

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO EM ENSINO DE FÍSICA

**UM ESTUDO EXPLANATÓRIO SOBRE AS DIFICULDADES E AVANÇOS DE
ESTUDANTES DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA EM SITUAÇÕES EXPERIMENTAIS
DO CAMPO CONCEITUAL DA MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA
ENVOLVENDO ÓTICA**

Rodrigo Weber Pereira

Dissertação realizada sob a orientação do Prof. Dr. Leonardo Albuquerque Heidemann e coorientação da Profa. Dra. Eliane Angela Veit, apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Leonardo, que, em primeiro lugar, me incentivou a iniciar o Mestrado, e sempre me orientou de forma extremamente competente, animada e incansável.

À minha coorientadora, Eliane, que participou em todos os momentos deste estudo, desde o delineamento de suas atividades práticas, sua aplicação em sala de aula e em minha formação como pesquisador.

À professora Cilaine e ao professor Ricardo, pelas sugestões que me deram na construção das atividades criadas para este estudo.

Aos funcionários do laboratório didático do IF-UFRGS, pela presteza e boa vontade que tiveram quando precisei deles.

Aos estudantes que aceitaram participar deste estudo, colaborando voluntariamente.

À minha família, por me dar suporte em todos os sentidos para continuar nesta caminhada.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 ESTUDOS ANTERIORES.....	11
2.1 MODELOS E MODELAGEM.....	11
2.2 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS.....	15
2.3 DIFICULDADES TÍPICAS EM ÓTICA.....	20
2.3.1 Dificuldades em nível geral.....	20
2.3.2 Dificuldades em nível específico.....	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	27
3.1 A TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE VERGNAUD.....	27
3.2 MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA (MDC).....	29
3.3 MDC+.....	32
4 METODOLOGIAS DE ENSINO E DE PESQUISA.....	36
4.1 METODOLOGIA DE ENSINO.....	36
4.1.1 Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”.....	39
4.1.2 Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”.....	47
4.1.3 Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”.....	49
4.1.4 Episódio de Modelagem “Espectroscopia”.....	51
4.1.5 Considerações gerais sobre os Episódios de Modelagem.....	54
4.2 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	55
4.2.1 O caso escolhido.....	58
4.2.2 Análise de dados.....	59
5 RESULTADOS.....	67
5.1 QUESTÃO DE PESQUISA 1: COMO OS EM PODEM CONTRIBUIR PARA QUE OS ESTUDANTES AMPLIEM SEUS DOMÍNIOS DO CAMPO CONCEITUAL DA ÓTICA, FAVORECENDO A AMENIZAÇÃO DE DIFICULDADES TÍPICAS DOS ESTUDANTES NA APRENDIZAGEM DE CONCEITOS FÍSICOS DA ÓTICA?.....	67
5.1.1 Compreensões sobre a interação da luz com a interface entre dois meios.....	68
5.1.2 Compreensões sobre a representação ondulatória e geométrica da luz.....	72
5.1.3 Compreensões sobre tipos de fonte de luz e sobre características da luz emitida. .	75
5.1.4 Compreensões sobre fatores que influenciam a propagação da luz pela matéria....	80
5.1.5 Resposta à primeira questão de pesquisa.....	84
5.2 QUESTÃO DE PESQUISA 2: COMO OS EM PODEM CONTRIBUIR PARA QUE OS ESTUDANTES DEEM SENTIDO A CONCEITOS DA MDC+, EM PARTICULAR AOS DE MODELO CIENTÍFICO, CONTROLE DE VARIÁVEIS E EVIDÊNCIA EXPERIMENTAL?.....	85
5.2.1 O papel dos modelos científicos nas investigações empíricas.....	86
5.2.2 Relações entre modelos científicos e procedimentos de controle de variáveis em experimentos.....	95
5.2.3 O papel das evidências experimentais na construção de conclusões.....	107

5.2.4 Resposta à segunda questão de pesquisa.....	120
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
Apêndice A - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”.....	133
Apêndice B - Questões das Tarefas Prévias dos Episódios de Modelagem.....	139
Apêndice C - Guia da Atividade do Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”.....	141
Apêndice D - Questões norteadoras para o desenvolvimento de experimentos.....	150
Apêndice E - Protocolo de avaliação de relatórios.....	152
Apêndice F - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”.....	154
Apêndice G - Guia da Atividade do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”.....	162
Apêndice H - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”.....	167
Apêndice I - Guia da Atividade do Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”.....	183
Apêndice J - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”.....	192
Apêndice K - Guia da Atividade do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”.....	199
Apêndice L - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”.....	207
Apêndice M - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”.....	209
Apêndice N - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”.....	210
Apêndice O - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”.....	211
Apêndice P - Guia das entrevistas semiestruturadas.....	212
Apêndice Q - Termo de consentimento livre e esclarecido.....	213

RESUMO

O enfoque na modelagem científica tem sido apontado como uma alternativa para fomentar a vinculação entre teoria e prática no ensino de Física. Alinhado com essa perspectiva, foi realizado um estudo focado na análise das potencialidades da aplicação da metodologia de ensino denominada Episódios de Modelagem (EM) em atividades de laboratório em cursos de graduação em Física, voltadas a situações do campo conceitual da Ótica. A Modelagem Didático-Científica (MDC+) de Heidemann, Araujo e Veit foi adotada como referencial teórico. Foram delineados quatro EM abordando conceitos de Ótica. O primeiro EM dava ênfase ao conceito de “expansão”; o segundo, ao conceito de “modelo teórico de referência”; o terceiro, ao de “controle de variáveis”; e o último, ao de “medição”. Ainda que cada um deles tenha dado ênfase a um conceito específico do processo de modelagem científica, o enfrentamento das situações proporcionadas demandava a mobilização de diversos conceitos do campo conceitual da MDC+. A metodologia de pesquisa empregada foi a de estudo de caso, de natureza explanatória, contando com sete unidades de análise. O caso escolhido foi uma turma da disciplina de Física Experimental IV dos cursos de graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e as unidades de análise foram sete estudantes selecionados dessa turma. A disciplina escolhida tinha um encontro semanal e cada EM se estendeu por três ou quatro encontros, perfazendo um total de 32 horas-aula. Durante a fase de coleta de dados, foram utilizadas como fontes de evidência registros no caderno de campo e nos protocolos de observação, questionários, relatórios produzidos pelos estudantes, entrevistas semiestruturadas e gravação da apresentação dos estudantes durante as discussões finais em cada EM. Por meio da pesquisa, respondemos às seguintes questões: i) como os EM podem contribuir para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da Ótica, favorecendo a amenização de dificuldades típicas dos estudantes na aprendizagem de conceitos físicos da Ótica?; e ii) como os EM podem contribuir para que os estudantes deem sentido para conceitos da MDC+, em particular aos de “modelo científico”, “controle de variáveis” e “evidência experimental”? As evidências da pesquisa indicaram que: i) os EM constituem uma metodologia frutífera para auxiliar os estudantes a darem sentido a conceitos que são, tipicamente, de difícil apreensão no campo conceitual da Ótica; ii) os EM são úteis para fomentar situações aos estudantes que demandam a mobilização de conhecimentos vinculados aos conceitos de “modelo científico”, “controle de variáveis” e “evidência experimental”, auxiliando-os a atribuírem sentido a esses conceitos, avançando no domínio do campo conceitual da MDC+.

ABSTRACT

The focus on scientific modeling has been pointed out as an alternative to promote the link between theory and practice in Physics Teaching. Aligned with this perspective, a study was carried out focused on the analysis of the potentialities of the application of the teaching methodology called Modeling Episodes (EM) in laboratory activities in undergraduate courses in Physics, focused on situations in the conceptual field of Optics. The Didactic-Scientific Modeling (MDC+) by Heidemann, Araujo and Veit was adopted as a theoretical framework. Four EM were outlined addressing concepts in Optics, each emphasizing a specific concept of the scientific modeling process. The first EM emphasized the concept of "expansion", the second, the concept of "theoretical model of reference", the third, the concept of "control of variables" and the last one, the concept of "measurement". Although each of them has emphasized a specific concept of the scientific modeling process, facing the situations provided required the mobilization of several concepts from the conceptual field of MDC+. The research methodology used was an explanatory case study, with seven units of analysis. The chosen case was a class from the discipline of Experimental Physics IV of the undergraduate courses in Physics at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) and the units of analysis were seven students selected from that class. The chosen discipline had a weekly meeting and each EM extended for three or four meetings, making a total of 32 hours. During the data collection phase, records in the field notebook and in the observation protocols, questionnaires, reports produced by students, semi-structured interviews and recording of the student's presentation during the final discussions in each EM were used as sources of evidence. Through this research, we answered the following questions: i) how can EM contribute to students expanding their domains of the conceptual field of Optics, favoring the easing of student's typical difficulties in learning physical concepts of Optics?; and ii) how can EM contribute so that students make sense of the concepts of the MDC+, in particular those of "scientific model", "control of variables" and "experimental evidence"? The evidence of this research indicated that: i) EM are a fruitful methodology to help students make sense of concepts that are, typically, difficult to grasp in the conceptual field of Optics; ii) EM are useful to foster the creation of situations that demand the mobilization of knowledge linked to the concepts of "scientific model", "control of variables" and "experimental evidence", helping students to make sense of these concepts, advancing in the mastery of the MDC+ conceptual field.

1 INTRODUÇÃO

É inquestionável a necessidade da existência de atividades experimentais nos cursos que envolvem ciências naturais (p. ex., Física, Química, etc.) em nível superior, isto é, atividades de laboratório. Ainda que os currículos dos cursos de exatas sofram eventualmente atualizações buscando contemplar os principais avanços na área de ensino e pesquisa científica, a necessidade de se conduzir disciplinas que contemplem atividades práticas prevalece devido à expectativa de que o graduando construa domínio de área não apenas teórico, mas também empírico. Apesar desse reconhecimento, muitos graduandos do curso de Física não veem as disciplinas experimentais como parte essencial de sua formação, encarando as atividades práticas com desinteresse, muitas vezes não despendendo o tempo necessário para realizar as atividades requeridas, frequentemente deixadas de lado em favor das disciplinas teóricas (DAY, 2015).

