** (Figura 17) durante os anos 50 e ainda hoje é comum em notebooks, jogos e kits educacionais, por exemplo.

Polarização da Luz

A luz polarizada pode ser utilizada no campo da estereoscopia como uma técnica para separar a informação recebida por cada olho e assim possibilitar a visualização estereoscópica.

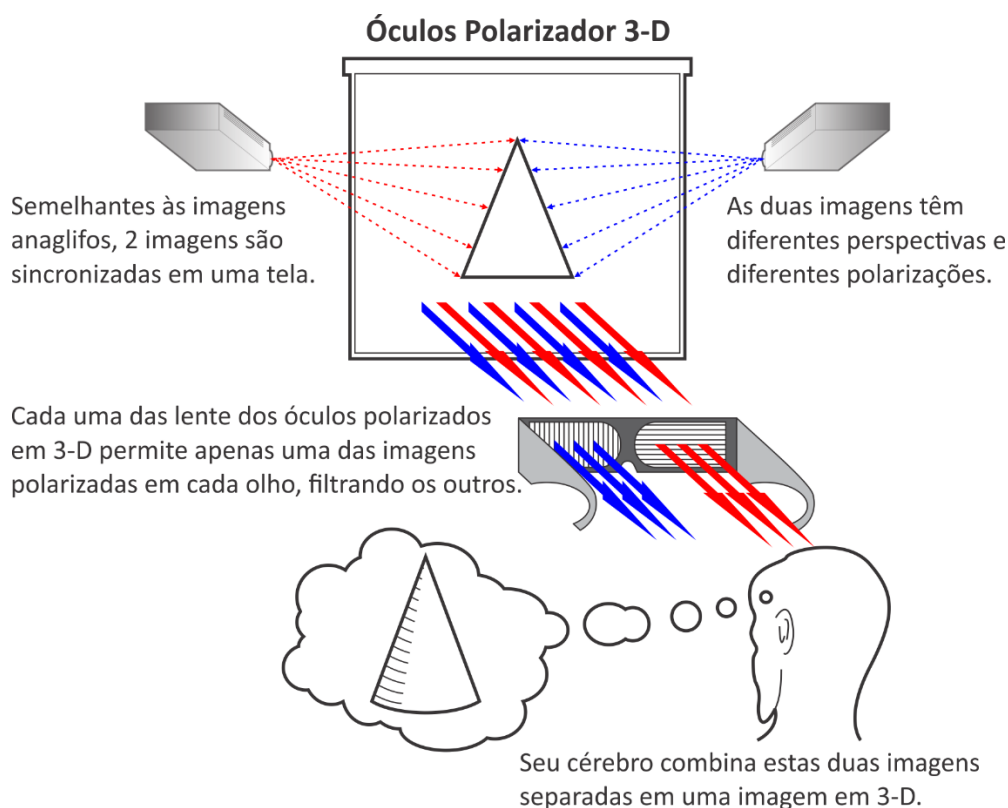
Figura 17 - Imagens 3D em salas de cinema.



Fonte: <https://www.avmakers.com.br/blog/tag/cinema/page/2/>

Para isso é necessário que as imagens esquerda e direita estejam sobrepostas, mas com polarizações diferentes, em uma tela capaz de manter a polarização da luz incidente de forma que um observador, utilizando óculos com filtros polarizadores apropriados, receba a imagem correta para cada olho. (TOMOYOSE, 2010). A Figura 18 descreve basicamente um sistema de exibição 3D utilizando a técnica de polarização da luz.

Figura 18 - Representação esquemática do sistema 3d por polarização.



Fonte: <http://www.vocesabia.net>

Em vez de usar cores para filtrar as imagens que cada olho deve observar, utiliza-se a **polarização da luz** para fazer essa separação. Nos óculos 3D cada lente é polarizada de forma diferente, filtrando apenas as ondas de luz polarizadas na mesma direção. A tela é desenvolvida de forma a manter a polarização correta quando a luz do projetor é refletida. A vantagem desse processo em relação aos demais, é a possibilidade de observar o efeito tridimensional tanto em imagens estáticas quanto em movimento. Além disso, todo espectro de cores é preservado. O ápice desse novo formato ocorreu em 2009 com o lançamento do filme Avatar. A qualidade das imagens e o sentido de profundidade em 3D ofereceram ao espectador uma sensação imersiva, que não encontra paralelo em nenhuma experiência anterior em 3D (CHRISTOFOLI, 2011).

Capítulo dois: Construção do estereoscópio

Primeiramente vamos listar os materiais e instrumentos utilizados. Em seguida descreveremos a construção do aparato.

MATERIAIS

Celular



Lanternas de LED



Lupas



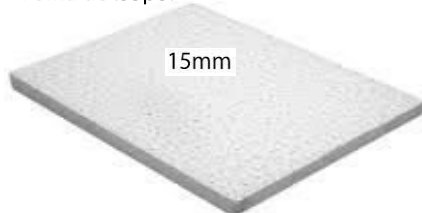
Tinta spray



Películas Polarizadoras



Folha de isopor



15mm

Papel cartolina



Palitos de picolé



Régua



Estilete



Tesoura



Pistola de cola quente



Velcro adesivo



Cola tipo super bonder



Fita durex



Fonte: imagens obtidas da internet

- ✓ 1 Celular
- ✓ 2 Lanternas de LED
- ✓ 2 Lupas – distância focal de aproximadamente 315mm
- ✓ 2 Bases planas (madeira, compensado ou MDF)
- ✓ Tela de compensado (lisa) ou MDF
- ✓ Tinta de pigmentos metálicos (spray)
- ✓ Película polarizadora
- ✓ 1 Folha de isopor (15mm)
- ✓ 1 Cartolina
- ✓ Palitos de picolé (20 unidades ou mais)
- ✓ Régua, fita métrica ou trena
- ✓ Estilete
- ✓ Pistola de cola quente e cola quente (um ou dois bastões)
- ✓ Fita durex
- ✓ Velcro (adesivo, se possível)
- ✓ Cola instantânea ou similar

O quadro abaixo informa onde adquirir os materiais e instrumentos bem como o preço médio praticado à época da construção do aparato:

Quadro 2 – Materiais e instrumentos.

Materiais	Onde/como adquirir	Preço médio (unidade)
Celular	X	X
Lanternas de LED (2)	Lojas de equipamentos elétricos ou variedades;	R\$ 12,00
Lupas (2)	Livrarias, armarinhos, lojas de variedades;	R\$ 5,00
Bases planas	Marcenaria e oficinas de moveis;	Reutilização
Tela de compensado, MDF ou qualquer superfície plana e lisa.	Lojas de materiais para construção: estruturas em metais;	Reutilização
Tinta de pigmentos metálicos - <i>spray</i> (1)	Lojas de materiais de construção, variedades e livrarias;	R \$ 16,00
Películas polarizadoras	Monitores de PC, tablets e notebooks descartados;	Reutilização
Folha de isopor - 15mm (1)	Armarinhos, lojas de material escolar e de festas;	R\$ 2,00
Cartolina (1)	Armarinhos, variedades e lojas de material escolar;	Reutilização
Palitos de picolé	Armarinhos, lojas de material escolar ou variedades;	R \$ 0,49 o pacote com 100 unidades ou reutilização
Régua, fita métrica ou trena	Armarinhos, lojas de material escolar, lojas de materiais de construção;	R\$ 5,00
Estilete	Armarinhos, lojas de material escolar ou variedades;	R\$ 3,50

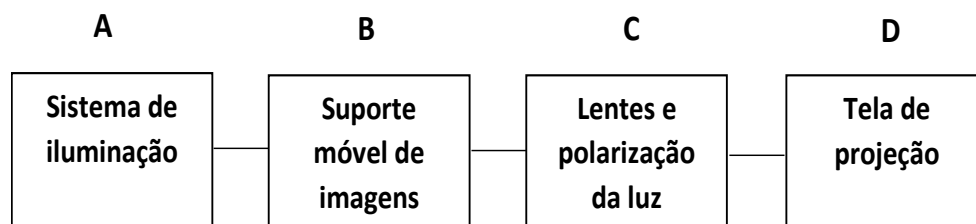
Tesoura	Armarinhos, lojas de material escolar ou variedades;	X
Pistola de cola quente	Lojas de material escolar, loja de artigos para festas;	R\$ 16,00
Bastões de cola quente (1)	Armarinhos, lojas de material escolar e de festas;	R\$ 2,50
Velcro adesivo – macho e fêmea	Armarinhos, variedades e lojas de tecidos;	R\$ 17,00
Fita durex (1)	Armarinhos, lojas de material escolar ou variedades;	R\$ 1,90
Cola instantânea (1)	Armarinhos, lojas de material escolar ou variedades;	R\$ 9,99
	Total	R\$ 108,39

Fonte: próprio autor.

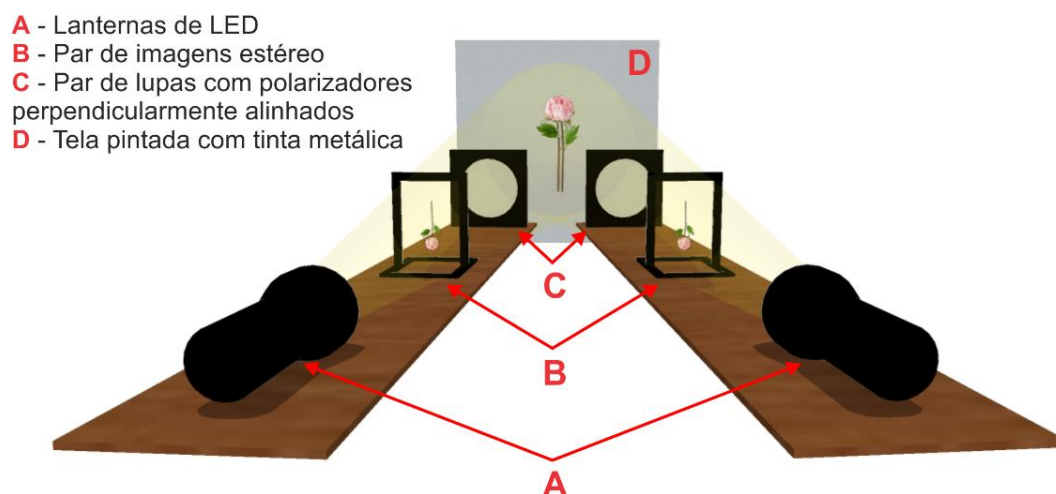
ESTRUTURA DO ESTEREOSCÓPIO

O estereoscópio pode ser dividido em 4 blocos, conforme mostra a Figura 19:

Figura 19 - Diagrama em blocos do estereoscópio.



Fonte: próprio autor.



Fonte: próprio autor.

A seguir, descreveremos os detalhes construtivos:

Sistema de iluminação (A)

As lanternas têm a função de iluminar o par de imagens estereoscópicas que serão projetadas. Utilizamos duas lanternas de LED do mesmo modelo (Figura 20) que possuem um grupo de 9 LEDs dispostos em um refletor de 70mm de diâmetro (quanto mais próximo do diâmetro das lupas - 100mm - melhor). Escolha lanternas com boa intensidade luminosa, pois as películas polarizadoras das lentes e dos óculos diminuem a intensidade da luz.

Figura 20 - Fontes de luz.

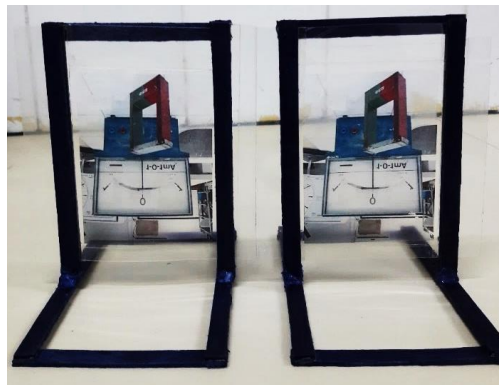


Fonte: arquivo próprio.

Suportes de fixação das imagens (B)

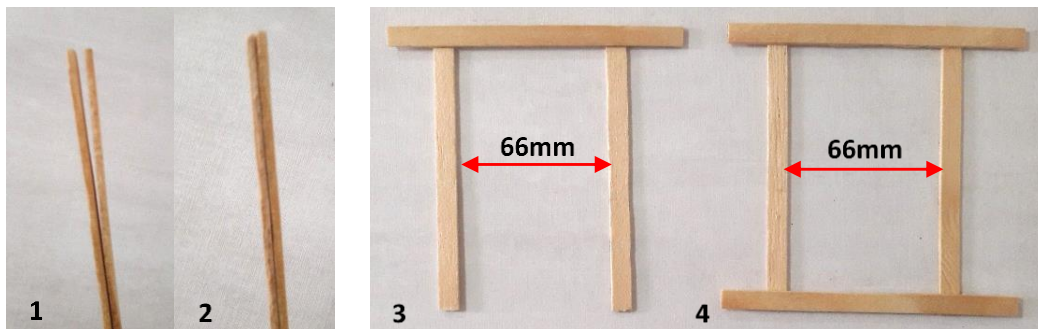
Esses suportes em formato de moldura (Figura 21) devem acomodar o par de imagens. A parte interna onde as imagens em transparências devem ser encaixadas possuem uma área de 66mm × 86mm.

Figura 21 - Suportes do par de imagem estéreo.



Fonte: arquivo próprio.

Figura 22 - Montagem dos suportes das imagens (a).



Fonte: arquivo próprio.

Para seleccionar os palitos, coloque-os aos pares um sobre o outro e confira alinhamento lateral. Na Figura 22 temos: **1** – palitos desalinhados; **2** – bom alinhamento dos palitos. O suporte é construído a partir da montagem de duas partes conforme Figura 22 (3 e 4). Para cada suporte precisaremos confeccionar: duas peças iguais a indicada na Figura 22-3 e uma peça igual a indicada na Figura 22-4 . Uma distância de 66mm entre os palitos que estão na vertical deve ser deixada para que o par de imagens estereoscópicas seja colocado.

Pegue as duas partes (Figura 22-3) e coloque-as uma sobre a outra (de forma que os palitos que estão dispostos na vertical fiquem encostados) e cole suas extremidades. A cola não deve ser colocada entre um palito e outro (uma pequena quantidade nas laterais das extremidades é suficiente), pois os palitos

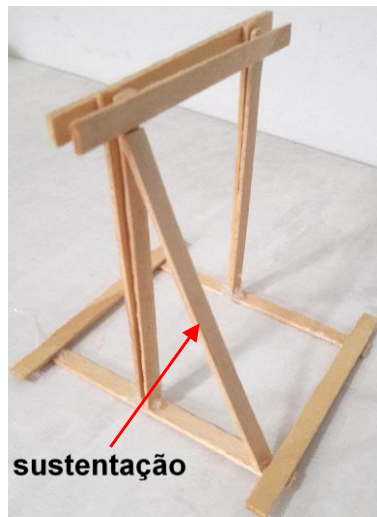
devem ficar bem encostados ao longo de seus comprimentos (Figura 22-2). Em seguida, aplique um pouco de cola em cada um dos palitos dispostos na horizontal da outra parte (Figura 23-2) que servirá de apoio e cole nele as extremidades da parte que deverá acomodar as imagens. Caso necessário, acrescente mais palitos (conforme Figura 24) para alinhar e dar mais resistência aos suportes.

Figura 23 - Montagem dos suportes das imagens (b).



Fonte: próprio autor.

Figura 24 -Montagem dos suportes das imagens (c).



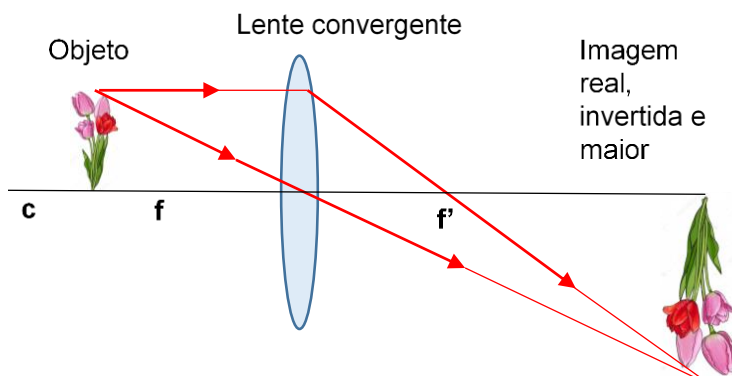
Fonte: próprio autor.

Lentes e polarização da luz (C)

Essa parte do estereoscópio tem dupla função: uma é fazer a ampliação do par de imagens colocadas no suporte móvel; a outra, é fazer com que as imagens sejam projetadas em planos de polarização perpendiculares. Tomando os devidos

cuidados quanto a posição do objeto (posição do suporte móvel), a imagem será projetada sobre o anteparo conforme mostra a Figura 25.

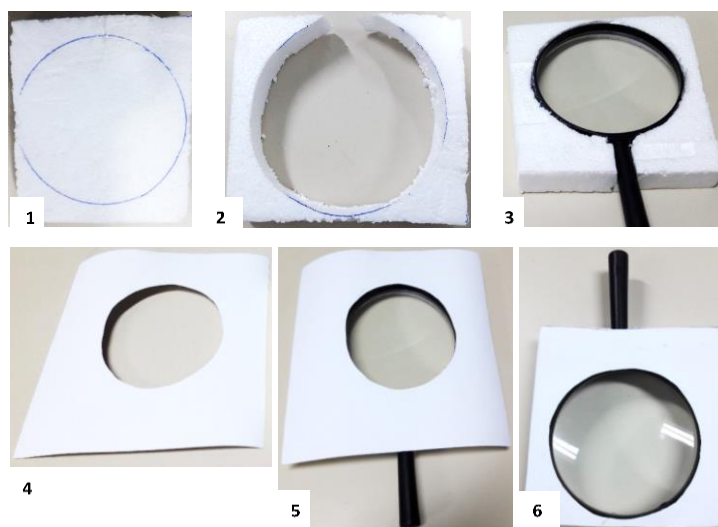
Figura 25 - Formação de imagem em uma lente convergente (lupa).



Fonte: próprio autor.

Para a ampliação das imagens, utilize duas lupas de 100mm de diâmetro e distância focal de aproximadamente 315mm (quanto menor a distância focal maior a ampliação). Não é recomendável utilizar lupas com diâmetro menores, isso pode provocar distorções nas imagens projetadas em regiões próximas às bordas das fotografias. Fixe as lupas em uma estrutura de isopor; recubra com cartolina e, para a polarização da luz, coloque películas polarizadoras sobre as lentes de cada uma das lupas. Realize cada uma das etapas conforme a Figura 26.

Figura 26 - Montagem das lentes de projeção.



Fonte: arquivo próprio.

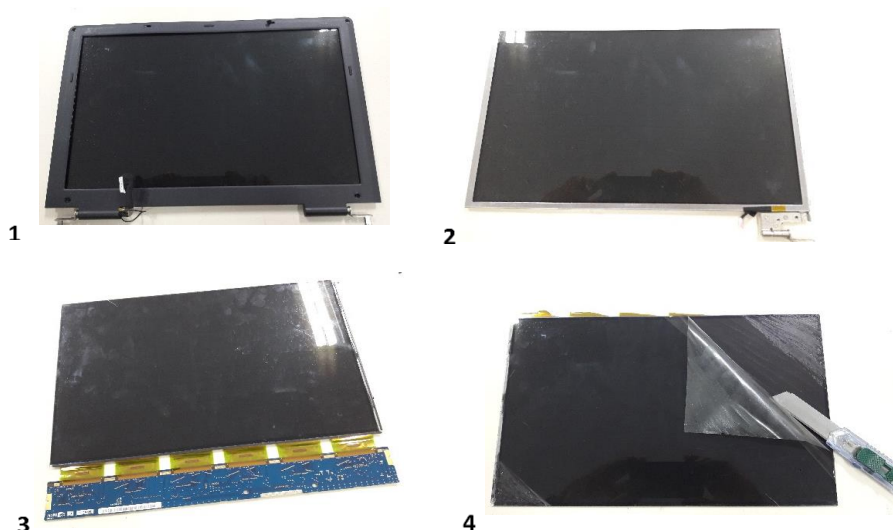
- 1 – Recorte um pedaço de isopor em um tamanho que comporte as lupas. Utilize a própria lupa para marcar a área a ser recortada;
- 2 – Utilize um estilete para recortar a área demarcada;
- 3 – Posicione a lupa na região que foi cortada e aplique cola quente no espaço entre a borda da lupa (parte de plástico que contorna a lente) e o isopor;
- 4 – Para dar um melhor acabamento, recubra o isopor com cartolina ou qualquer outro tipo de papel;
- 5 – Utilize cola quente ou cola de isopor (a secagem é um pouco mais lenta) para fixar o recobrimento deixando completamente livre a área das lentes;
- 6 – Aparência do suporte após a realização das etapas anteriores.

REMOÇÃO DAS PELÍCULAS POLARIZADORAS

Películas polarizadoras são encontradas no mercado como item de reposição para monitores de TVs, computadores, smartphones e painéis de veículos, por exemplo. Por isso, são vendidas em formatos e tamanhos específicos a preços elevados. Porém, é possível obtê-las sem custo algum removendo-as de monitores de PC, tablets, notebooks ou TVs de LCD inutilizados. Se você não tiver nenhum monitor velho em casa, não será difícil conseguir em lojas de manutenção eletrônica ou em pontos de coleta de lixo eletrônico (procure saber onde estão localizados os pontos de coleta em sua região).

De posse de um desses monitores desmonte-o utilizando uma chave (do tipo estrela) para retirar os parafusos que predem o display à carcaça plástica (Figura 27-1) e à moldura de metal (Figura 27-2).

Figura 27 - Remoção da película polarizadora.



Fonte: arquivo próprio.

O display, entre outros elementos, possui uma superfície de vidro recoberta dos dois lados com películas escuras (são os polarizadores), uma fosca e outra brilhosa (é essa que interessa).

Coloque-o sobre uma mesa plana e bem apoiada e utilize a ponta do estilete (ou qualquer lamina plana de pequena espessura) para começar a retirada da película polarizadora por uma das quinas (Figura 27-4). Se você perceber que a película está saindo sem brilho e mediante muito esforço, provavelmente parte da cola utilizada para fixá-la ao vidro está vindo junto. Para evitar que o vidro quebre e a película se perca, pare e recomece a remoção por outro lado. Alguns monitores têm a película fortemente aderida à superfície do vidro (nesse aspecto, displays menores costumam dar mais trabalho), em monitores maiores e mais robustos a remoção é mais suave e as perdas consequentemente são menores. Não utilize água ou substâncias abrasivas para limpar as películas, um tecido macio e seco é mais indicado. Na Figura 28 vemos alguns pedaços de películas extraídas da tela de um monitor.

Figura 28 - Películas polarizadoras removidas.



Fonte: arquivo próprio.

Colocação das películas polarizadoras

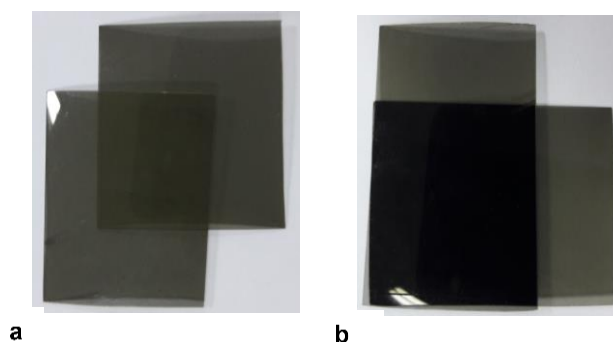
As películas polarizadoras devem ser fixadas em um dos lados de cada suporte de forma a cobrir toda a área das lentes (lupas) e devem ser dispostas com eixos de polarização perpendiculares. Para isso, siga as seguintes instruções.

1 – Recorte, utilizando estilete ou tesoura, um pedaço da película em forma de um quadrado de lado 105mm (as lupas têm 100mm e os 5mm a mais são necessários para servir de contato com a fita durex);

2 – Coloque o pedaço já recortado em cima do restante da película, ele servirá de moldes para a película que recobrirá a lente do outro suporte (Figura 29.a);

3 – Antes de fazer o recorte, certifique-se de que ambas estejam com eixos de polarização em direções perpendiculares (Figura 29.b).

Figura 29 – Películas polarizadoras recortadas.

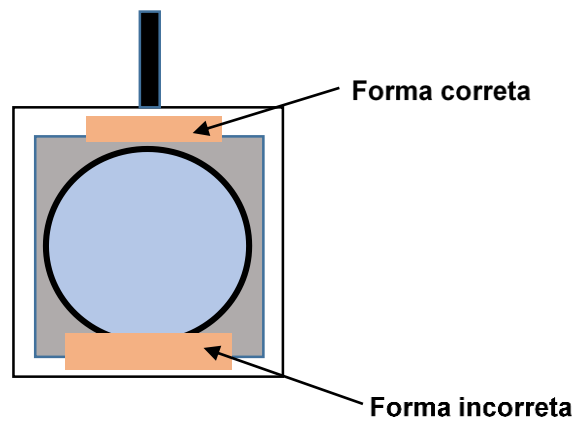


Fonte: arquivo próprio.

Caso necessário, coloque-as sobre o display ou lanterna de um celular, provoque a rotação da película que já foi recortada até que a intensidade da luz transmitida seja a menor possível (nesse caso os eixos estarão em posições perpendiculares) e então faça o recorte.

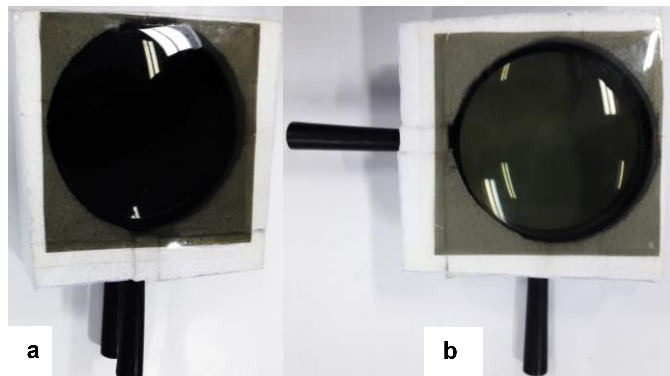
4 – Finalmente, fixe cada filme polarizador no respectivo suporte passando fita durex em volta de todo o perímetro. Tome cuidado para que nenhuma parte da fita durex ultrapasse a região das lentes, pois elas alteram o plano de polarização da luz transmitida (Figura 30). A Figura 31 mostra como devem ficar as imagens transmitidas pelas lupas quando os respectivos suportes das lentes estão paralelamente (a) e perpendicularmente (b) alinhados.