Diversos fatores podem contribuir para a falta de interesse dos estudantes na área de Física experimental. Conforme aponta Borges (2002), os estudantes percebem as atividades práticas como eventos isolados onde o objetivo é chegar à “resposta certa”, de forma que é dedicado pouco tempo à análise e interpretação dos resultados, tomando a atividade sem significado. Além disso, segundo apontam Deacon e Hajeck (2011), os tradicionais roteiros de laboratório são construídos na forma de receitas, não de desafios, o que faz com que os estudantes vejam as atividades como entediantes. Conforme Hofstein e Lunetta (2004), por sua vez, grande parte do tempo disponível das aulas de laboratório é consumido pela necessidade de aprender detalhes técnicos do aparato experimental utilizado, tornando a aula improdutiva.

O problema da dissociação entre teoria e prática, que permeia os cursos tradicionais de ciências, é uma questão que tem sido abordada há muito tempo na área do ensino, principalmente no Ensino de Física (HODSON, 1992). Nos dias atuais, tanto no nível básico quanto no nível superior, a maior parte das aulas de Física se pauta na resolução de problemas fechados, excessivamente idealizados, construídos em um contexto não familiar ao estudante, produzindo um conhecimento que carece de significado (p. ex., OLIVEIRA, ARAUJO & VEIT, 2017). Ao tratar somente de eventos previamente idealizados ao longo da sua formação, o estudante não desenvolve habilidades para tratar de situações reais, que, por não serem previamente idealizadas, oferecem um nível de complexidade maior. Para tratar de situações reais, o estudante é forçado a fazer uma série de idealizações e simplificações que possibilitarão, eventualmente, que a situação seja tratável à luz de algum conhecimento científico preestabelecido. No nível de graduação, a maioria dos cursos é ministrada com separação entre a parte teórica e experimental. As aulas de Física experimental promovem, em geral, a realização de experimentos guiados por roteiros excessivamente dirigidos, que requerem pouco ou nenhum grau de reflexão por parte dos estudantes sobre os modelos científicos utilizados na análise do experimento, tendo como objetivo supostamente “comprovar” alguma teoria ou modelo (DOUNAS-FRAZER & LEWANDOWSKI, 2018; BREWE & SAWTELLE 2018;

SMITH et. al., 2020). Tendo em vista que uma das competências principais que se espera de um cientista seja a capacidade de manifestar o conhecimento na prática, seja no laboratório, na indústria ou no ensino de Física, diversos estudos já se dedicaram a esse problema.

Nesse contexto podemos indagar quais tipos de atividades têm potencial para possibilitar que os estudantes consigam compreender melhor a vinculação entre aspectos teóricos e práticos da ciência. Diversos autores (e.g., PIETROCOLA, 1999; BOULTER & GILBERT, 2000; HESTENES, 2006; KOPONEN, 2007; BRANDÃO, ARAUJO & VEIT, 2012; ADÚRIZ-BRAVO, 2013; HEIDEMANN, ARAUJO & VEIT, 2018) defendem que o processo de modelagem científica é uma opção didático-metodológica capaz de forjar um elo entre o conhecimento teórico e o prático, aproximando essas duas partes essenciais do fazer científico. Apesar das diferentes concepções epistemológicas e do próprio conceito de modelo científico, conforme discutido em, por exemplo, Kapras *et al.* (1997), Oh e Oh (2011) e Louca e Zacharia (2012), há consenso de que os modelos podem ser pensados como representações simplificadas da realidade, podendo funcionar como mediadores entre teoria e prática.

Alinhados a essas ideias, Brandão, Araujo e Veit (2008; 2011; 2012) fizeram uma costura teórica entre a Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud (1993; 1996; 1997; 1998; 2009; 2012; 2013a; 2013b) e as concepções de modelagem científica de Bunge (1974; 1980; 1989; 2010) para criar um referencial teórico-metodológico chamado Modelagem Didático Científica (BRANDÃO, ARAUJO & VEIT, 2011; 2012), através do qual se argumenta que o processo de modelagem científica pode ser entendido como um Campo Conceitual¹ subjacente aos campos conceituais da Física. Com base nesse referencial, os autores defendem que o ensino de Física deve se focar em expor os estudantes a problemas menos idealizados, propondo o enfrentamento de situações que estimulem a conceitualização do real, proporcionando assim que ampliem seus domínios sobre o campo conceitual da modelagem científica. Não foi objetivo desses autores, no entanto, elucidar como os conceitos relacionados com o processo de contrastação empírica se encaixa no corpo teórico da MDC. Por isso, Heidemann (2015) e Heidemann, Araujo e Veit (2018) expandiram a MDC incorporando as concepções de Bunge (1974) sobre o processo de contrastação empírica das ideias científicas nesse referencial, transformando-o na MDC+. Assim, podemos fazer que a MDC+ abarca o fazer experimental no corpo teórico da MDC.

Uma opção didático-metodológica que tem se mostrado frutífera para defrontar os estudantes com situações que podem dar sentido aos conceitos da MDC+, por meio do enfrentamento de situações-problema menos idealizadas, é denominada Episódios de Modelagem (EM) (HEIDEMANN, 2015; HEIDEMANN, ARAUJO & VEIT, 2018). Resumidamente, os EM são atividades de caráter aberto, pautadas no enfrentamento de problemas com significado que vai além do contexto estritamente acadêmico. Um diferencial das atividades pautadas pelos EM é o fato de que elas podem ser delineadas para dar enfoque em algum conceito de referência do campo conceitual da modelagem didático-científica, como vamos ver à frente. Dessa forma, além de funcionar como uma

1 Segundo Vergnaud (1993), um Campo Conceitual é um conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição do conhecimento.

metodologia de ensino, os EM podem ser utilizados para investigar os avanços e retrocessos no domínio do campo conceitual da MDC+, como explorado por Heidemann (2015) com estudantes de graduação de Física nos campos conceituais da Mecânica, Fluidos e Termodinâmica. No entanto, os campos conceituais de outras áreas da Física, como Eletromagnetismo, Ótica, Mecânica Quântica, etc., ainda não foram investigados à luz da MDC+. Nesta dissertação de mestrado, buscando preencher parte desta lacuna existente na literatura, realizamos uma investigação em uma disciplina de Física Experimental IV, que aborda conhecimentos do campo conceitual da Ótica, com alunos de graduação do curso de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A pesquisa se constitui em um estudo de caso explanatório, seguindo as orientações metodológicas de Yin (2005), tendo como referencial teórico a MDC+ e como metodologia de ensino os EM. As seguintes questões norteiam esta pesquisa:

Questão de pesquisa 1: *Como os EM podem contribuir para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da Ótica, favorecendo a amenização de dificuldades típicas dos estudantes na aprendizagem de conceitos físicos da Ótica?*

Questões de pesquisa 2: *Como os EM podem contribuir para que os estudantes deem sentido para conceitos da MDC+, em particular aos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental?*

Para responder a essas questões, partimos de resultados de estudos sobre modelos e modelagem, atividades experimentais e dificuldades típicas dos estudantes na Ótica, expostos no Capítulo 2. No Capítulo 3, apresentamos a MDC+, o referencial teórico utilizado. Nesse capítulo, foi redigida uma seção específica sobre a Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud com o objetivo de explicitar o papel crucial das situações enfrentadas pelos estudantes no processo de conceitualização da realidade. No quarto capítulo, apresentamos as metodologias de ensino (os EM) e de pesquisa (estudo de caso) empregadas no estudo. No Capítulo 5, expomos os resultados, separando a resposta para cada questão de pesquisa em seções. Por fim, tecemos considerações finais no Capítulo 6.

2 ESTUDOS ANTERIORES

Neste capítulo, situamos o contexto teórico deste estudo com o objetivo fundamentar e justificar as práticas realizadas na turma em que o trabalho de campo aconteceu, assim como para dirigir a análise dos dados coletados na investigação. O referencial teórico desta pesquisa é a MDC+, que tem em seu cerne o conceito de modelo didático-científico. Por conta disso, esperando ter melhores subsídios para introduzir essa construção teórica, apresentamos na Seção 2.1 o conceito de “modelo científico” e de “modelagem científica” segundo concepções contemporâneas de ensino de Ciências. Ainda, tendo em vista que a pesquisa se passa no contexto de uma disciplina de Física Experimental IV, buscamos, em seguida, na Seção 2.2, identificar na literatura: a) o que se espera de atividades experimentais; b) como elas são tradicionalmente conduzidas; e c) como os alunos se beneficiam delas, do ponto de vista da aprendizagem. Incluímos, por fim, a Seção 2.3, na qual as dificuldades típicas dos estudantes sobre conteúdos específicos da Ótica são trazidas à tona. Isso foi feito porque esse é o campo conceitual alvo deste estudo e porque a primeira questão de pesquisa diz respeito a tais dificuldades.