Figura 30 - Colagem da película polarizadora no suporte da lupa.



Fonte: próprio autor.

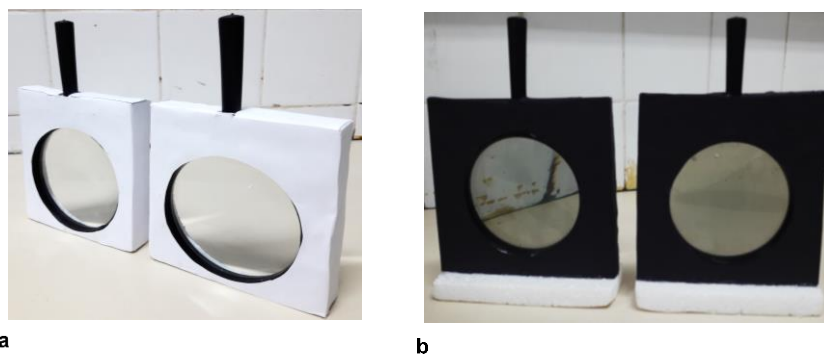
Figura 31 – Lentes de projeção-polarização com eixos perpendiculares (a) e paralelos (b).



Fonte: arquivo próprio.

Para dar mais estabilidade aos suportes, pode-se colar na parte inferior (oposta aos cabos das lupas) plataformas de isopor com largura de aproximadamente 50mm (Figura 32).

Figura 32 – Pares de lentes de projeção-polarização.



Fonte: arquivo próprio.

Tela de projeção (D)

A tela sobre a qual as imagens serão projetadas é uma parte importante do aparato, deve ser constituída de um material capaz de refletir a luz incidente (polarizada) e manter o plano de polarização, caso contrário o efeito 3D não ocorrerá. Realizamos vários testes a fim de encontrar uma solução prática e barata. Obtivemos projeções com bons resultados utilizando superfícies metálicas planas de alguns móveis e eletrodomésticos (superfície metálicas não desfazem a polarização da luz incidente) – obviamente uma tela de fácil transporte é mais conveniente para uso em sala de aula. Recorremos aos pontos de descartes de materiais, mas as superfícies metálicas encontradas estavam sempre amassadas. Compramos um pedaço de folha de alumínio, porém alguns vincos (devido ao manuseio na hora do corte e ao enrolamento para transporte) produziram linhas de intensa reflexão nas imagens projetadas, o que causa incomodo aos olhos.

Experimentamos um tipo de folha de papel, vendido em lojas de decorações, na qual uma das faces é prateada e brilhante, sem sucesso. Alcançamos o resultado pretendido utilizando tintas de pigmentos metálicos. Por tanto, utilize uma superfície lisa com dimensões de aproximadamente 400mm x 600mm em MDF, compensado, plástico ou acrílico, por exemplo, e pinte uma das faces com tinta(spray) de pigmentos metálicos (Figura 33). O spray na cor prata apresenta

um bom resultado. Leia e siga atentamente as instruções do fabricante para aplicação do spray.

Figura 33 - Tela de projeção.



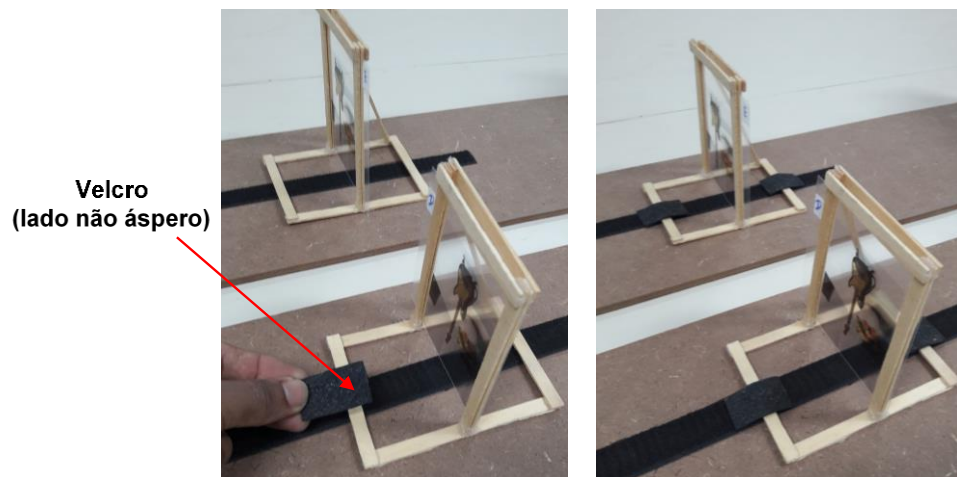
Fonte: arquivo próprio.

CONSTRUÇÃO DAS BASES

Os dispositivos de cada parte (A, B e C) que compõe o estereoscópio devem ser colocados sobre uma base plana que permita um bom alinhamento entre eles. Utilize duas bases retangulares, feitas de um material de média densidade. Isso ajuda na estabilidade do sistema e facilita o ajuste das partes que ficarão sobre elas. As bases podem ser feitas em madeira, compensado, MDF ou similares. O mais importante é que sejam planas e com dimensões de aproximadamente 13cm de largura (mesma largura dos suportes das lentes) por no mínimo 90cm de comprimento.

Utilizando cola super bonder (ou similar), cole um pedaço de velcro (o lado mais áspero por exemplo) de aproximadamente 40cm em cada uma das bases (Figura 34). Destaque também quatro pedaços (o lado menos áspero) de 50mm que servirão para fixar os suportes das imagens nas bases após os ajustes para a projeção.

Figura 34 - Bases do estereoscópio.



Fonte: arquivo próprio.

Agora basta colocar cada parte sobre a base e o estereoscópio estará pronto (Figura 35).

Figura 35 - Estereoscópio de luz polarizada montado.

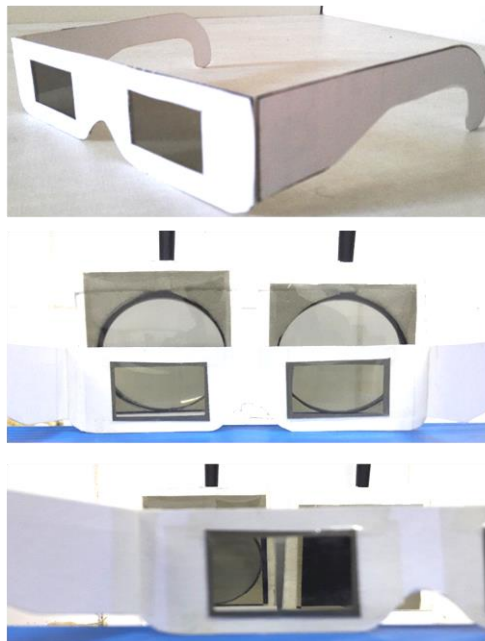


Fonte: arquivo próprio.

CONFEÇÃO DOS ÓCULOS 3D

Imprima em papel o modelo de óculos 3D que servirá de moldes (Apêndice C.3); cole-o sobre algum tipo de papel um pouco mais rígido: cartolina, papel cartão, papel de caixas de sapatos e outros; faça os recortes com tesoura (utilize o estilete para as “curvas”); utilize fita durex para fazer a montagem das partes móveis dos óculos; fixe as películas polarizadoras com fita durex nos dois lados do óculos de forma que o lado esquerdo fique com polarização paralela à polarização da película fixada à lupa do lado esquerdo e o lado direito dos óculos fique com polarização paralela à polarização da película fixada à lupa do lado direito. Observe que a película de cada lado dos óculos deve estar com polarização perpendicular à película da lupa do lado oposto como ilustra a Figura 36.

Figura 36 - Óculos 3D com lentes polarizadas.



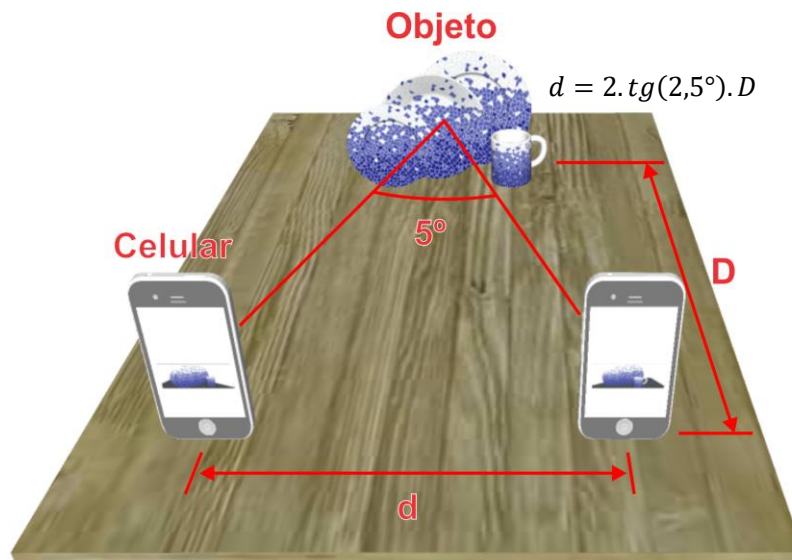
Fonte: arquivo próprio.

PRODUÇÃO DAS IMAGENS

Para obter o par de imagens estéreo, utilize o celular para tirar duas fotos em ângulos diferentes do mesmo objeto ou paisagem. Para isso, o aparelho deverá ser deslocado para direita ou para esquerda entre uma foto e outra. A distância

horizontal é calculada a partir de relações trigonométricas de forma a manter uma abertura angular de 5° entre o ponto-objeto e o eixo de visão em cada posição da câmera, conforme a Figura 37.

Figura 37 - Trigonometria do posicionamento da câmera e objeto.

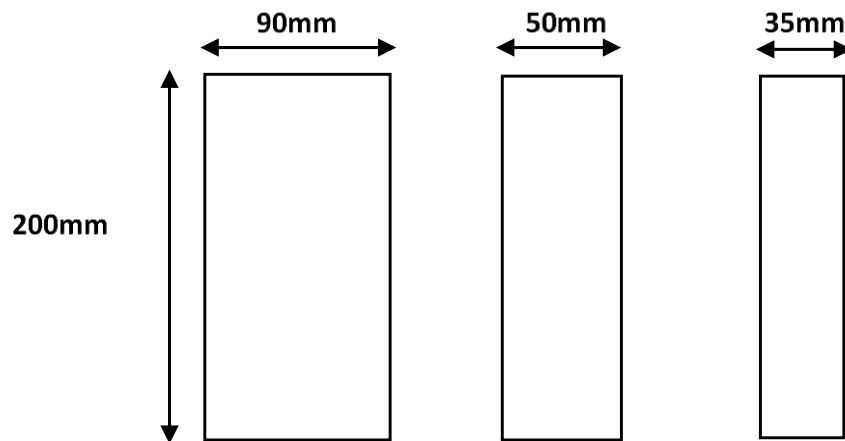


Fonte: próprio autor.

Suporte do celular

Para garantir a variação angular de 5° entre as fotografias e evitar movimentos na direção vertical, construa um suporte com escala graduada em milímetros. O suporte pode ser confeccionado em isopor. Para monta-lo, corte três pedaços de isopor em forma de retângulos com as medidas indicadas na Figura 38; cubra as peças com cartolina, caso queira dar um melhor acabamento, e em seguida cole as partes com cola quente. Todas as peças têm o mesmo comprimento (200mm), somente as larguras variam. A peça mais estreita (35mm) servirá de empunhadura para as mãos.

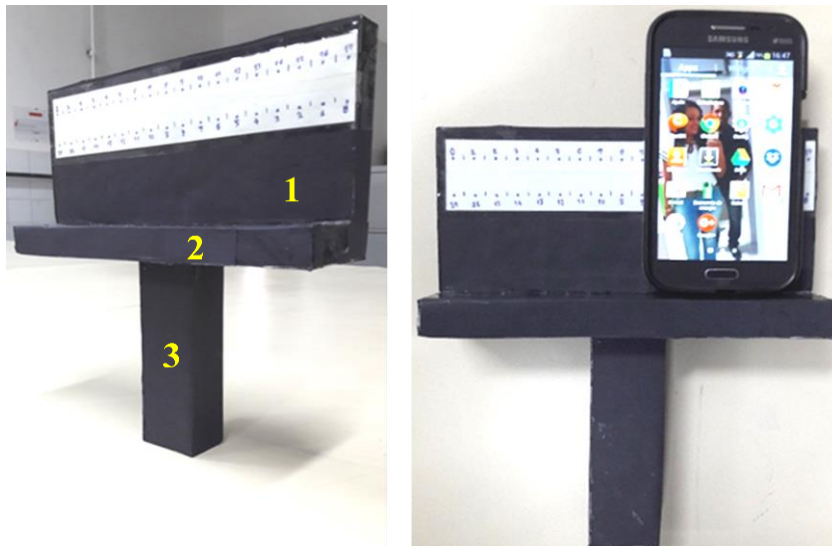
Figura 38 - Partes do suporte da câmera - celular.



Fonte: próprio autor.

A escala graduada pode ser feita diretamente no suporte utilizando uma régua para fazer as marcações (com uma caneta ou lapiseira) em milímetros, ou pode-se utilizar a própria régua fixando-a com cola quente ao suporte. Após a montagem o suporte deve ficar conforme a Figura 39.

Figura 39 - Suporte da câmera (celular) montado.



Fonte: arquivo próprio.

Recomendações para obter bons pares de imagens estéreo:

1- Não tire fotos de objetos muito distantes. Bons resultados são obtidos com o objeto (referência) a distâncias entre 50cm e 100cm da câmera (celular). Para encontrar a distância vertical entre as posições da câmera entre uma foto e outra, utilize a equação da Figura 37 e preencha a tabela abaixo:

Quadro 3 - Cálculos da distância horizontal entre as posições da câmera.

$d = 2 \cdot \operatorname{tg}(2,5^\circ) \cdot D$	
D	d
50cm	
60cm	
70cm	
80cm	
100cm	

Fonte: próprio autor.

2- Prepare uma cena com pelos menos dois objetos, um mais à frente do outro. Isso ajuda a reforçar o efeito de profundidade na imagem final.

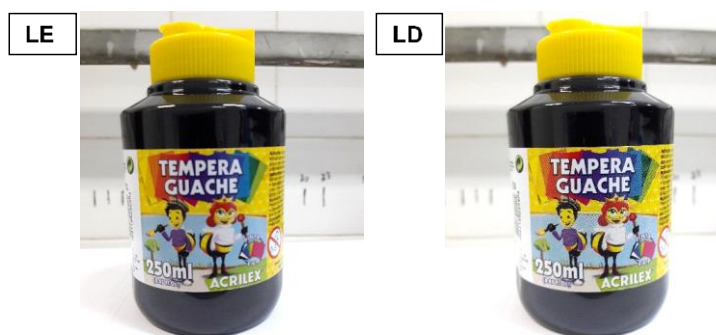
3- Escolha cores contrastantes para compor a paisagem: um objeto vermelho ao lado de um azul, em cima de uma mesa marrom por exemplo.

4- A definição da câmera do celular também interfere na qualidade das imagens. Utilizar aparelhos com câmeras de pelo menos 8 megapixels.

Nota: Algumas imagens estereoscópicas, prontas para impressão, estão disponíveis no material suplementar.

A Figura 40 abaixo é um par estéreo obtido de acordo com as orientações indicadas.

Figura 40 - Par de imagens estereoscópicas.



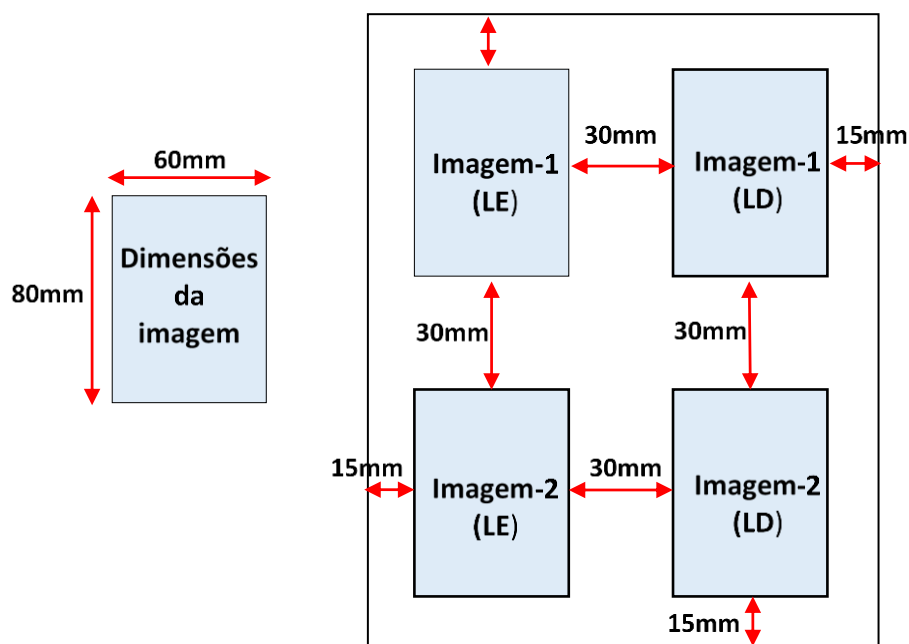
Fonte: arquivo próprio.

À primeira vista parece ser a mesma imagem. De fato, o objeto fotografado é o mesmo, porém, se olharmos com mais atenção (compare a distância lateral do recipiente de tinta com as ranhuras na parede atrás) perceberemos que ambas estão dispostas em ângulos ligeiramente distintos: uma está mais à esquerda – lado esquerdo (LE) e outra está mais à direita – lado direito (LD).

Impressão das imagens

A impressão das imagens deve ser feita em transparências apropriadas para máquinas impressoras a laser ou jato de tinta. Tome cuidado para não utilizar transparência jato de tinta em impressora a laser ou vice-versa, cada uma delas deve ser utilizada de acordo com as especificações do fabricante. Antes de imprimir as imagens, são necessários alguns cuidados (ver Figura 41): **1** - assegure-se que as fotos estejam configuradas no tamanho 60mm x 80mm, essas dimensões se adequam ao diâmetro das lupas e permitem a projeção de uma imagem maior com um menor distanciamento entre o estereoscópio e a tela de projeção (o distanciamento causa a diminuição da intensidade da luz incidente na tela de projeção); **2** - deixe um espaço de 30 milímetros entre os lados de uma foto e as que estão próximas, esses espaços serão necessário para colocar as imagens no suporte móvel (B); **3** – a transparência só imprime imagens em uma de suas faces e nem sempre é possível identificar a olho nu, por isso os fabricantes costumam indicar com alguma marca o lado onde deve ser feita a impressão. Esteja atento a esses detalhes.

Figura 41 - Edição das imagens para impressão.



Fonte: arquivo próprio.

Se você não estiver seguro quanto a esses procedimentos, deixe que um profissional faça a edição e impressão das imagens. Esse serviço não custa caro e evita transtornos.

Recorte das imagens

Após a impressão das imagens, recorte-as para que sejam colocadas nos suportes móveis. Identifique os limites de largura (60mm) e altura (80mm) e faça os recortes deixando uma sobra de no mínimo 15mm em cada lado. Utilize régua e caneta para fazer as marcações em volta de cada imagem e um estilete para fazer os recortes. Para garantir um corte retilíneo, coloque a borda da régua sobre as marcações e passe a lâmina do estilete. Outro detalhe importante é a identificação dos lados direito e esquerdo de cada par de imagem, ou seja, identificar a foto que foi tirada com a câmera mais à direita e a que foi tirada com a câmera mais à esquerda. Lembre-se que as fotos serão colocadas invertidas no suporte (as lentes projetam imagens reais e invertidas). Então, para que se tenha as letras **D** (lado direito) e **E** (lado esquerdo) colocadas corretamente, siga os passos a seguir.

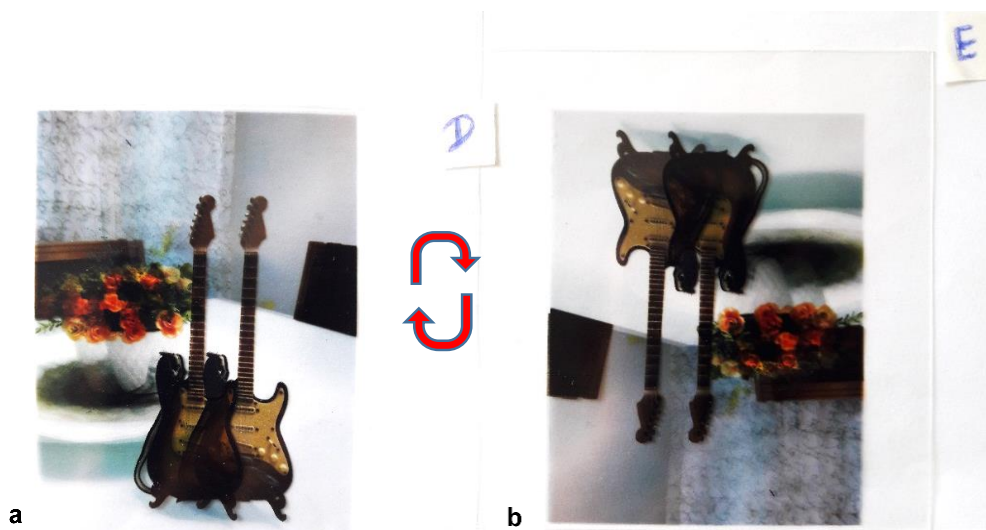
Coloque o par de imagens sobre uma folha branca (Figura 42) e em seguida uma imagem sobre a outra de forma a alinhar os limites de todos os seus lados (Figura 43.a). Em seguida, faça um giro de 360° e veja, nessa orientação invertida, qual delas está mais à direita. Caso não disponha de um pincel marcador permanente (canetas comuns não marcam transparências), recorte dois pequenos pedaços de papel; grafe as letras **D** (direita) e **E** (esquerda) e fixe-os com fita durex no canto da respectiva imagem (Figura 43.b). A Figura 44 mostra como deve ficar a imagem fixada no suporte.

Figura 42 – Par de imagens estereoscópicas impressas.



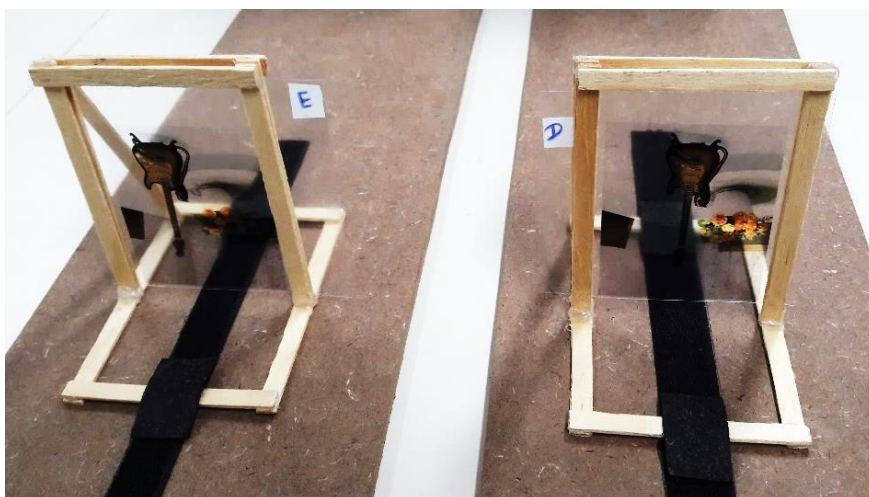
Fonte: arquivo próprio.

Figura 43 – Par estéreo(a) com lados identificados (b).



Fonte: arquivo próprio.

Figura 44 – Par de imagens colocadas nos suportes.



Fonte: arquivo próprio.

AJUSTES PARA VISUALIZAÇÃO DAS IMAGENS

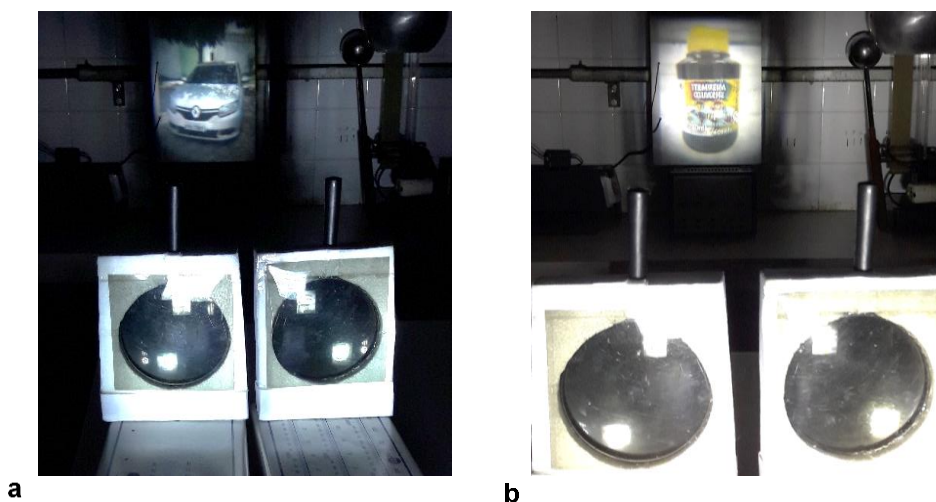
Para visualizar as imagens é necessário fazer os ajustes das imagens na tela de projeção. Primeiramente providencie uma mesa plana para acomodar o estereoscópio; coloque as bases lado a lado deixando um espaço de aproximadamente 6cm entre elas; posicione as lentes polarizadas alinhadas na extremidades das bases e nas outras extremidades posicione as lanternas; coloque cada par de imagem em sua respectiva base (imagem direita na base do lado direito e imagem esquerda na outra base) entre a lanterna e a lente. Em seguida proceda conforme os passos descritos a seguir:

- 1- Ligue uma das lanternas;
- 2- Escolha o tamanho da projeção (alterando a distância entre o estereoscópio e a tela de projeção);
- 3- Ajuste o foco (posição onde a imagem projetada é mais nítida) aproximando ou afastando a imagem da lente;
- 4- Fixe o suporte à base com o velcro (Figura 34);
- 5- Ligue a outra lanterna, repita o passo 3 de forma a deixar as imagens no mesmo tamanho, na mesma atura e com um pequeno deslocamento horizontal;

- 6- Coloque os óculos 3D para finalizar o ajuste. Faça pequenos deslocamentos horizontais nas imagens projetadas fazendo aberturas nas extremidades inferiores (onde estão as lanternas) das bases do estereoscópio até que o efeito tridimensional seja perceptível.