2.1 MODELOS E MODELAGEM

A importância dos modelos e da modelagem científica, especialmente no ensino de Física, já é reconhecida por mais de 30 anos (DOUNAS-FRAZER & LEWANDOWSKI, 2018). Embora o *status* epistemológico dos modelos científicos ainda seja uma questão em aberto, admite-se que eles são essenciais no que diz respeito à produção, disseminação e aceitação do conhecimento científico. Com relação à sua natureza ontológica, os modelos podem ter uma variedade de *status* (GILBERT, 2004): um *modelo mental* é uma representação privada e pessoal feita por um indivíduo, mas a sua característica principal é a sua natureza não explicitável, ou seja, é uma construção que não pode ser compartilhada. Esse modelo pode adquirir o status de *modelo exposto* quando o sujeito - por meio de diversas ferramentas de representação - consegue traduzir esse modelo mental em uma forma que seja compartilhável com outros indivíduos. Na medida em que esse modelo for acessado por diferentes grupos, passando a ser aceito em nível coletivo, podemos chamá-lo de *modelo consensual*. Cientistas trabalhando na fronteira da ciência partilham seu conhecimento por meio de modelos consensuais que sofrem permanentes modificações ao longo do processo de construção do conhecimento, de forma que, nesse caso, é possível chamar o modelo de *científico*, pois o contexto em que ele é aplicado ainda é restrito. Os modelos também podem ser *históricos* na medida em que são suplantados com o passar do tempo por outros modelos, ou por modelos melhores. Em geral, os

modelos curriculares, ou seja, os modelos explorados em situações de ensino, são versões transformadas de modelos científicos e históricos (alternativamente, segundo o referencial teórico adotado nesta pesquisa, podemos chamar esse tipo de modelo de *modelo didático-científico*). Justi e Gilbert (1999) apontam que a utilização dos *modelos híbridos* (isto é, modelos que agregam as características de diferentes modelos históricos), como modelos curriculares, apesar de se constituir em uma ferramenta que permite o ensino de diversos conceitos simultaneamente, constitui um erro do ponto de vista histórico, já que esses modelos nunca existiram na ciência e portanto não poderiam ter sido logicamente suplantados por modelos posteriores. Segundo Hodson (1992), o contato estreito que os estudantes têm com os modelos científicos e históricos proporciona a oportunidade de formação tanto dos seus modelos mentais quanto de modelos expressos, o que se constitui, segundo o autor, em um dos principais aspectos do aprendizado em ciências.

Segundo Mário Bunge (1974), a pedra fundamental para entender a atividade científica moderna é o conceito de modelo científico, tendo esse a função de mediar a relação entre teoria e realidade. Segundo o autor, um modelo pode ser de dois tipos:

1) objeto-modelo (ou modelo conceitual), que é uma representação esquemática de um objeto ou evento real ou suposto como tal. São representações simbólicas simplificadas que auxiliam na descrição de sistemas, processos e fenômenos reais ou supostos como tais. Bunge salienta que um modelo conceitual, por mais elaborado que seja, nunca será uma descrição completa da realidade, tratando-se de uma representação simplificada da realidade. Por exemplo, quando desejamos descrever o comportamento de um fluido escoando por um cano, podemos construir um objeto-modelo que considera um fluido ideal, isto é, que seja incompressível e de viscosidade nula; para descrever o comportamento de um gás monoatômico, podemos construir um objeto-modelo que assume que o gás é ideal, isto é, suas moléculas são pontuais e interagem entre si apenas por colisões perfeitamente elásticas; para descrever o comportamento de uma pedra oscilando presa a uma corda, podemos representar a situação por meio de um objeto-modelo que considera a pedra como um ponto e a corda que a suspende como desprovida de massa, etc. A descrição simplificada da realidade seria o primeiro passo para a elaboração de um modelo teórico.

2) modelo teórico (ou teoria específica) é uma construção hipotética-dedutiva calcada no objeto-modelo que lhe deu origem, sendo representada por um conjunto de hipóteses e formalizada - em geral - por meio da linguagem matemática. Continuando os exemplos acima mencionados, podemos dizer que a Lei de Bernouli é a construção hipotética-dedutiva que tem como base o objeto-modelo "fluido ideal"; o modelo teórico que dá origem à equação de Clapeyron tem como objeto-modelo o "gás ideal"; já o modelo do pêndulo simples é o resultado das hipóteses feitas na construção do objeto-modelo (corda sem massa com um objeto pontual preso à sua extremidade, etc.).

A construção de um objeto-modelo não é o único pré-requisito para que se obtenha o que Bunge denomina de modelo teórico. Segundo esse autor, é preciso que o modelo conceitual seja suportado por alguma teoria geral, com a ajuda da qual se pode deduzir relações teóricas. Por exemplo, o modelo teórico do pêndulo simples é construído quando se utiliza a mecânica newtoniana

para deduzir resultados a partir do objeto-modelo que representa o corpo oscilante em uma corda. A Formulação Newtoniana da Mecânica não é a única teoria geral que poderia ser usada. Nesse caso a Formulação Lagrangiana poderia ser aplicada. Bunge destaca que, em geral, quando se constrói um objeto-modelo, quem o faz já pensa na sua inserção em alguma teoria geral, tendo em vista as particularidades de cada teoria. Assim, o processo de construção do modelo conceitual e a adoção de uma teoria geral não são eventos dissociados. Neste trabalho adotamos as concepções de Bunge sobre modelos e o processo de modelagem científica.

Apesar do significado do termo “modelo” não ser consensual, grande parte dos epistemólogos da ciência utilizam o termo “representação” quando se referem a um modelo científico (OH & OH, 2011). Essas representações precisam ser explicitadas por meio de construções externas, pois, como vimos, um modelo (científico, histórico ou didático-pedagógico) é válido por já ter passado pelo crivo da avaliação pelos pares. Assim, um dos pré requisitos para que um modelo seja válido é que o seu significado possa ser compartilhado, o que requer que os conceitos imbricados em sua construção sejam explicitáveis. Tais conceitos podem ser de natureza concreta ou abstrata. São exemplos de conceitos concretos a massa, o comprimento e a velocidade dos objetos; como conceitos abstratos, podemos citar, por exemplo, o conceito de spin de uma partícula, o estado de polarização de um fóton, uma superfície gaussiana, etc.

Grande parte dos estudantes não compreende o caráter representacional dos modelos científicos e os encaram como uma imagem especular da realidade (p. ex, ZU BELZEN, KRÜGER & VAN DRIEL, 2019). Essa falta de clareza com relação à existência de simplificações da realidade, inerentes aos modelos científicos, constitui uma das principais razões para a dificuldade por parte dos estudantes em construir seus próprios modelos científicos (COLL & LAJIUM, 2011; HENZE, VAN DRIEL & VERLOOP, 2007). O ensino centrado no processo de modelagem científica, que têm como elemento central os modelos científicos, pode ser uma alternativa para sanar essa deficiência no ensino tradicional. Desta forma, é importante compreender como os modelos podem se apresentar no contexto de sala de aula em suas diversas formas.

O processo de construção de um modelo científico, ou o processo de modelagem científica propriamente dita, engloba um conjunto de ações com o intuito de resolver uma situação-problema, ou representar um evento físico (LOUCA & ZACHARIA, 2012). Apesar das diferentes concepções dos diversos pesquisadores da área de ensino de Ciências, Louca e Zacharia (idem) identificaram um consenso na literatura sobre o processo de modelagem. Segundo os autores, esse processo envolve inicialmente um estímulo (usualmente um problema ou uma questão de pesquisa) e as seguintes quatro etapas: a) coleta de dados e observação de um evento; b) construção de um modelo do evento (baseado nas observações); c) avaliação do modelo construído, isto é, sua adequação para descrever a situação-problema, bem como a determinação do seu domínio de validade e poder de predição; e d) revisão e expansão do modelo para uso em diferentes situações (CONSTANTINO, 1999; HESTENES, 1992, 1997; LEHRER & SCHAUBLE, 2006; LESH et al., 2000; METCALF, KRAJCIK & SOLOWAY, 2000; WINDSCHITL, THOMPSON & BRAATEN, 2008). Louca e Zacharia (2012) relatam, em sua revisão da literatura, que o ensino por meio do enfoque no processo de

modelagem científica promove avanços em diferentes áreas. Ressaltamos três dessas áreas, pois elas se destacam do ponto de vista do referencial teórico a ser utilizado posteriormente, a saber: a área cognitiva, metacognitiva e epistemológica. Esses aspectos do ensino por meio da modelagem científica permeiam todo o processo, não podendo existir isoladamente (BARAB et al. 2001; FRETZ et al. 2002).

Do ponto de vista das contribuições cognitivas, podemos salientar que o ensino através de modelagem promove uma diversidade de resultados de aprendizagem como uma função dos métodos didáticos utilizados. Por exemplo, Hansen *et al.* (2004) identificaram que atividades de modelagem de sistemas dinâmicos governados por interação à distância são mais bem compreendidas por meio da construção de representações gráficas tridimensionais. O conhecimento construído por meio do processo de modelagem científica também dá suporte aos estudantes na hora de desenvolver seus próprios modelos sem ser influenciados por construções prontas características do ensino de ciências tradicional (PENNER, 2000). As habilidades cognitivas mobilizadas - e portanto fortalecidas - pelos estudantes ao se defrontarem com atividades de ensino centradas na modelagem são destacadas por diversos autores (e.g., PAPAERIPIDOU, CONSTANTINOU & ZACHARIA, 2009; STRATFORD, KRAJCIK & SOLOWAY, 1998) e podem ser sumarizadas nas seguintes: a) análise e decomposição de um sistema físico em suas partes; b) desenvolvimento do pensamento relacional, capaz de identificar as relações causais entre as diversas partes de um sistema; c) capacidade de síntese, na medida em que um modelo tem que ser capaz de capturar os fatores relevantes de um sistema; e d) teste do modelo e busca pela solução de eventuais problemas.