Observação: Durante os ajustes para encontrar a distância horizontal adequada entre as imagens na tela de projeção, tome cuidado para não inverter os lados de cada imagem. A imagem direita (identificada com D) deve sempre ficar mais à direita da imagem esquerda (identificada com E). A Figura 45 mostra exemplos de projeções.

Figura 45 – Projeção no estereoscópio: imagem de um automóvel (a) e de um vidro de tinta (b).



Fonte: arquivo próprio.

Capítulo três: proposta de aplicação didática

A metodologia adotada para aplicação didática do estereoscópio no estudo da polarização da luz está baseada nas etapas da Situação de Estudo (SE). A SE é uma metodologia de aplicação didática fundamentada na abordagem vigotskiana de aprendizagem e desenvolvimento. Essa proposta de ensino remete para o processo de reconfiguração curricular para contemplar a complexidade do trabalho pedagógico. Foi pensada em 2000 e vem sendo desenvolvida pelo Grupo Interdepartamental de Pesquisa sobre Educação em Ciências (Gipec) da

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí) (SANGIOGO *et al.*, 2013).

Estando em conformidade como a teoria sócio-histórico-cultural, essa proposta considera relevante elementos das experiências dos alunos que vão além da necessidade de mediação de conceitos científicos, pois essas vivências e as relações que o aluno estabelece com seu meio são importantes na construção do conhecimento que possibilita a formação das funções psicológicas superiores (MALDANER; ZANON, 2001). A SE privilegia a questão da significação conceitual, indicando preocupação mais cognitiva do que pedagógica, contempla os conteúdos escolares a partir da vivência dos estudantes, contribuindo para o desenvolvimento dos conceitos de modo mais significativo, rompendo com a forma linear e tradicional do ensino. Busca-se, com a referida proposta, contemplar um ensino contextualizado e interdisciplinar, que corrobore com aspectos defendidos nas orientações curriculares nacionais. Foca-se em uma ‘situação concreta’, complexa, que professores e estudantes buscam compreender de forma ampla (SANGIOGO *et al.*, 2013).

A SE segue uma dinâmica específica sistematizada em três etapas: problematização, primeira elaboração e função de elaboração e compreensão textual.

Na etapa da **problematização** os estudantes são postos diante de um problema vivenciado por eles cujo entendimento formal ainda não possuem, mas que conhecem e podem comentar alguns aspectos. A segunda etapa, definida como etapa da **primeira elaboração**, é feita a organização e sistematização das ideias e conceitos levantados na etapa anterior. Na terceira e última etapa, **função de elaboração e compreensão textual**, há uma retomada dos questionamentos iniciais com intuito de que os estudantes possam compreendê-los sob uma perspectiva científica e que, utilizando os conceitos e as definições estudadas, possam demonstrar entendimento de outras situações análogas às aquelas que lhe foram apresentadas ao longo do desenvolvimento da Situação de Estudo. É nessa etapa que se objetiva a generalização dos conceitos propostos ao longo de toda a Sequência Didática.

As atividades foram planejadas de forma que os estudantes possam aprender sobre a **polarização da luz** a partir da discussão dos processos e

princípios físicos envolvidos na produção de imagens e filmes 3D. Além dos conceitos atinentes a polarização, assuntos como: visão binocular; campo de visão; estereoscopia e trigonometria, podem ser abordados buscando oferecer um estudo contextualizado e interdisciplinar. A SE está planejada para ser desenvolvida durante seis aulas de 50 minutos. O componente curricular Física, na 3ª série, possui carga horária semanal de 3 horas-aulas distribuídas, geralmente, em dois encontros. Ou seja, a proposta pode ser implementada em duas semanas.

Como requisito para a aplicação da presente proposta, mas não obrigatoriamente, os estudantes devem ter estudado as principais características e propriedades de uma onda (principalmente as ondas eletromagnéticas).

Acreditamos ser possível ensinar sobre polarização da luz sem que os estudantes possuam previamente os conceitos relacionados aos fenômenos ondulatórios, uma vez que, caso o professor prefira e disponha de tempo, poderá abordá-los no decorrer das atividades da SE.

As aulas estão distribuídas de acordo com as etapas da Situação de Estudo como mostra o quadro abaixo:

Metodologia

Situação de Estudo: **COMO FUNCIONA O CINEMA 3D?**

Desenvolvimento da sequência didática

1 – Problematização 1º e 2º encontro	2 – Primeira elaboração 3º e 4º encontro	3 - Função de elaboração e compreensão textual 5º e 6º encontro
✓ Apresentação da SE, ✓ Indagações sobre imagens tridimensionais, ✓ Demonstração de algumas imagens 3D, ✓ Explicação dos princípios da visão estereoscópica, ✓ Apresentação da polarização da luz como o princípio físico utilizado no cinema 3D,	✓ Conhecer as primeiras observações e explicações acerca do fenômeno, ✓ Entender o significado físico de polarizar uma onda, ✓ Estudar os processos pelos quais a luz pode ser polarizada, ✓ Compreender o processo de produção de imagens 3D pela técnica de polarização da luz,	✓ Oficina: projeção de imagens 3D, ✓ AVALIAÇÃO: • Empregar adequadamente os conceitos e termos científicos relacionados ao tema de estudo, • Explicar novas situações a partir dos conhecimentos adquiridos,

Fonte: próprio autor

A partir da discussão, da interação com os colegas e com a mediação do professor, os estudantes serão conduzidos a compreender o problema de acordo com os conhecimentos científicos a ele relacionados.

- ❖ **Etapla da problematização:** Etapa onde os alunos expressam o seu entendimento sobre o tema a ser abordado. É nesse momento que o professor deve dar significado as linguagens que vão se tornar uma discussão conceitual.

AULAS 1 e 2

Recursos e materiais:

- 1 – Data Show (se possível): exposição de slides (Apêndice C.1);
- 2 – Texto de apoio: Visão binocular (Apêndice C.2);
- 3 – Óculos 3-D (lentes azul e vermelho);
- 4 – Películas polarizadoras;
- 5 – Lanternas;
- 6 – Estereoscópio;

Nessas duas primeiras aulas, o professor:

Inicia uma conversa com os alunos buscando saber o que eles costumam fazer nos momentos vagos. Comenta sobre filmes e pergunta com que frequência os alunos vão ao cinema, se preferem assistir em projeção normal ou em 3D, por exemplo - *o objetivo é atrair os alunos através de um assunto aparentemente informal. Envolvê-los no assunto e abrir caminho para a apresentação do tema a ser trabalhado.*

Levanta alguns questionamentos: **Como as imagens são produzidas de forma a provocar a sensação 3D? Por que só percebemos o efeito tridimensional se usarmos óculos especiais? Qual a principal diferença notada em olhar para as imagens com e sem os óculos (azul e vermelho)? Qual o significado do termo 3D e em que uma imagem 3D difere de uma 2D? Qual o motivo de se utilizar as cores azul e vermelha? Outras cores também funcionam? Qual a técnica utilizada para separar as imagens no cinema 3D atual? Alguém já**

ouviu falar em polarização da luz e qual seu significado? – as perguntas buscam fazer com que os alunos explicitem o entendimento que possuem, mesmo que informal, sobre o funcionamento dessa tecnologia, dando-lhe significado e defendendo suas ideias. O professor também traz para a discussão algumas palavras que mostram outras possibilidades de se compreender a situação em discussão e que possam produzir algum sentido novo, podendo vir a se tornar conceitos no decorrer do estudo. A partir daí, cria-se a necessidade de estudos para compreender a demanda colocada.

Apresenta o trabalho a ser desenvolvido - o professor apresenta o tema geral (**Como funciona o cinema 3D?**) da Situação de Ensino; indica os objetivos; as etapas; os recursos que serão utilizados e a forma de avaliação.

Demonstra algumas imagens tridimensionais como: desenhos anamórficos, hologramas e anáglifos (o professor deve providenciar ou solicitar previamente que os alunos tragam óculos de cores para visualização das imagens) disponíveis na internet. Boas imagens nesse formato estão disponíveis em: <https://br.pinterest.com/> - a intenção é despertar a curiosidade dos alunos, levantar questionamentos e confrontar as observações feitas durante a demonstração das imagens com algumas das respostas dadas aos questionamentos anteriores.

Exibe imagens tridimensionais com o estereoscópio – o professor organiza a turma de forma que todos os alunos possam visualizar as imagens. É provável que muitas perguntas surjam ao mesmo tempo. O professor deve finalizar a demonstração e só depois iniciar as discussões.

Explica os princípios da visão estereoscópica - o professor discute brevemente com os estudantes as diferenças e similaridades entre o sistema 3D em anáglifo, o cinema 3D atual e o estereoscópio. Explica de maneira objetiva a visão monocular e binocular dos animais destacando a importância da disposição dos olhos no crânio para a percepção tridimensional dos objetos e reforça que as principais técnicas de produção de imagens tridimensionais simulam a visão binocular do homem. Para ilustrar as características da visão binocular, o professor pode promover algumas dinâmicas (Apêndice C.2).

Explica de forma sucinta os princípios envolvidos na visualização de imagens tridimensionais pelas técnicas de espelhos, slides estéreos e anáglifos (reforça que

cada olho deve receber uma imagem diferente); explica a separação das imagens em faixas de cores (azul e vermelho) na técnica do anáglifo destacando a importância dos cones e bastonetes na retina e finaliza mencionando a polarização da luz como técnica utilizada atualmente na tecnologia 3D dos cinemas para separar a informação que cada olho deve receber das imagens refletidas na tela de projeção - *o objetivo é promover um diálogo entre as disciplinas de Física e Biologia em torno do tema central. O professor não explica, ainda, os processos de polarização da luz, mas traz a palavra "polarização" para o contexto a fim de identificar os significados que os alunos atribuem a ela, quer seja trazido de outras áreas de estudos, quer seja de suas vivências fora da escola. O professor exemplifica que películas polarizadoras estão presentes, por exemplo, em óculos de sol, filtros fotográficos, displays e monitores em geral e demonstra que em determinada orientação as películas transmitem boa parte da luz, mas em outra, a bloqueia quase totalmente.*

- ❖ **Etapla da primeira elaboração:** É feita a sistematização dos conhecimentos envolvidos na etapa anterior e atividades que permitam a socialização dos conceitos estudados.

AULAS 3 e 4

Recursos e materiais:

- 1 – Data show para exposição de slides – primeira elaboração (Apêndice C.1);
- 2 – Texto de apoio: processos de polarização (Capítulo 2 deste produto);
- 3 – Películas polarizadoras, lupas do estereoscópio e/ou óculos de sol;
- 4 – Lanterna;
- 5 – Roteiro para produção de imagens tridimensionais (Secção 3.4 deste produto);
- 6 – Suporte móvel para celular;

Neste segundo momento, o professor:

Comenta os principais fatos históricos relacionados à polarização, destacando as primeiras observações no cristal de **turmalina**, as primeiras explicações e o

modelo atualmente aceito para o entendimento do fenômeno - *o objetivo é mostrar que o entendimento e o domínio da técnica de polarização da luz, assim como muitas outras, surgiu da observação de fenômenos naturais e que a física é fruto de uma construção histórica do conhecimento.*

Reforça que a ótica é o ramo da física que estuda a luz; destaca suas características e propriedades enquanto **onda eletromagnética; explica e descreve o significado de polarizar uma onda** - *o objetivo é lembrar e/ou inserir no contexto de estudo palavras representativas de conceitos científicos e específicos para o entendimento do fenômeno, tais como: onda eletromagnética, oscilação, ondas transversais e longitudinais, plano de oscilação, frequência, período, comprimento de onda, velocidade de propagação, espectro eletromagnético.*

Enfatiza que a luz se origina da vibração dos elétrons presentes em uma sustância e que essas vibrações, que ocorrem em vários planos, produzem ondas eletromagnéticas que se propagam em todas as direções - *deve ficar claro que um corpo que emite luz de forma espontânea, o faz por meio das vibrações aleatórias de seus elétrons e por isso emite luz não polarizada e que polarizar a luz significa fazê-la propagar-se em planos preferencias de oscilação.*

Descreve os processos pelos quais a luz pode ser polarizada e faz demonstrações práticas - *nesse momento, além da descrição e explicação físico-matemática de cada processo, é importante que o professor apresente exemplos de aplicação da polarização da luz em cada um dos processos. Por **birrefringência** o professor pode mostrar fotos da dupla imagem de um objeto vista através da calcita; por **espalhamento**, pode orientar os estudantes a olharem para o céu com óculos de sol (com lentes polarizadas) ou até mesmo com os filmes polarizadores utilizados durante a aula, se for possível, e observarem que o céu fica mais "escurecido" em certas regiões do que em outras; por **reflexão**, o professor pode fazer uso dos filmes polarizadores ou das lupas (recobertas com polarizadores) do estereoscópio para observar a polarização da luz refletida no chão da sala de aula ou no quadro negro; por **absorção**, o melhor exemplo são os polarizadores utilizados nas lupas. A lei de Malus pode ser avaliada qualitativamente utilizando-se as duas lupas e uma das lanternas do estereoscópio.*

Desafia os alunos a produzirem **imagens tridimensionais (par de fotografias estereoscópicas) para serem projetadas com o estereoscópio no encontro seguinte.**

O professor deve informar que, além da exibição das imagens, deve ser explicado como o **estereoscópio** funciona, enfatizando o emprego da luz polarizada como técnica para a visualização das imagens 3D - *essa tarefa será desenvolvida na forma de oficina. A turma deve ser dividida em equipes e os estudantes deverão produzir e trazer impressas as imagens no encontro seguinte. O objetivo é promover a interação social dos alunos em torno da reprodução de uma tecnologia presente no mundo do entretenimento.*

Distribui o guia contendo as orientações para a produção e impressão do par de imagens estereoscópicas. Um para cada aluno ou um por equipe - *é importante que o professor explique cada etapa e demonstre o que for possível para que os estudantes possam sanar todas as dúvidas e produzir boas imagens.*

- ❖ **Etapas da Função de elaboração e compreensão textual:** Nessa etapa os estudantes devem: demonstrar o entendimento adquirido sobre a tecnologia empregada no cinema 3D; identificar os principais fenômenos físicos envolvidos e utilizar as palavras representativas dos conceitos científicos de acordo com o contexto da discussão.

AULAS 5 e 6

Recursos e materiais:

- 1 – Estereoscópio (de preferência mais de um aparato);
- 2 – Folhas de papel em branco;
- 3 – Fita durex;
- 4 – Tesoura e/ou estilete;

Nessa terceira, e última etapa...

As equipes irão fazer a exposição das imagens tridimensionais produzidas - o professor deve orientar as equipes quanto aos ajustes das imagens no estereoscópio. É importante fazer previamente um planejamento do tempo para que todas as equipes possam apresentar suas imagens e haja tempo hábil para a discussão dos conceitos. Para uma turma com aproximadamente 30 alunos é recomendável pelo menos dois estereoscópios. Esclareça

bem os estudantes quanto a produção e impressão das imagens. Se as imagens estiverem totalmente prontas já se tem uma boa margem de tempo para as demais tarefas dessa etapa.

Finalizada as **apresentações das imagens**, as equipes serão questionadas pelo professor e pelos colegas a fim de que seja averiguada a apropriação dos conceitos científicos e o uso correto das palavras representativas deles na explicação da **problemática proposta na SE** - *os alunos deverão explicar os princípios da visão estereoscópica e sua utilização na produção de imagens tridimensionais. Deverão descrever o funcionamento do estereoscópio ressaltando o conceito de polarização da luz como técnica empregada na projeção e visualização de imagens 3D no cinema.*

A atividade que encerra a SE é a aplicação da **avaliação individual subjetiva** (Apêndice C.4) na qual são retomadas as questões iniciais apresentadas na problematização e também apresentadas outras cuja **problemática pode ser entendida a partir do pensamento conceitual formado** - *as questões buscam averiguar o nível de assimilação que os estudantes alcançaram dos principais conceitos abordados na SE. Para isso, o aluno pode transmitir o que aprendeu de duas maneiras: 1 – por meio da escrita e, 2 – através de esquemas representativos (iconográfico). Questões envolvendo situações diferentes da problemática trabalhada na SE, mas que podem ser entendidas a partir dos mesmos princípios e conceitos, são apresentadas a fim de constatar a capacidade dos estudantes de solucionar problemas correlatos e extrapolar para outros contextos os conhecimentos adquiridos.*

Referências

- AZEVEDO, E. R. De et al. UTILIZAÇÃO DE UM ESPECTRÓGRAFO DE PROJEÇÃO COMO UMA FERRAMENTA PARA DEMONSTRAÇÕES SOBRE POLARIZAÇÃO DA LUZ. **Quim. Nova**, v. 33, n. 5, p. 1204–1210, 2010.
- CHRISTOFOLI, E. P. O Renascimento do 3d. **Contemporânea**, v. 9, v. 17, p. 511–526, 2011.
- DUMKE, V. R.; JR, G. W. Preparação de Lâminas Polarizadoras. **Revista Brasileira de Física**, v. 12, n. 2, 1982.
- HECHT, E. **Óptica**. 3 ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. P.; SANDS, M. **Lições de Física The Feynman Lectures on Physics Volume I**. São Paulo: Bookman, 2009.
- LUNAZZI, J. J.; FRANÇA, M. C.; MORI, A. da S. Revivendo o estereoscópio de Wheatstone. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 2, 2015.
- MALDANER, O. A.; ZANON, L. B. Situação de Estudo: uma organização do ensino que extrapola a formação disciplinar em ciências. **Espaço da Escola**, Ijuí, n. 41, p. 45–60, 2001.
- MASCHIO, A. V. A Estereoscopia: Investigação de Processos de Aquisição, Edição e Exibição de Imagens Estereoscópicas em Movimento. **Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”**, Bauru, p. 2–231, 2008.
- ORTIZ, A. J.; LABURÚ, C. E. Proposta simples para o experimento de espalhamento rayleigh. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 27, n. 3, p. 599–608, 2010.
- RIBEIRO, J. L. P.; CARNEIRO, M. H. da S. A reflexão da luz nos periódicos de Ensino de Física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 355–398, 2016.
- RIBEIRO, J. L. P.; VERDEAUX, M. de F. da S. Experimento simples, explicação nem tanto! Reflexão e polarização em óculos 3D. **Física na Escola**, v. 13, n. 1, p. 14–16, 2012.
- SANGIOGO, F. A. et al. Pressupostos epistemológicos que balizam a Situação de Estudo: algumas implicações ao processo de ensino e à formação docente. **Ciência & Educação (Bauru)**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 35–54, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132013000100004&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 26/06/2018.
- TOMOYOSE, A. N. Comparação e Classificação de Técnicas de Estereoscopia para Realidade Aumentada de Jogos. **Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da**

Universidade de São Paulo, São paulo, p. 125, 2010.

VIEIRA, L. P.; AGUIAR, C. E. **Verificação da lei de malus com um Smartphone. XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física**. 2015. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0583-1.pdf>. Acesso em: 10/01/2018.

YOUNG, H. D.; ROGER A. FREEDMAN. **Física IV - Ótica e Física Moderna**. São Paulo: Pearson, 2009.

Apêndices

C.1 – Sugestão de slides para exposição das aulas

(disponível em: <http://www1.fisica.org.br/mnpef/?q=defesas>)

Problematização

Imagens tridimensionais
(1 – Problematização)

Professor:

Data:

1 – Problematização

❖ Estrutura da Aula

- Imagens tridimensionais;
- Visão binocular;
- Estereoscopia;
- Imagens estereoscópicas;
- Como funciona o cinema 3D?
- A polarização da Luz;

Imagens tridimensionais anamórficas



Fonte: <https://br.pinterest.com/>

Imagens tridimensionais com espelhos



Fonte: http://www.comalivem.com.br/educacao/13/vermancas01_cenotaxiviva.php

Imagens tridimensionais anáglifas



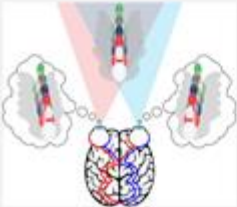
Fonte: <https://br.pinterest.com/>

Imagens tridimensionais anáglifas



Fonte: <https://br.pinterest.com/>

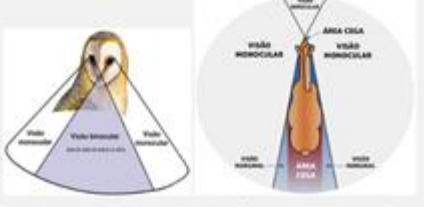
Visão binocular



- O fato de possuímos **visão binocular** (os olhos separados por uma distância média de 6,5 cm e voltado para a mesma direção) faz como que vejamos uma mesma cena sob dois pontos ligeiramente distintos.
- O cérebro faz a fusão das duas imagens formando uma imagem única tridimensional do mundo à nossa volta. Esse fenômeno natural é conhecido como **estereoscopia**.

Fonte: adaptado de <http://www.geocities.ws/buladefisica5/feitura3/binocular.html>

Visão binocular



A coruja tem um bom ângulo de visão binocular, mas possui pequeno campo de visão.

O cavalo tem pequeno ângulo de visão binocular, porém um extenso campo de visão.

Imagens estereoscópicas

- A concepção de imagens tridimensionais é baseada na técnica da estereoscopia: palavra que tem origem em dois termos gregos que representam "visão" e "sólido". É uma simulação da visão binocular.
- Charles Wheatstone (1802-1875), partindo de experiências de Leonardo da Vinci e dos binóculos primitivos, apresentou o estereoscópio, em 1838.



Fonte: adaptado de <https://www.retrovirtual.com/articulos/ingles.html-oculos-3d-inventos-del-siglo-xix-y-poco-historia-4> e <http://etimologias.com.br/historia-da-seculo-do-3d/>

Imagens estereoscópicas



- A imagem ao lado mostra um homem visualizando imagens em um estereoscópio que utiliza espelhos dispostos em ângulo de 45° para fazer a junção do par de imagens que foram produzidas em computador.

Fonte: https://www.ifunicamp.br/~junazzi/prof_junazzi/Esteroscopia/estere_nossos-trabalhos.htm

Como funciona o cinema 3D?

Polarização da luz

- A polarização é um fenômeno associado ao comportamento ondulatório da luz. Além de possuir aplicações em diversas áreas do conhecimento, está presente em nosso dia a dia quer seja na ocorrência de fenômenos naturais, quer seja em dispositivos eletroeletrônicos.
- Esse é o tema central do nosso estudo e nas próximas aulas iremos aprender um pouco mais sobre ele e de que forma pode ser utilizado na produção de imagens tridimensionais.

Como funciona o cinema 3D?



- O fenômeno da **polarização da luz** é utilizada no campo da estereoscopia como uma técnica para separar a informação recebida por cada olho e assim possibilitar a visualização estereoscópica.

- O cinema 3D utiliza essa tecnologia.

Fonte: <https://www.azmakers.com.br/blog/ao-cinema/3d/>

Referências

<https://br.pinterest.com/>
<https://www.azmakers.com.br/blog/ao-cinema/page/2/>
https://www.ifunicamp.br/~junazzi/prof_junazzi/Esteroscopia/estere_nossos-trabalhos.htm
http://www.jornaloverm.com.br/educacao/13/semanasp01_cienciaao vivo.php

Primeira elaboração

Imagens tridimensionais (2 – Primeira elaboração)

A polarização da luz

Professor:

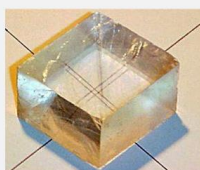
Data:

Imagens tridimensionais

❖ Estrutura da Aula

- Dupla imagem no cristal de calcita;
- As explicações de Huygens e Newton;
- Ondas eletromagnéticas;
- O significado físico de polarizar a luz;
- Processos de polarização da luz;
- O polarizador sintético;
- A polarização da luz no cinema 3D;

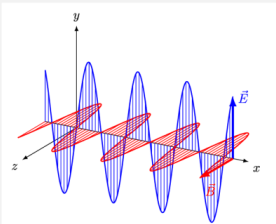
Cristal de Calcita



Fonte: <http://www.pedra-luz.com.br/2009/10/calcita-olica-um-convite-ao-despertar.html>

- Calcita: conhecido também como cristal da Islândia por ser muito abundante nessa ilha.
- A literatura relata que o fenômeno foi observado pela primeira vez em 1669 pelo dinamarquês Erasm Bartholin, ao perceber que o cristal de calcita produzia duas imagens de um mesmo objeto.

Luz - uma onda eletromagnética



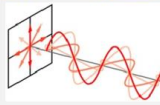
Fonte: <https://roberto-furnari.blogspot.com>

- Uma onda eletromagnética é a combinação de um campo elétrico e um campo magnético oscilando em direções perpendiculares.
- São produzidas quando cargas elétricas livres são aceleradas ou quando elétrons ligados a átomos e moléculas sofrem transições para estados de menor energia.
- Considerando um elétron vibrando em um único plano, a onda eletromagnética produzida teria a configuração representada na animação.

O que significa polarizar a luz?

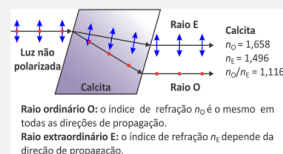


- As fontes comuns de luz emitem ondas eletromagnéticas oscilando em todos os planos possíveis.
- Polarizar a luz significa fazer com que a componente elétrica (e consequente a magnética) da radiação de uma fonte de luz comum (não polarizada) seja posta a se propagar em um plano preferencial de oscilação.



Processos de polarização da luz

❖ Birrefringência



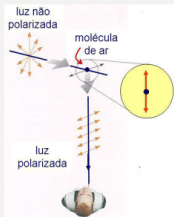
Raio ordinário O: o índice de refração n_o é o mesmo em todas as direções de propagação.
 Raio extraordinário E: o índice de refração n_e depende da direção de propagação.