A metacognição se refere aos conhecimentos que o sujeito tem quanto à sua própria cognição, isto é, uma consciência sobre os processos e caminhos que levam à sua própria aprendizagem. Sabe-se hoje que o processo de aprendizagem é facilitado quando elementos de metacognição são evocados pelo sujeito, pois um elevado grau de consciência sobre as próprias estruturas cognitivas impulsionam pensamentos ou procedimentos de aprendizagem mais frutíferos, na medida em que o estudante constrói um controle executivo e autorregulador de suas ações (ROSA, 2011). Papaevripidou, Constantinou e Zacharia (2009) argumentam que estudantes que têm conhecimentos metacognitivos com relação ao processo de modelagem científica têm maior capacidade de realizar procedimentos autorregulatórios, ou seja, maior capacidade de regular seus comportamentos mesmo diante de obstáculos. Isso sugere que o professor deve fazer esforços ao longo de sua prática para tornar os alunos cientes sobre o processo de modelagem científica, trabalhando no sentido de fomentar concepções mais realistas sobre a natureza da ciência e da construção do conhecimento científico. Apesar disso, a literatura ainda não elucidou em detalhes quais os processos cognitivos e metacognitivos que fazem com que o aluno tenha melhor aprendizagem por meio do ensino através do processo de modelagem científica.

Com relação ao aspecto epistemológico, o ensino centrado no processo de modelagem científica favorece o entendimento do papel que os modelos científicos têm na ciência, destacando a sua utilização como mediadores entre teoria e realidade, auxiliando os estudantes a abandonar a crença de que modelos podem ser representações especulares do mundo físico. Além disso, destaca

o papel fundamental da utilização de evidência experimental no processo de contrastação empírica para dar suporte ou não a uma teoria ou modelo. Segundo White (1993), o ensino através do processo de modelagem científica tem potencial para integrar o ensino curricular com os principais aspectos sobre a natureza, propósito, construção e validação do conhecimento científico, favorecendo uma visão por parte dos estudantes mais alinhada com as concepções contemporâneas sobre a ciência e o fazer científico.

Em particular, a segunda questão de pesquisa desta dissertação envolve três conceitos fundamentais do processo de modelagem: os conceitos de “modelo científico”, “controle de variáveis” e “evidência experimental”. Por meio das atividades criadas para os fins da pesquisa, buscamos enfatizar que modelos têm o papel de mediador no processo de representação de objetos/eventos reais, ou supostos como tais, e não são cópias especulares da realidade. A metodologia empregada, explicada na Seção 4.1, destaca que modelos científicos são construções humanas, criados por meio de hipóteses e idealizações buscando descrever fenômenos reais ou supostos como tais. Buscamos, ainda, destacar que experimentos científicos são situações artificiais, mais simples do que as encontradas na natureza, delineadas com um controle de variáveis para se limitar ao máximo os efeitos dos fatores desprezados na construção do modelo de referência subjacente à investigação. As atividades também enfatizam que para validar o modelo teórico em questão, é preciso comparar as evidências experimentais com as previsões do modelo, por meio da contrastação empírica. A contrastação empírica das ideias científicas é um elemento central da MDC+, referencial teórico desta pesquisa, explicado na Seção 3.3. A resposta específica para a segunda questão de pesquisa, envolvendo os conceitos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental é desenvolvida na Seção 5.2.

A seguir, apresentamos resultados da literatura sobre a condução de atividades experimentais no contexto do ensino de Ciências.

2.2 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

Desde muitas décadas, é tácita a concepção de que atividades de laboratório são importantes para o ensino de Física (PINHO-ALVES, 2000). Um momento marcante desta realidade tem origem em meados do século passado, quando, no contexto da corrida espacial, houve um movimento de reforma curricular que enfatizava a inserção de componentes de cunho prático-experimental em cursos de Ciências. Nos Estados Unidos, destacaram-se os projetos *Physical Science Study Committee* (PSSC), *Harvard Project Physics*, e o *Biological Science Curriculum Study* (BSCS). Tais projetos ficaram conhecidos internacionalmente e acabaram sendo transpostos para o contexto de outros países. Em particular, o ensino de Física no Brasil foi bastante influenciado pelo programa PSSC, que tinha um enfoque no ensino de Física por meio de experiências. Apesar da grande

expectativa sobre os resultados do projeto, o mesmo sofreu diversas críticas. Dentre elas, destacam-se a falta de infraestrutura, materiais e mão de obra qualificada, e a falta de adequação à realidade do estudante brasileiro, que carecia de formação básica para acompanhar as atividades propostas (HAMBURGER et al., 2001). Ainda, do ponto de vista epistemológico, uma das maiores críticas recebida pelo projeto era a sua feição empirista-indutivista, pois as atividades transmitiam a ideia de que o estudante atuava como um “jovem cientista” que pode descobrir leis no laboratório seguindo um suposto “método científico” (GASPAR, 2004).

A necessidade de reformar esse panorama educacional fomentou, na década de 1970, o desenvolvimento de projetos genuinamente brasileiros como o Projeto de Ensino de Física (PEF), o Projeto Brasileiro de Ensino de Física (PBEF) e o Física Auto-Instrutivo (FAI). Esses projetos privilegiavam uma participação mais ativa do estudante como protagonista de seu próprio aprendizado, inclusive nas atividades experimentais, situações nas quais os estudantes passaram a ter mais autonomia em comparação com o PSSC, no qual as investigações empíricas se resumiam a seguir um roteiro fechado (PEREIRA & MOREIRA, 2017). Entretanto, segundo Moreira (2000), tais projetos foram muito claros sobre como se deveria ensinar Física (por meio de experimentos, demonstrações, projetos, etc.), porém não deixavam claro os caminhos pelos quais o estudante aprenderia Física. O declínio desses projetos foi, no entanto, simultâneo à consolidação da área de pesquisa em Ensino de Física no país (DIOGO & GOBARA, 2008). A partir daí, muitas pesquisas sobre o papel das atividades experimentais no ensino de Ciências foram conduzidas, tendo parte delas concluído que os estudantes se beneficiam dessas atividades (p. ex. HODSON, 1994; BORGES, 2002; HOFSTEIN & LUNETTA, 2004; PEREIRA & MOREIRA, 2017). A seguir, buscamos resumir o resultado dessas pesquisas, destacando potencialidades e limitações associadas às aulas experimentais no contexto do ensino de Ciências.

Atividades experimentais são tipicamente concebidas para serem realizadas em grupo, com alto nível de interação entre estudantes e professores. Esse ambiente é reportado como propício para a construção de relações sociais colaborativas, potencializando a aprendizagem dos estudantes (GASPAR, 2004). De fato, a literatura aponta que o estudante que participa de atividades experimentais desenvolve atitudes positivas não apenas em relação à experimentação, como também pela própria ciência (ABRAHAMS & MILLAR, 2008; BAROLLI, LABURÚ & GURIDI, 2010; MONTINO et al., 2011). Em grande parte, isso ocorre porque durante as aulas práticas há a possibilidade de conexão entre a teoria e prática, isto é, a vinculação dos conceitos científicos trabalhados em sala de aula com os fenômenos naturais por meio de investigações conduzidas pelos próprios estudantes (HODSON, 1994; HOFSTEIN & LUNETTA, 2004). Assim, o estudante tem a sensação de estar “fazendo Ciência”, e pode dar sentido aos conhecimentos aprendidos.

Atividades experimentais também podem facilitar a aprendizagem e a apreensão de conceitos que, sem a prática, seriam trabalhados apenas na aula teórica (HEIDEMANN, 2011). Para isso ocorrer, no entanto, é preciso que as atividades sejam calcadas em sólido referencial epistemológico, deixando claros aspectos relacionados à natureza da Ciência e à construção do conhecimento científico. Conduzidas assim, atividades práticas têm potencial de contribuir para auxiliar os

estudantes a superar concepções empiristas-indutivistas ingênuas (HEIDEMANN, 2015). Um fator facilitador nesse processo, que deveria ser levado em consideração por professores ao delinear atividades experimentais, são as ideias prévias dos estudantes. De fato, ao serem defrontados com um novo fenômeno, os estudantes buscam seus conhecimentos prévios antes de estabelecerem relações entre a tarefa a ser executada e os novos conhecimentos científicos estudados (MONTINHO et al., 2011). Nesse sentido, Borges (2002) aponta que as potencialidades das aulas experimentais são mais bem exploradas quando o estudante: i) já construiu algum conhecimento prévio sobre a situação estudada; ii) já possui alguma segurança sobre as técnicas e procedimentos necessários para enfrentar o problema; iii) tem interesse sobre o fenômeno estudado; e iv) tem suas expectativas em relação às atividades atendidas.

Outra potencialidade das atividades experimentais é a aquisição de habilidades práticas e a familiarização com técnicas típicas de laboratório, como a calibração de instrumentos, procedimentos confiáveis de coleta de dados e a organização de informações em matrizes quantitativas e qualitativas de análise (BORGES, 2002; HOFSTEIN & LUNETTA, 2004). A construção de tais habilidades por parte dos estudantes não tem fim em si próprio, mas sem elas é impossível conceber a realização de investigações empíricas (da mesma forma como é impossível ler um artigo em outro idioma sem dominar minimamente a língua).

Por fim, a literatura reporta que envolver os estudantes em atividades experimentais contribui para o desenvolvimento de competências relacionadas à argumentação lógica baseada em evidências (LUBBEN et al., 2010). A apreensão dessas competências é essencial para entender como ocorre o processo de construção do conhecimento pela Ciência, já que a argumentação científica se ampara em evidências para avaliar proposições. Assim, os estudantes podem exercitar o “fazer científico” mesmo que os experimentos realizados tenham fins puramente didáticos.

Para que as características acima citadas marquem as aulas experimentais, tornando-as frutíferas para o estudante em termos da aprendizagem, é preciso que seus objetivos de aprendizagem sejam bem definidos. No entanto, Parreira e Dickman (2020) relatam que, tipicamente, as aulas experimentais são concebidas para se atingir praticamente qualquer objetivo, sendo que, muitas vezes, nem mesmo os professores que as conduzem conseguem explicar onde pretendem chegar. Os autores apontam que a visão mais comum sobre o objetivo das aulas de laboratório, tanto para os estudantes quanto para os professores, é a concepção genérica de que as aulas experimentais servem para “visualizar a física/teoria na prática”. Outro resultado apontado é que, quando os professores e estudantes têm clareza sobre o objetivo das aulas experimentais, a aprendizagem por meio da prática é mais significativa. A diversidade de objetivos atribuídos às aulas experimentais é abundante, podendo gerar discussões construtivas. Porém, se essa diversidade de objetivos for consequência da falta de reflexão e discussões sobre o que se busca no laboratório de Física, ela pode não trazer benefício algum (idem).