Fonte: adaptado de:
<https://slideplayer.com.br/slide/1609675/>

- A **Birrefringência** é a propriedade óptica de determinados minerais transparentes (certos cristais como, a calcita, a turmalina e o quartzo por exemplo) que faz a radiação luminosa incidente se dividir em dois feixes ortogonais de radiação polarizada que se propagam com velocidades diferentes dentro do corpo do mineral.

Processos de polarização da luz

❖ Espalhamento

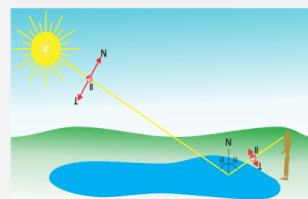


Fonte: adaptado de
<https://slideplayer.com.br/slide/1609675/>

- A luz espalhada em um ângulo de 90° em relação à luz do sol incidente, será parcialmente polarizada.
- Por esse motivo, quando usamos óculos com lentes polarizadas, o céu parece mais escuro quando olhamos em determinadas direções.

Processos de polarização da luz

❖ Reflexão

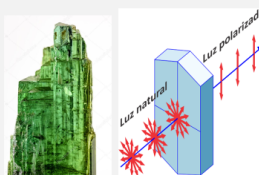


Fonte: Cardoso (2019)

- Quando a luz incide sobre uma superfície de um material dielétrico (não condutor), pode ocorrer a polarização parcial ou total da parte refletida.
- Nesse caso, as ondas são parcialmente polarizadas na direção paralela à superfície refletora.

Processos de polarização da luz

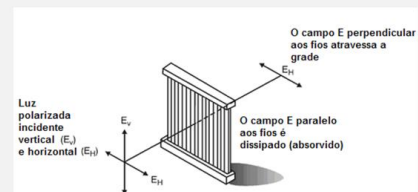
❖ Absorção Seletiva



Fonte: Cardoso (2019)

- Em certos cristais e outras substâncias não só a velocidade de propagação, mas também a absorção, é diferente para a luz polarizada em direções distintas.
- Um cristal de turmalina, por exemplo, absorve a luz em determinados planos de oscilação.

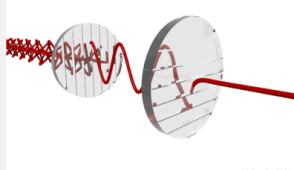
Método artificial de polarização da luz



Fonte: <http://www.novacon.com.br/basean3.htm>

Método artificial de polarização da luz

❖ Polarizador sintético (absorção seletiva)



Fonte: <http://physicsandwaves.pbworks.com>

- Uma forma simples de polarizar a luz visível é usando o filtro sintético inventado em 1938 por Edwin H. Land, cientista norte-americano.
- Funciona baseado no princípio da absorção seletiva, onde um dos componentes da onda que incide sobre ele é absorvido de forma muito mais acentuada do que o outro.

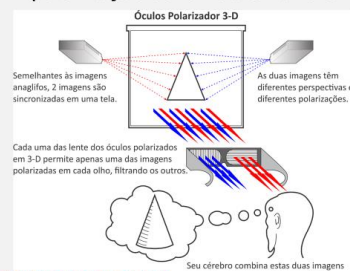
Método artificial de polarização da luz

❖ Polarizador sintético – algumas aplicações



- Instrumento com polarizador fixado: utilizado por odontologistas para obter melhores imagens dos dentes;
- Filtro polarizador para câmera de celular;
- TVs de LCD: tela recoberta com filme polarizador;
- Óculos de sol: as lentes polarizadas evitam o ofuscamento da visão;

A polarização da luz do cinema 3D



Fonte: adaptado de
http://www.vocesabia.net/curiosidades/origem_das_coisas/como_funciona-a-tecnologia-3d/

Referências

- http://www.vocesabia.net/curiosidades/origem_das_coisas/como_funciona-a-tecnologia-3d/
- <http://physicsandwaves.pbworks.com>
- <http://www.novacon.com.br/basean3.htm>
- <https://slideplayer.com.br/slide/1609675/>
- <https://roberto-furnari.blogspot.com>
- <http://www.pedraluz.com.br/2009/10/calcita-otica-um-convite-ao-despertar.html>

C.2 – Texto de apoio (Visão binocular e Estereoscopia)

Como funciona o cinema 3D? (Problematização)

Visão binocular

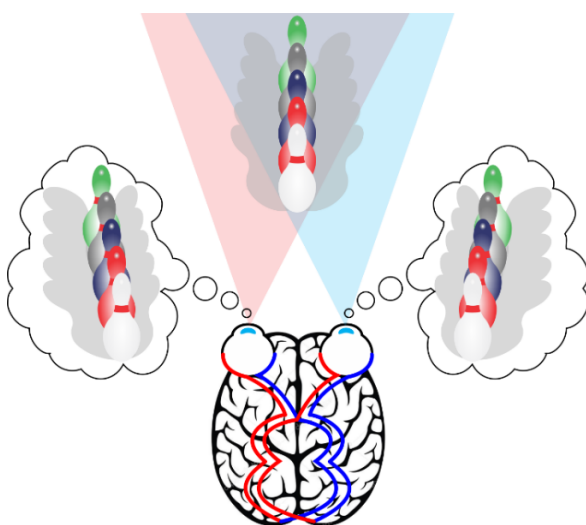
Você já parou para pensar e se perguntou como e por que conseguimos distinguir a posição entre objetos que estão a distâncias relativamente próximas a nós? Sabemos exatamente qual está à frente e qual está ao fundo. Qual é maior e qual é menor. Não é mesmo? Essa situação, que parece simples, pode mudar muito quando os objetos estão muito distantes ou se taparmos um dos olhos. Quando, por exemplo, avistamos de longe dois veículos em uma longa estrada não conseguimos saber qual deles se aproxima e qual se afasta. O mesmo ocorre quando olhamos as estrelas no céu, pois temos a impressão de que todas estão à mesma distância e não temos como afirmar qual delas é maior ou menor.

Isso ocorre pelo fato de que quando visualizamos um objeto a nossa frente, o nosso olho direito “enxerga” uma imagem e o esquerdo “enxerga” outra. Não acredita? Experimente então colocar um dos seus dedos (o indicador) a um palmo dos seus olhos, não mexa a mão e nem a cabeça. Agora abra e feche os olhos alternadamente (se não conseguir fechar um olho só, basta usar a



outra mão para cobri-los alternadamente). O que aconteceu? Percebeu que o dedo ficou “correndo” de um lado para o outro?

O fato de possuímos **visão binocular** (os olhos separados por uma distância média de 6,5 cm e voltado para a mesma direção) faz como que vejamos uma mesma cena sob dois pontos ligeiramente distintos. O cérebro faz a fusão das duas imagens formando uma imagem única

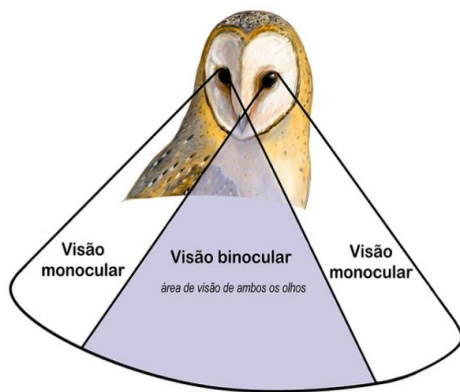


Fonte: <http://www.vision3d.com/stereo.html>

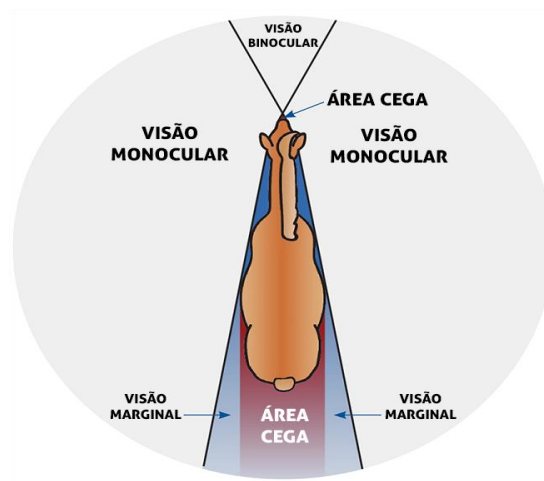
tridimensional do mundo à nossa volta. Esse fenômeno natural é conhecido como **estereoscopia**.

Dessa forma, à distâncias relativamente pequenas, conseguimos distinguir o posicionamento e tamanho relativos dos objetos por conta dos diferentes ângulos que cada um é visto. Por outro lado, se os objetos estão localizados à grandes distâncias, passam a ser vistos praticamente sob o mesmo ângulo. Nessas condições perdemos a percepção de distancia e tamanho relativos dos objetos.

Embora apenas uma parcela das aves possua sinais de visão estereoscópica, praticamente todos os mamíferos, ainda que de forma rudimentar, possuem este recurso.



A coruja tem um bom ângulo de visão binocular, mas possui pequeno campo de visão.



O cavalo tem pequeno ângulo de visão binocular, porém um extenso campo de visão.

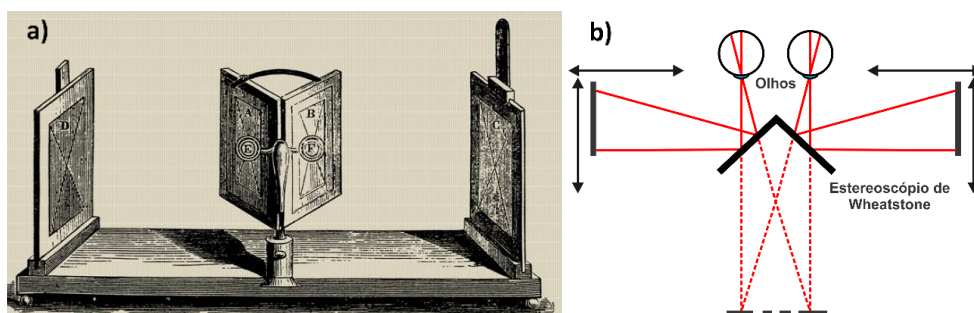
Fonte: Imagens obtidas da internet.

Animais que possuem maior ângulo de visão binocular são bons de “pontaria”, não costumam perder suas presas no momento do bote devido a capacidade que têm de avaliar a posição dos objetos à sua frente. Algumas aves conseguem, em pleno voo, fisgar peixes em um lago, por exemplo. Por outro lado, animais que possuem pequeno ângulo de visão binocular não conseguem avaliar tão bem a posição relativa dos objetos, entretanto, por possuírem um extenso campo de visão, conseguem enxergar tudo o que está a sua volta abrangendo um campo de visão de mais de 230° na horizontal. Por isso, um leão (que possui um bom ângulo de visão binocular) deve se esconder e se movimentar bem devagar antes de investir contra uma zebra (que possui um extenso campo de visão).

Imagens Tridimensionais

A construção de imagens tridimensionais é baseada na técnica da estereoscopia (palavra que tem origem grega e significa visão sólida). É uma técnica que simula a visão binocular do homem e é composta basicamente por duas etapas: a primeira consiste em obter um par de imagens (foto, desenho ou vídeo) registradas de posições ligeiramente distintas; a segunda é fazer com que cada olho visualize somente uma das imagens. O resultado é uma sensação psicológica de profundidade, o que nos dar a impressão de que o objeto está diante de nós.

Podemos pensar que a obtenção de imagens em três dimensões é fruto de estudos recentes ou novidade tecnológica trazida pela popularização do cinema tridimensional (abreviado 3D) na década passada, no entanto, os conceitos básicos e as primeiras imagens não o são. No começo do século XIX, antes mesmo da consolidação da fotografia, o cientista inglês Sir Charles Wheatstone (1802-1875), partindo de experiências de Leonardo da Vinci e dos binóculos primitivos, apresentou o estereoscópio, em 1838.



Estereoscópio de Wheatstone: imagens estereoscópicas cuidadosamente desenhadas visualizadas simultaneamente através de espelhos planos simulam a sensação visual.

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope>

Rapidamente o estereoscópio foi sendo aperfeiçoado. Os desenhos formam substituídos pela fotografia (recém inventada) e os espelhos por prismas e lentes. Além disso, outras formas de se conceber imagens estereoscópicas foram desenvolvidas. Dentre elas, a que projeta o par de imagens na mesma superfície e com o auxílio de determinadas técnicas faz-se a separação da imagem que cada olho deve enxergar (note que nos primeiros estereoscópios as imagens eram colocadas em posições diferentes e depois um espelho fazia a junção delas).

Técnicas para produção de imagens estereoscópicas

Em se tratando de imagens estereoscópicas projetadas em uma superfície, quase sempre é necessário se fazer uso de óculos especiais para separar a informação que cada olho deve receber. Existem várias técnicas, cada uma associada a alguma propriedade ou fenômeno ótico.

Anáglifo

Técnica que consiste em dividir a imagem em seu espectro de cor e enviar uma faixa delas para cada olho. Para visualizar uma imagem ou vídeo em anáglifo o observador deve fazer uso de óculos especiais com filtros de cores (azul e vermelho) a fim de permitir a passagem somente das cores selecionadas para cada olho. Dessa forma o olho que vê através da lente vermelha percebe apenas luz na faixa do espectro relativa à cor vermelha e o olho que vê através do filtro azul percebe apenas a luz nessa faixa do espectro. Essa foi a técnica que levou as projeções 3D para as salas do cinema durante os anos 50 e ainda hoje é comum em notebooks, jogos e kits educacionais, por exemplo.



Polarização da Luz

A polarização da luz também é utilizada no campo da estereoscopia. Em vez de usar cores para filtrar as imagens que cada olho deve ver, utiliza-se a polarização para fazer essa separação. Há a utilização de óculos especiais no qual cada lente é polarizada de forma diferente.



A polarização é um fenômeno associado ao comportamento ondulatório da luz e é o principal assunto do nosso estudo. Nas próximas aulas iremos aprender como ele ocorre, conhecer algumas de suas aplicações tecnológicas e, é claro, compreender de que forma é empregado na concepção de imagens tridimensionais no cinema.

Referencias

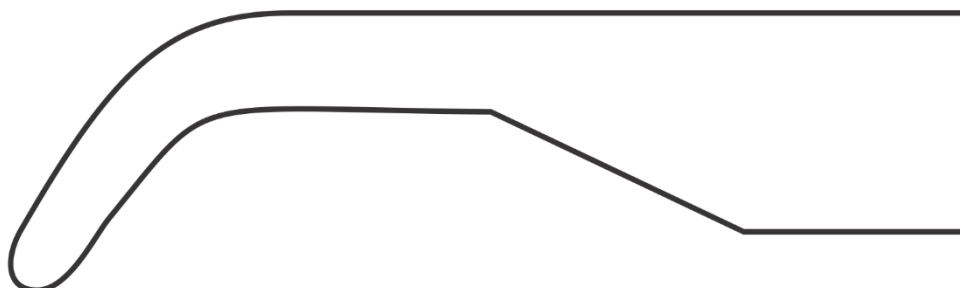
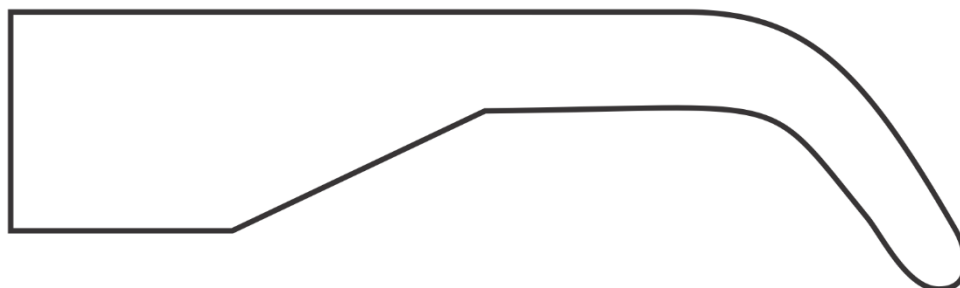
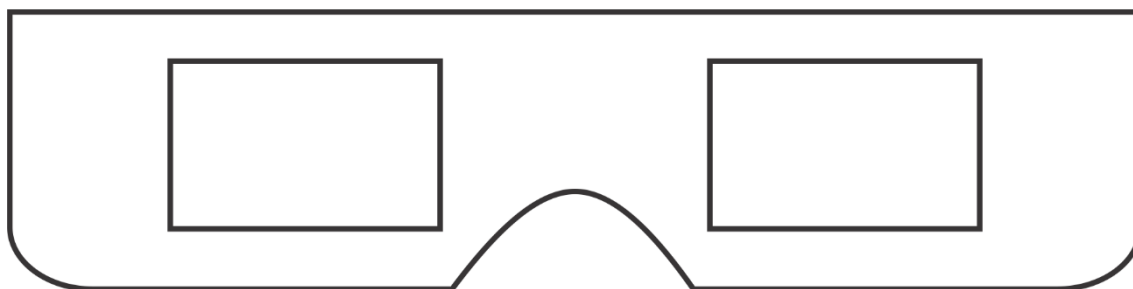
MASCHIO, A. V. A Estereoscopia: Investigação de Processos de Aquisição, Edição e Exibição de Imagens Estereoscópicas em Movimento. **Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “ Julio de Mesquita Filho”**, Bauru, p. 2–231, 2008. Disponível em: <https://www.faac.unesp.br/Home/Pos-Graduacao/Design/Dissertacoes/alexandre.pdf>. Acesso em: 23/05/2019.

TOMOYOSE, A. N. Comparação e Classificação de Técnicas de Estereoscopia para Realidade Aumentada de Jogos. **Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São paulo, p. 125, 2010. Disonível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-20102010-114358/publico/Dissertacao_Alexandre_Nascimento_Tomoyose.pdf. Acesso em: 23/05/2019.

C.3 – Óculos 3D (Moldes)

Óculos 3D

Cole este papel sobre uma cartolina, ou similares, recorte as partes dos óculos, cole as pernas internamente usando uma fita adesiva e cole as lentes (polarizadores) dos óculos por dentro da armação com fita durex.



C.4 – Problemas propostos

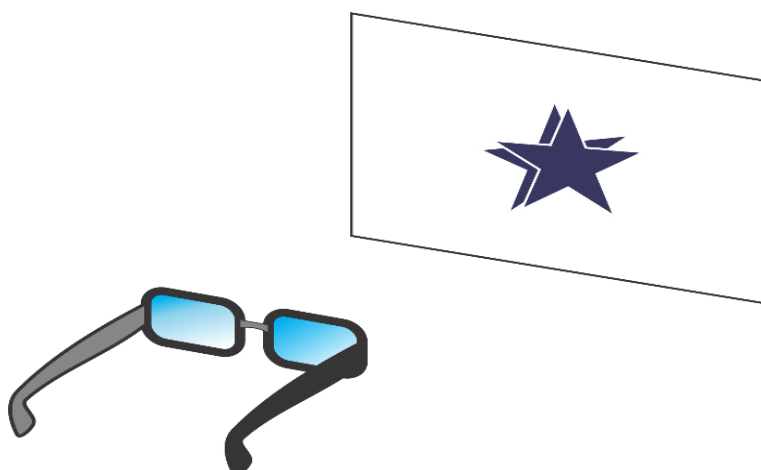
Escola: _____
Prof(a): _____ Disciplina: _____
Aluno: _____ Série: _____ Turma: _____

Lista de exercícios

Polarização da Luz

1. A luz visível pode ser entendida como um tipo de onda eletromagnética que resulta do movimento de elétrons em átomos que receberam determinadas “doses” de energia. Uma fonte comum de luz possui uma quantidade enorme de elétrons que vibram de forma desorganizada e aleatória. De acordo com o que você aprendeu, o que significa polarizar a luz?

2. Existem algumas técnicas pelas quais é possível "imitar" a percepção tridimensional que temos naturalmente do mundo à nossa volta e fazer com que imagens e/ou vídeos pareçam mais “realistas”. Uma das formas de se conseguir essa ilusão de ótica é obter duas imagens em ângulos diferentes de um objeto ou paisagem, projetá-las em uma tela e depois fazer com que cada olho veja, simultaneamente, apenas uma das imagens. O cinema 3D utiliza o fenômeno da polarização para fazer a separação das imagens. Utilizando o esquema abaixo, desenhe como deve se propagar a luz de cada imagem que “saí” da tela de projeção e como devem estar orientados os eixos de polarização das lentes dos óculos 3D.



3. Os monitores de computadores, notebook, as telas de TV's, tablets celulares e similares, transmitem imagens com luz polarizada. Se você olhar para um desses monitores através de uma película polarizadora (ou óculos de sol) e começar a fazer um giro na película, irá perceber que em uma determinada posição a imagem que vem do monitor é nítida e em outra a imagem praticamente desaparece. Explique ou descreva (com desenhos) por que isso ocorre.

4. A luz pode ser polarizada por meio de alguns processos naturais: birrefringência, espalhamento, reflexão e absorção. Descreva como ocorre a polarização em pelo menos dois desses processos.

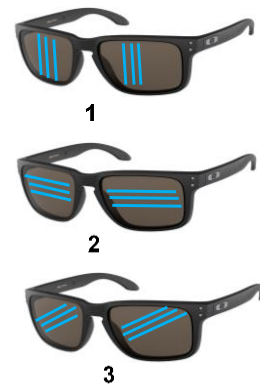
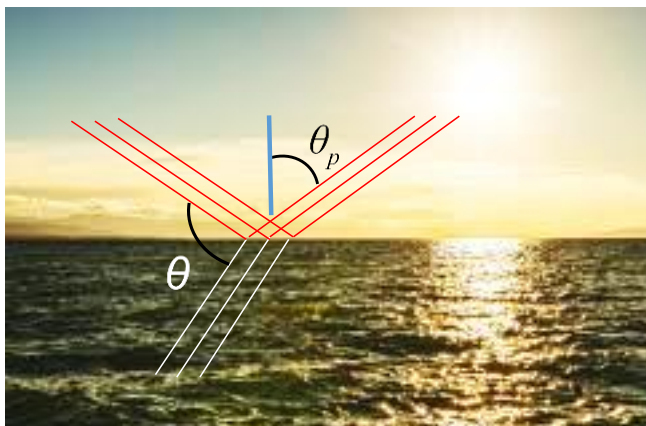
5. Os fotógrafos profissionais utilizam filtros polarizadores em suas câmeras para melhorar a qualidade das imagens, obtendo cores mais nítidas e contrastantes. É possível girar o filtro até que se atinja a qualidade desejada. Isso é possível quando a luz dos objetos presentes na cena incide parcialmente polarizada na lente da câmera. Quais processos de polarização você identifica nessa situação?

6. A figura abaixo representa a luz de um laser polarizada em um plano vertical. Desenhe linhas retas indicando como devem estar orientadas as grades absorvedoras (longas cadeias de hidrocarbonetos) de um polaroide colocado à frente do laser para que a luz seja transmitida (1) e não transmitida (2).



7. Os óculos de sol (com lentes polarizadas) eliminam boa parte dos reflexos da luz em objetos e superfícies evitando ofuscamento. Nestes óculos, os eixos de polarização das duas lentes são dispostos na mesma direção. O que aconteceria caso um colega seu fosse ao cinema e colocasse óculos de sol para assistir um filme 3D?

8. Quando a luz incide sobre a superfície de um bloco de vidro ou sobre a superfície da água, parte dela é refletida, parte é refratada e parte é transmitida. Geralmente, a luz refletida é parcialmente polarizada. No entanto, dependendo do material de que é feito a superfície refletora existe um ângulo de incidência (θ_p) para o qual a luz refletida é quase que totalmente polarizada.



De acordo com a figura acima, para que a luz refletida seja totalmente polarizada, qual deve ser o valor do ângulo θ ? Se você vai passear em um dia de sol e pretende usar óculos escuros polarizados (os eixos de polarização estão indicados pelas linhas retas), qual dos três apresentados é mais apropriado? Justifique.

C.5 – Perspectivas de respostas aos problemas

Questão 1 – Espera-se que o aluno seja capaz de conceituar polarização usando a linguagem escrita e empregando adequadamente as palavras e termos científicos (ondas, propagação, campo elétrico, plano de vibração, absorção etc.).

Questão 2 – Espera-se que o aluno demonstre entendimento de como os princípios da visão binocular e da polarização da luz são utilizados na produção de imagens tridimensionais no cinema. O aluno deve desenhar ondas se propagando da tela em planos de vibração perpendiculares e incidindo na lente dos óculos. Deve desenhar, também, linhas paralelas em uma das lentes e horizontais na outra e indicar quais das ondas incidentes serão transmitidas por cada lente.

Questão 3 – Espera-se que o aluno demonstre o entendimento de que quando luz polarizada incide em polarizador, ela será transmitida com máxima intensidade se o eixo de polarização do polarizador estiver disposto paralelamente ao plano de polarização da luz incidente e que, caso estejam dispostos perpendicularmente, a luz transmitida terá a menor intensidade possível.

Questão 4 – Espera-se que o aluno seja capaz de expressar, através da linguagem escrita, o modelo físico teórico dos, ou de alguns, processos de polarização da luz.

Questão 5 – Espera-se que o aluno consiga compreender outras situações em que os conhecimentos acerca da polarização da luz estejam sendo empregados. Na situação apresentada, o aluno deve identificar dois processos: 1- polarização por reflexão (luz refletida parcialmente polarizada pelas pessoas e objetos presentes na cena) e 2 – Polarização por absorção (lentes com polarizadores colocadas na câmera fotográfica).

Questão 6 – Espera-se que o aluno saiba diferenciar eixo de polarização (direção de vibração das ondas que serão transmitidas) e eixo de absorção (direção de vibração das ondas que serão absorvidas) em um polarizador.

Questão 7 – Espera-se que o aluno demonstre entendimento sobre os mecanismos de produção e visualização de imagens tridimensionais no cinema. O aluno deve explicar que o espectador não terá a percepção tridimensional, pois nos óculos 3D, ao contrário dos óculos de sol, os eixos de polarização das lentes estão dispostos em direções perpendiculares.

Questão 8 – Espera-se que o aluno demonstre entendimento dos princípios trigonométricos envolvidos no processo de polarização por reflexão (lei de Brewster) e de que forma esses princípios estão associados à utilização dos óculos de sol. O aluno deve responder que o ângulo θ é 90° e que os óculos mais apropriados estão indicados na opção 1.