Recentemente, alguns estudos (p. ex. WILCOX & LEVANDOWSKI, 2017; HOLMES E WIEMANN, 2018) têm apontado que o uso de laboratórios didáticos é mais efetivo quando se tem o objetivo de ensinar práticas experimentais, em invés de reforçar a instrução de sala de aula. Nessa

perspectiva, a compreensão dos processos de investigação são o objetivo da aula de laboratório, não a resposta final ao problema proposto. O importante é que os estudantes se engajem nos seguintes processos: tratamento e análise de dados, avaliação de erros experimentais, proposição e teste de modelos, atitude científica (p. ex. comportamento crítico e argumentação fundamentada em evidência), comparação de resultados teóricos e experimentais (HEIDEMANN, 2015).

Entretanto, a literatura aponta que, tradicionalmente, as aulas de laboratório são conduzidas de forma desinteressante e pouco significativa para os estudantes (BORGES, 2002; HOFSTEIN & LUNETTA, 2004; DEACON & HAJEK, 2011). Diversos fatores são apontados como causas para esse problema. Dentre eles, as atividades excessivamente fechadas, realizadas por meio de roteiros demasiadamente dirigidos, do tipo “receita de bolo”, que contêm uma série de instruções cujo objetivo é guiar os passos do estudante na execução do experimento (HODSON, 1994; HOFSTEIN & LUNETTA, 2004; TRUMPER, 2003). Segundo Abrahams & Millar (2008), isso faz com que os estudantes despendam a maior parte do tempo das aulas manipulando equipamentos de forma essencialmente mecânica, sem reflexões sobre os dados coletados ou sobre os modelos teóricos que fundamentam a investigação, tornando o trabalho experimental sem sentido. Para uma aprendizagem significativa, é importante que os estudantes disponham de tempo não apenas para interagir com os materiais, mas também para reflexão e discussão sobre os resultados com colegas e professores (HOFSTEIN & LUNETTA, 2004).

Por outro lado, o extremo oposto das atividades fechadas são as excessivamente abertas. É sabido que estudantes frequentemente não desejam ou têm dificuldades em assumir o papel de protagonista nas suas próprias aprendizagens (DEACON & HAJEK, 2011), preferindo delegar grande parte do trabalho ao professor. Por conta disso, ao serem confrontados com atividades sem objetivos claramente definidos, com roteiros pouco guiados, que exponham suas faltas de conhecimento e/ou experiência em uma dada área, podem desenvolver inclusive atitudes negativas sobre as aulas experimentais (ANDRÉS, PESA & MOREIRA, 2006). De fato, as atividades abertas podem ser classificadas em níveis de dificuldade para os estudantes. Essa dificuldade depende das características da investigação, dos procedimentos usados para resolver problemas e das conclusões possíveis, que podem ser dadas aos estudantes, ou deixadas em aberto (BORGES, 2002). O nível da investigação pode ser calibrado pelo professor, levando em conta o nível de conhecimento dos estudantes e suas experiências prévias no laboratório. Assim, percebe-se que há um ponto de equilíbrio entre atividades abertas e fechadas, no qual as atividades experimentais são realizadas de forma mais significativa pelos estudantes.

Independentemente da forma como as atividades experimentais são conduzidas – mais fechadas ou mais abertas -, podemos identificar algumas dificuldades gerais dos estudantes ao lidar com situações práticas de laboratório. Uma dessas dificuldades consiste em comparar as predições dos modelos científicos com resultados experimentais. Contribuem para esse problema dois aspectos: i) falta de conhecimento sobre incertezas experimentais e sua propagação (VOLKWYN, 2008); e ii) a crença de que existe um valor “verdadeiro” para uma medida (BUFFLER, LUBBEN & IBRAHIM, 2009). Possivelmente contribui para a primeira dificuldade a falta de tempo disponível para

que os estudantes façam múltiplas medidas de uma mesma grandeza, aumentando a base estatística. Também a própria dificuldade, em termos matemáticos, do método de propagação de incertezas possivelmente se constitui em um obstáculo, especialmente para estudantes que ainda estão em vias de aprender cálculo. Já o segundo aspecto tem relação com crenças dos estudantes sobre a natureza do conhecimento científico. Estudantes que entendem os modelos científicos como descrições fidedignas da realidade têm propensão a encarar as diferenças entre evidências experimentais e predições dos modelos puramente em termos de “erros” ou “deslizes” experimentais, ignorando o fato de que um modelo é algo falho, construído com base em simplificações da realidade, e que a montagem experimental jamais corresponderá a tais simplificações (RAVILOLO et al., 2011).

Guillon e Séré (2002) relatam ainda que estudantes têm dificuldades em fazer estimativas envolvendo ordens de grandeza, sendo que essa habilidade é melhor desenvolvida em atividades abertas, que demandam esse tipo de autonomia por parte do estudante. Os autores ainda relatam que, em situações de modelagem, os estudantes têm dificuldade em associar experimentos com diferentes modelos científicos. Ou seja, é comum a crença de que só há uma abordagem experimental válida, na qual se extrai o conhecimento (verdadeiro) pela aplicação de um único modelo. Essa crença possivelmente vem do histórico de realização de experimentos por meio de roteiros excessivamente dirigidos e fechados, nos quais a montagem experimental e o modelo eram previamente definidos, não deixando espaço para outras interpretações. De fato, estudantes que são acostumados a realizar experimentos preconcebidos, que requerem pouca ou nenhuma habilidade envolvendo a montagem experimental, também possuem mais dificuldade em realizar investigações empíricas que demandam algum grau de engenhosidade ou criatividade, necessitando de mais auxílio técnico do professor (DEACON & HAJEK, 2011).

Nesta pesquisa, as atividades experimentais foram delineadas por meio dos EM, uma metodologia de ensino que leva em consideração os fatores que podem condicionar a atitude e o aprendizado dos estudantes nessas situações, conforme os resultados dos estudos apresentados. As atividades experimentais conduzidas pelos EM são caracterizadas por: a) um nível moderado de abertura, evitando que os estudantes se sintam perdidos; b) levar em consideração os conhecimentos prévios dos estudantes; c) possuírem objetivos de aprendizagem bem definidos; d) estimularem a reflexão sobre o delineamento experimental e os dados coletados, em detrimento de uma abordagem mecânica; e e) fazer referência a eventos do cotidiano, em oposição às atividades tradicionais, que se pronunciam sobre situações com implicações limitadas ao contexto acadêmico. A seguir, apresentamos alguns resultados encontrados na literatura sobre as principais dificuldades por parte dos estudantes em apreender conceitos específicos do campo conceitual da Ótica.

2.3 DIFICULDADES TÍPICAS EM ÓTICA

O objetivo desta seção é fornecer subsídios para responder à primeira questão de pesquisa, isto é: “*Como os EM podem contribuir para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da Ótica, favorecendo a amenização de dificuldades típicas dos estudantes na aprendizagem de conceitos físicos da Ótica?*”. Para isso, buscamos, primeiramente, explicitar as principais dificuldades, equívocos e fontes de equívocos de estudantes universitários ao aprender conceitos de Ótica. Uma vez identificadas, teremos condições de avaliar o papel dos EM no domínio dos estudantes sobre o campo conceitual da Ótica. Não é nossa pretensão desenvolver técnicas de superação ou mitigação de dificuldades de aprendizagem. Vamos nos concentrar na avaliação dos EM quanto às suas potencialidades no ensino de Ótica, que serão aplicados de acordo com seu design original.

Na literatura, há trabalhos que elencam as principais dificuldades enfrentadas por estudantes na apreensão de diversos conteúdos da Ótica e sobre o próprio conceito de luz (KALTAKCI & ERYILMAZ, 2009; DJANETTE & FOUAD, 2014; WIDIYATMOKO & SHIMIZU, 2018; KALTAKCI, ERYILMAZ & MCDORMOTT, 2016). Nesses estudos, reconhece-se que a origem das dificuldades em Ótica se situam em dois níveis: um geral, comum a todos os conteúdos, e um específico, relacionado à Ótica. Por isso, dividiremos a explicação em duas seções, cada uma dedicada a um nível.

2.3.1 Dificuldades em nível geral

Mesmo que a visão seja um dos sentidos mais importantes, os indivíduos - independentemente da idade, habilidade, ou nível de estudo – tendem a ter sérias dificuldades em entender a natureza da luz, sua propagação pelo espaço, a visão e a formação de imagens (KALTAKCI, ERYILMAZ & MCDERMOTT, 2016). Muito antes de se envolverem em um processo de instrução formal, estudantes constroem conceitos por meio da interação com o ambiente. Essa experiência propicia o desenvolvimento de concepções sobre os fenômenos que nem sempre estão alinhadas com a interpretação científica. Por isso, durante o processo de aprendizagem no contexto formal de ensino, tais concepções podem se constituir em obstáculos epistemológicos para a construção de novos conhecimentos científicos (HAMMER, 1996; ALLEN, 2014).

No contexto formal de ensino, a literatura aponta que estudantes têm dificuldade em aprender conteúdos científicos relacionados à luz e instrumentos óticos (GALILI & HAZAN, 2000), sendo esse um dos assuntos que mais favorecem a criação de concepções equivocadas (YALCIN et al., 2009). Identificamos que, em nível geral, as dificuldades dos estudantes na apreensão de conteúdos

científicos têm origem na/nos: i) sua experiência diária; ii) linguagem; iii) professores; e iv) livros didáticos. A seguir explicamos cada uma dessas fontes, dando exemplos.

A experiência diária é uma fonte de concepções equivocadas porque os estudantes constroem significados e explicações para os fenômenos que ocorrem no mundo à sua volta que não são alinhados com a perspectiva científica (AGNES et al., 2015). Por exemplo, no dia a dia os estudantes se referem à luz, tipicamente, como uma propriedade ou qualidade de um local (“precisamos de mais luz aqui!”, “tem luz lá fora?”, “essa pessoa é iluminada”, “a luz está fraca”, etc.), em vez de pensar na luz como uma forma de energia se propagando. Já a linguagem pode ser uma fonte de concepções equivocadas quando se usa o vocabulário científico na linguagem do dia a dia (KALTAKCI & ERYILMAZ, 2009). Por exemplo, ao dizer “a mesa é vermelha” em vez de “a mesa está refletindo luz com comprimento de onda que corresponde à cor vermelha”; ao dizer “te vejo no espelho” em vez de “vejo o prolongamento dos raios de luz, que de você partem, refletidos no espelho”, etc. Evidentemente, a linguagem científica no dia a dia não é adequada, sendo que esses exemplos servem apenas para ilustrar como a linguagem cotidiana diverge da científica. O professor, como o agente promotor de experiências de aprendizagem, tem papel relevante na formação das concepções científicas dos estudantes, inclusive de concepções equivocadas. Isso pode ocorrer porque muitos professores possuem concepções equivocadas (LING, 2017), não conseguem se comunicar de forma efetiva com seus estudantes ou não percebem suas dificuldades (GUDYANGA & MADAMBI, 2014). Por fim, apesar de serem uma ferramenta fundamental no processo de ensino-aprendizagem, livros didáticos podem induzir os alunos ao erro. Por exemplo, estão entre as fontes mais comuns de equívocos as representações esquemáticas ou figuras pouco claras, explicações incompletas ou incorretas e o uso de símbolos que os estudantes não entendem (GABEL, 1998; DEVETAK, VOGRINE & GLAZAR, 2007). De fato, durante esta pesquisa, encontramos um erro crucial em um livro didático (HALLIDAY & RESNICK, 2009) usado pelos estudantes, livro esse em sua 8ª edição. O referido erro dizia respeito à componente do campo elétrico absorvida quando a luz não polarizada atravessa um polarizador. No livro, a direção de absorção e transmissão estavam trocadas.

A Figura 1 resume as principais fontes de equívocos por parte dos estudantes.

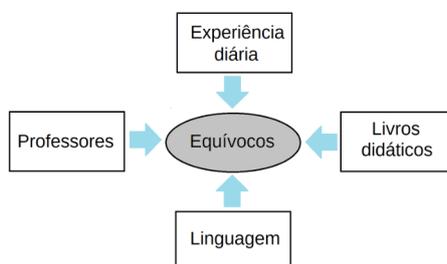


Figura 1 - Fontes de equívocos, em nível geral, na apreensão de conceitos científicos por parte dos estudantes.

Nesta subseção, analisamos, em nível geral, as principais fontes de equívocos por parte dos estudantes quando aprendem ciência no contexto formal de ensino. A seguir, apresentamos quais são as principais dificuldades específicas da Ótica.

2.3.2 Dificuldades em nível específico

Pode-se conceber que sem entender conceitos fundamentais sobre a luz e suas propriedades, não é possível compreender a Ciência moderna. Por conta disso, as concepções dos estudantes sobre a luz, e as dificuldades em aprender conteúdos relacionados a ela, têm sido investigadas em muitos países (DJANETTE & FOUAD, 2014). Como consequência de um trabalho de consulta à literatura, apresentamos as dificuldades e concepções equivocadas mais comuns dos estudantes no campo conceitual da Ótica. A consulta foi feita por meio da ferramenta Google Scholar, utilizando termos de busca na língua portuguesa e inglesa, como “dificuldades no ensino de ótica”, “*learning difficulties in optics*”. A apresentação dos resultados dessa consulta privilegia os seguintes critérios:

- 1) Relevância em termos dos EM – Apresentamos ao longo do texto somente as dificuldades identificadas na literatura que foram enfrentadas pelos estudantes durante a aplicação dos EM.
- 2) Relevância no campo conceitual específico – Serão apresentadas apenas as dificuldades mais comuns na Ótica e sobre a natureza da luz, conforme relatado em cada trabalho sobre esse tópico. Não temos a pretensão de listar todas as dificuldades encontradas na consulta à literatura.

Pompea *et al.* (2007) apontam que as concepções dos adultos sobre a luz não são muito diferentes das concepções das crianças e, portanto, dos estudantes. Os autores destacam que uma crença comum é a de que a luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas. Possivelmente, essa crença vem do fato de que vemos nossa imagem refletida em um espelho ou na lataria de um carro limpo, mas não em uma parede, que tem superfície rugosa. Outra crença apontada é de que os objetos pretos não refletem nenhuma luz. Os autores argumentam que, em muitos livros didáticos, a cor preta é descrita como a ausência de luz. Por isso, estudantes assumem que objetos escuros absorvem toda a luz, sem refleti-la. Também é comum a concepção de que um objeto é visível porque luz o ilumina. Essa crença possivelmente é originada de experiências do cotidiano. Por exemplo, quando abrimos a janela em um dia ensolarado, iluminando o ambiente, passamos enxergar objetos antes “invisíveis”. Logo, deste evento se deriva uma conclusão lógica, de que objetos são visíveis porque luz os ilumina. É possível, no entanto, conceber situações em que um objeto iluminado permanece invisível. Isso ocorre quando nenhuma luz é refletida por ele. Por exemplo, não é possível distinguir dois materiais adjacentes transparentes com o mesmo índice de refração porque nenhuma luz é refletida na troca de meio nessa situação. Na verdade, o critério de visibilidade dos objetos é melhor definido em termos da fisiologia do olho humano. Seguindo esse critério, um objeto é visível porque dele parte luz sensível ao olho humano. Dessa forma, é possível

entender situações mais gerais, como as seguintes: um objeto em uma sala escura (não iluminado) pode ser visível, basta que seja aquecido até que passe a emitir luz; ii) um gás submetido a uma alta-tensão pode se tornar visível pela emissão de luz, como ocorre nas lâmpadas fluorescentes, etc. Outra crença comum é a de que *lasers* emitem raios de luz perfeitamente paralelos, que possivelmente vem de representações desses equipamentos na mídia. Essa crença pode fomentar a concepção de que a energia da luz emitida pelo feixe se mantenha concentrada em um diâmetro equivalente ao da cintura do *laser*. Na verdade, o *laser* tem uma abertura angular típica da ordem de $\sim 0,1^\circ$. Admitindo que a cintura do *laser* não tem dimensões (pontual), essa abertura produz um círculo luminoso projetado, a 10 m de distância, de 1,7 cm de diâmetro. Entretanto, nas investigações usuais do laboratório didático as distâncias envolvidas são curtas, de forma que esse efeito pode ser desprezado.

Yalcin *et al.* (2009) identificaram que é comum, entre estudantes de graduação, a concepção de que luz emitida por uma fonte mais potente se propaga por uma distância maior do que luz emitida por uma fonte menos potente. Os autores argumentam que muitos estudantes entendem que a distância percorrida pela luz depende da forma como a luz foi produzida, por sua frequência ou número de fótons. Segundo essa crença, a luz produzida por uma vela se propaga por uma distância maior do que a luz produzida por uma lâmpada, por exemplo, porque a primeira é produzida por reações químicas (queima) e a segunda pela eletricidade. Na verdade, a distância percorrida pela luz depende do meio material e do comprimento de onda da luz que nele se propaga. Comumente, essa grandeza é medida pela distância de atenuação, calculada como inverso do coeficiente de atenuação da luz (esse fenômeno é estudado no EM 1 deste estudo). Os autores apontam que outra crença equivocada comum entre os estudantes é a de que diferentes fontes luminosas não podem emitir o mesmo tipo de luz. Nesse caso, o autor destaca que o “tipo de luz” se refere às propriedades da luz, como frequência, comprimento de onda, potência, etc. Segundo essa crença, o tipo de luz está relacionado diretamente com a sua fonte. Em outras palavras, a luz é uma marca característica de seu ente emissor, não podendo ser dissociada dele. Por exemplo, uma vela não poderia emitir luz semelhante a uma lâmpada incandescente; duas lâmpadas fluorescentes, uma espiral e outra de tubo, emitiriam luzes diferentes; as características da luz “natural” do Sol não são replicáveis em laboratório, etc. Outra crença comum apontada é a de que tudo que se vê é uma fonte de luz. Possivelmente, essa crença vem das situações de ensino sobre lentes e espelhos, que utilizam as representações da Ótica Geométrica, na qual são traçados raios de luz partindo dos objetos sem se mencionar que essa é a luz refletida pelo objeto, não originada dele. Ainda, há estudantes que argumentam que todos os objetos emitem luz com a sua cor, por isso é possível vê-los.

Segundo Djanette e Fouad (2014), alguns estudantes consideram que a velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio. Os autores afirmam que estudantes que possuem essa crença, também apresentam concepções equivocadas sobre outros aspectos relacionados à velocidade da luz, do tipo: “a fonte de luz é quem confere velocidade à luz” (violando o segundo postulando da relatividade especial), ou “a velocidade da luz é igual em todos os meios”. Outra crença comum apontada pelos autores é a de que a cor é uma propriedade dos objetos. Essa crença

possivelmente está associada com a linguagem, como apontado na subseção anterior. Na verdade, a cor dos objetos é a percepção humana da radiação eletromagnética que parte dos objetos, por isso essa crença é mais bem confrontada quando se argumenta em termos da fisiologia do olho humano.

Segundo Palacios, Nievas & Cervantes (1989), estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz. Os autores argumentam que essas dificuldades se traduzem em crenças equivocadas, como: considerar a refração e a dispersão como fenômenos distintos; a possibilidade de dispersar luz monocromática por um prisma. Ainda, os autores argumentam que, não é incomum a crença de que os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes (PALACIOS, NIEVAS & CERVANTES, 1989). Possivelmente ambas as crenças vêm das representações super-simplificadas enfrentadas pelos estudantes nas situações de ensino. Por exemplo, ao se ensinar a lei de Snell, frequentemente se representa a luz trocando de meio sem com que se explicita que a radiação é monocromática, de forma que o estudante não associa a dispersão com a refração. Neste mesmo exemplo, é frequente omitir o raio de luz refletido na interface. Isso contribui para a crença de que o fenômeno da refração ocorre sem a reflexão.

Também é apontado na literatura (AMBROSE et al., 1999; COLIN & VIENNOT, 2000) que os estudantes possuem dificuldades relacionadas com o modelo ondulatório da luz, e portanto, com a Ótica Física. Segundo Ambrose *et al.* (1999), é comum que os estudantes tenham dificuldade em entender as representações didáticas das ondas eletromagnéticas nos livros. Essas dificuldades se traduzem em falta de compreensão adequada sobre o modelo ondulatório da luz e suas implicações. Por exemplo, os autores apontam que é comum que os estudantes não se deem conta de que: os campos elétrico e magnético em uma onda EM sejam interdependentes; uma onda plana tenha extensão espacial infinita; e os campos eletromagnéticos da radiação exerçam força de Lorentz em cargas elétricas. Estudantes com essas concepções podem ter dificuldades em apreender o conceito de vetor de Poynting, de interferência, de interação da radiação com interfaces, entre outros.

Sobre as dificuldades relacionadas à Ótica Geométrica, a literatura também aponta uma série de dificuldades comuns, sendo que a maioria se concentra na formação da imagem de objetos por espelhos e lentes (KALTAKCI, ERYILMAZ & MCDERMOTT, 2016). São comuns crenças como: o tamanho da imagem produzida por um espelho plano depende do tamanho do espelho ou da distância entre o objeto e o espelho; uma imagem real só pode ser vista em um anteparo; e imagens virtuais existem de forma independente do observador. Ainda sobre a Ótica Geométrica, Blizak, Chafiqi e Kendil (2009) relatam que são comuns crenças como: a luz pode atravessar a interface entre dois meios transparentes sem mudar a direção de propagação; bloquear parte de uma lente altera a parte correspondente da imagem. Muitas outras dificuldades, em nível mais específico, que ocorrem com menor frequência, são relatadas. Como não há um EM dedicado exclusivamente ao tópico “espelhos e lentes”, não as citamos no Quadro 1.

Colin e Viennot (2000) argumentam que estudantes possuem dificuldades em conectar os modelos da Ótica Geométrica e Física. Isso ocorre, por exemplo, nas situações em que se analisa o padrão de difração da luz coerente que atravessa uma rede de difração em um anteparo. Para entender o padrão, é necessário representar o problema pela superposição de ondas em um dado

ponto do anteparo, comparando o caminho das ondas entre a rede de difração e o anteparo. A diferença de caminho (Ótica Geométrica) é usada para calcular a diferença de fase (Ótica Física) entre as frentes de onda que chegam no anteparo. Os autores também argumentam que a difração e a superposição de ondas são efeitos tipicamente negligenciados por estudantes em suas explicações dos fenômenos. Ainda, foi identificado que os estudantes têm tendência a atribuir uma única causa aos fenômenos óticos.

Nos parágrafos precedentes, apresentamos as principais dificuldades e concepções equivocadas dos estudantes sobre o campo conceitual da Ótica. Muitas outras existem, no entanto, no Quadro 1 apresentamos um resumo do que foi discutido, bem como dificuldades e concepções equivocadas comuns encontradas na consulta à literatura.

Quadro 1 - Resumo das dificuldades e concepções equivocadas mais comuns encontradas em uma consulta à literatura sobre esse tópico.

Dificuldades e concepções equivocadas típicas da Ótica	Referência
Estudantes têm dificuldade em conectar os modelos de Ótica Física e Geométrica.	(COLIN; VIENNOT, 2000)
Estudantes não sabem explicitar nem operacionalizar o domínio de validade das representações geométricas e físicas da Ótica.	
Mesmo em situações em que a Ótica Física seria mais adequada, estudantes dão preferência para a representação geométrica, mesmo que tal representação falhe em descrever o fenômeno.	
Estudantes não entendem bem o significado das representações esquemáticas que compõem os objetos-modelo das representações geométrica e física da Ótica.	
A imagem virtual existe independentemente da presença do observador.	(KALTAKCI; ERYILMAZ; MCDERMOTT, 2016)
O tamanho da imagem no espelho plano depende do tamanho do espelho ou da distância entre o objeto e o espelho.	
Imagem real só pode ser vista em um anteparo.	
Não se vê qualquer imagem de um objeto colocado no ponto focal de um espelho convexo/ lente divergente.	
Luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas.	(POMPEA <i>et al.</i> , 2007)
Objetos escuros não refletem luz.	
Um objeto é visível porque luz o ilumina.	
Espelhos refletem 100% da luz incidente em sua superfície.	
<i>Lasers</i> emitem raios de luz perfeitamente paralelos.	(DJANETTE; FOUAD,
A velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio.	
Cor é uma propriedade dos objetos.	

Dificuldades e concepções equivocadas típicas da Ótica	Referência
Objetos podem refletir a sombra.	2014)
A velocidade de propagação da luz depende da velocidade da fonte emissora.	
Tudo que se vê é uma fonte de luz.	(YALCIN et al., 2009)
Luz emitida por uma fonte mais potente se propaga por uma distância maior do que luz emitida por uma fonte menos potente.	
Diferentes fontes luminosas não podem emitir o mesmo tipo de luz.	(BLIZAK; CHAFIQI; KENDIL, 2009)
Cada ponto de um objeto luminoso emite luz em uma única direção.	
A luz atravessa a interface entre dois materiais transparentes sem mudar a direção de propagação.	
Bloquear parte da superfície de uma lente bloquearia a parte correspondente da imagem.	(AMBROSE et al., 1999)
Estudantes têm dificuldades em lidar com o modelo ondulatório da luz, e portanto com Ótica Física.	
Estudantes têm dificuldade em entender as representações didáticas das ondas eletromagnéticas nos livros didáticos.	
Estudantes não se dão conta de que os campos elétrico e magnético em uma onda EM são interdependentes.	
Estudantes não se dão conta de que os campos eletromagnéticos da radiação podem exercer força de Lorentz em cargas elétricas.	
Estudantes entendem uma onda plana como tendo uma extensão espacial finita.	(QING; BETHANY; STEVEN, 2018)
Estudantes têm dificuldades em utilizar condições de contorno da teoria eletromagnética nos contextos em que ela se aplica.	
Estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz.	(PALACIOS; NIEVAS; CERVANTES, 1989)
Os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes.	
Lentes podem aumentar a energia da luz que passa através dela.	
Os olhos emitem raios de luz para enxergar objetos.	

Neste capítulo, apresentamos um resumo de estudos anteriores sobre o conceito de modelo, atividades experimentais e dificuldades em Ótica. No capítulo seguinte apresentamos o referencial teórico deste estudo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para analisarmos os resultados pertinentes à primeira questão de pesquisa desta dissertação, precisamos compreender os processos envolvidos na ampliação, por parte dos estudantes, do domínio de campos conceituais. Por isso, expomos a Teoria dos Campos Conceituais na Seção 3.1. Já para a segunda questão de pesquisa, precisamos elucidar os conhecimentos compreendidos no campo conceitual da modelagem didático-científica. Para isso, começamos expondo a MDC, um referencial que resulta de uma costura teórica entre a teoria dos campos conceituais de Vergnaud e as concepções de modelagem científica de Bunge, para, em seguida, explicarmos a MDC+, que incorpora conhecimentos do campo conceitual da modelagem didático-científica próprios do fazer experimental.

3.1 A TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE VERGNAUD

A teoria de Vergnaud descreve o processo de apreensão da realidade pelos sujeitos por meio do que é denominado pelo autor de conceitualização (VERGNAUD, 1993). De natureza construtivista, essa se apoia nas ideias de Jean Piaget e Vygotsky.

Segundo Vergnaud, é a partir do enfrentamento de situações que demandam a mobilização de conhecimentos que o sujeito conceitualiza a realidade. No contexto do ensino, as situações, mais do que eventos didáticos, são tarefas cuja execução demanda algum processo cognitivo do sujeito. Tais processos ocorrem em seus esquemas de pensamento, que podem ser entendidos como organizações invariantes de ações frente a uma dada classe de situações (VERGNAUD, 1998). Se o sujeito já possui em seu repertório os esquemas de pensamento para lidar com a situação, sua ação tende a ser bastante automatizada. Por outro lado, se nenhum dos esquemas que o sujeito possui é adequado para enfrentar a situação enfrentada, possivelmente, após alguma reflexão, ou o sujeito adapta os esquemas que já possui à situação enfrentada, cria novos esquemas, ou falha na tentativa de lidar com a situação. Daí a importância das situações na teoria de Vergnaud: as situações enfrentadas pelo sujeito são essenciais para o processo de conceitualização do real, porque através delas o sujeito constrói os esquemas de pensamento para lidar com elas, avançando no seu desenvolvimento cognitivo.

Segundo Vergnaud, nos esquemas de pensamento do sujeito existem conhecimentos denominados de invariantes operatórios, também chamados de “conhecimentos-em-ação”. Esses conhecimentos podem ser do tipo *teorema-em-ação* e *conceito-em-ação*. Segundo Vergnaud (1996, p. 202), “*um teorema-em-ação é uma proposição considerada como verdadeira sobre o real. Um*

conceito-em-ação é uma categoria de pensamento considerada como pertinente". Assim, quando o sujeito enfrenta uma situação, mobiliza conceitos-em-ação (objetos, predicados ou categorias relevantes na situação) e teoremas-em-ação (proposições que relacionam conceitos, objetos, predicados, etc. que podem ser úteis para lidar com a situação). Os conhecimentos-em-ação são a base implícita da conceitualização..

É importante destacar que os invariantes operatórios não são conceitos e teoremas científicos em si. Na Ciência, conceitos e teoremas devem ser explícitos, possibilitando o debate sobre eles, bem como sua difusão pela sociedade. Entretanto, os invariantes operatórios contidos nos esquemas são, em sua maioria, implícitos. Então como sabemos se o sujeito aprendeu um conceito? A definição pragmática de conceito, na teoria de Vergnaud, diz respeito ao tripleto (**S, I, R**) formado:

- a) Pelas situações **S** às quais o conceito se refere. O conjunto de situações é denominado "referente" do conceito.
- b) Pelos invariantes operatórios **I** mobilizados pelo sujeito para lidar com a situação **S**. O conjunto de invariantes operatórios é denominado "significado" do conceito.
- c) Pelas representações simbólicas **R** pelas quais o conceito é representado. O conjunto das representações simbólicas é denominado de "significante" do conceito.

Conceitos podem ser mobilizados em diversas situações, utilizando-se de diferentes invariantes operatórios e representações simbólicas. Por isso, na teoria de Vergnaud, são as situações que dão sentido aos conceitos. Porém, cabe destacar que o sentido que o sujeito atribui aos conceitos não é definido unicamente por meio das situações por ele dominadas. O sentido dos conceitos está na interação do sujeito com as situações e com as representações simbólicas usadas no enfrentamento dessas situações. Bem dizer, os sentidos estão nos esquemas.

Podemos agora compreender o conceito de campo conceitual. Segundo Vergnaud, um campo conceitual é um conjunto informal e heterogêneo de situações, conceitos, teoremas, invariantes operatórios, relações, operações de pensamento, representações simbólicas, significados e esquemas (VERGNAUD, 1993). O domínio de um determinado campo conceitual é um processo progressivo e lento, que envolve avanços e retrocessos. Assim, para que um estudante avance no domínio de um dado campo conceitual, é essencial que ele seja defrontado diversas vezes com um conjunto de situações que tem potencial de dar sentido aos conceitos desse campo.

Podemos entender que um indicador de que o estudante progrediu no processo de conceitualização da realidade são manifestações - tanto implícitas quanto explícitas - da forma predicativa ou operatória do conhecimento. A forma predicativa (conhecimento teórico) do conhecimento diz respeito à capacidade do sujeito de explicitar objetos e suas propriedades. Já a forma operatória (conhecimento metodológico) diz respeito à capacidade do sujeito de empregar o conhecimento nas situações em que eles são demandados. Uma parcela desses conhecimentos é *implícita*, e torná-los *explícitos* é um processo importante na aprendizagem na medida em que, desse modo, tais conhecimentos passam a ser negociáveis, podendo se tornar conhecimentos científicos compartilháveis.

Neste trabalho, mesmo reconhecendo que avanços em um campo conceitual também ocorrem quando os estudantes passam a mobilizar conhecimento de forma implícita em suas ações, o escopo da investigação foi limitado à avaliação do potencial dos EM para fomentar avanços dos estudantes no campo conceitual da Ótica por meio da identificação das situações em que os estudantes manifestam conhecimentos de forma *explícita*.

Como exemplo, podemos citar o campo conceitual da Ótica - um dos campos conceituais da Física -, alvo desta pesquisa. Os estudantes desenvolvem conhecimentos relacionados a esse campo desde que têm sua primeira experiência com a luz. A medida em que se deparam com situações didáticas que demandam a mobilização de conhecimentos relacionados a conceitos desse campo (p. ex., “intensidade da luz”, “onda eletromagnética”, “vetor de Poynting”, “refração”, “difração”, etc.), os estudantes passam a utilizar um conjunto de representações típicas da Ótica, desenvolvendo esquemas de pensamento (que envolvem invariantes operatórios) adequados para o enfrentamento dessas situações.

3.2 MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA (MDC)

Na Seção 2.1, evidenciamos que a modelagem científica é um processo que demanda uma série de conhecimentos e habilidades por parte dos estudantes. No caso da Física, os modelos científicos representam a realidade por meio de sistemas semióticos e elementos conceituais (p. ex., momento angular, energia, par ação-reação, etc.). Logo, nessa área do conhecimento é essencial que os estudantes sejam capazes de manipular essas representações e tenham clareza do significado dos conceitos associados às diferentes áreas do conhecimento dessa ciência.

Por essa razão, Brandão, Araujo e Veit (2008; 2011; 2012) partem da premissa de que o processo de modelagem científica permeia toda a Física e que os elementos conceituais necessários para o seu domínio têm papel fundamental no fazer científico. Os autores desenvolvem então um referencial teórico denominado Modelagem Didático-Científica (MDC), que resulta de uma costura teórica entre a teoria dos campos conceituais de Vergnaud (1993; 1996; 1997; 1998; 2009; 2012; 2013a; 2013b) e as concepções de modelagem científica de Bunge (1974; 1980; 1989; 2010). Assim, sustentam que o processo de modelagem científica constitui um campo conceitual subjacente aos campos conceituais específicos da Física.

De acordo com a MDC, é essencial defrontar os alunos com situações pouco idealizadas, que podem dar sentido aos conceitos do campo conceitual da modelagem didático-científica. Para elucidar como ocorre a mobilização do conhecimento por parte dos estudantes ao se defrontarem com problemas ou situações pouco ou não idealizados, a MDC engloba uma Estrutura Conceitual de

inconsistências ou se desejando melhor precisão, pode-se proceder à **expansão** do modelo através da adição de novas variáveis, parâmetros ou referentes no seu corpo hipotético-dedutivo. A confrontação entre o modelo teórico e as respostas obtidas por meio de operações empíricas com o sistema físico permitem que o modelo-teórico seja corroborado. É importante salientar que, conforme as concepções de modelagem de Bunge, uma teoria geral não se pronuncia diretamente sobre sistemas ou eventos físicos específicos, cabendo esse papel aos modelos teóricos. É por isso que os modelos teóricos são os mediadores entre teorias e realidade. Por fim, a **generalização** dos modelos teóricos decorre do uso da sua estrutura geral para se representar um novo sistema físico.

Os conceitos da ECR, com os esquemas de pensamento que permitem uma ação organizada do sujeito no enfrentamento de situações de modelagem, compõem o campo conceitual da MDC. A partir desse referencial, pode-se inferir que, para que o sujeito domine o processo de modelagem científica, é fundamental que domine situações e problemas que requerem o uso de conhecimentos relacionados aos conceitos de modelo e modelagem científica - os conceitos não podem existir de forma isolada, pois, conforme a teoria de Vergnaud, só têm sentido quando estão vinculados às situações em que se aplicam.

Admite-se que o campo conceitual da MDC contém tanto invariantes operatórios de caráter geral, associados aos conceitos de modelo e modelagem científica em Física, quanto de caráter específico, associados aos conceitos de aproximação, referente, domínio de validade, etc.

A MDC explicita em sua construção teórica uma série de invariantes operatórios de referência presentes nos esquemas de pensamento mobilizados pelos estudantes ao se defrontarem com essas situações (p. ex., relacionado com o conceito de “grau de precisão”, está associado o invariante operatório “*Dada uma idealização, avaliar qualitativa e quantitativamente o erro por ela introduzido no modelo*”). À luz da MDC, podemos argumentar que os esquemas de pensamento mobilizados pelos estudantes ao longo de sua formação dependem fortemente das situações prévias já enfrentadas, isto é, das suas experiências. Se as experiências de sala de aula forem marcadas pelo enunciado de problemas fortemente idealizados, pautados no formalismo matemático e de contexto desvinculado da realidade do estudante, os esquemas de pensamento requeridos para o enfrentamento das situações tendem a permanecer restritos ao contexto acadêmico e escolar, constituindo assim uma falha na sua formação acadêmica.

Desta forma, a modelagem científica na Física pode ser vista sob a lente da Teoria dos Campos Conceituais na medida em que cada conceito está definido por meio: a) das situações **S** que dão sentido aos conceitos relacionados com modelos e modelagem científica; b) do conjunto de invariantes operatórios **I** utilizados pelo sujeito para tratar das situações **S** de modelagem enfrentadas pelo sujeito; c) das representações **R** simbólicas usadas pelo sujeito para tornar explícitos o conjunto de invariantes **I**, bem como representar e operacionalizar as situações **S**. Assim, atividades didáticas pautadas na MDC são usadas para apoiar as ações do sujeito em situações de modelagem, favorecendo a aproximação entre a forma predicativa e operatória do conhecimento.

A MDC trata o processo de modelagem científica no âmbito geral, não entrando em detalhes sobre as particularidades relacionadas ao trabalho experimental no seu corpo teórico. Por exemplo,

conceitos como de evidência, predição e experimento, fundamentais na contrastação empírica entre modelos científicos e a realidade, não são descritos explicitamente na ECR da MDC. Nesta dissertação de mestrado, trataremos exatamente de situações que requerem esses conceitos, isto é, situações de laboratório envolvendo atividades práticas de modelagem científica. Por isso, utilizamos a versão expandida da MDC, denominada MDC+, que abarca o fazer experimental no seu corpo teórico, e que será exposta na próxima subseção.

3.3 MDC+

A MDC+, de Heidemann (2015) e Heidemann, Araujo e Veit (2016), constitui-se em um aporte teórico-metodológico à MDC. Desse modo, a MDC+ também se ampara no entendimento de que o processo de modelagem científica constitui um campo conceitual subjacente aos campos conceituais da Física. Toma-se o laboratório didático como espaço propício para a aprendizagem dos processos relacionados com a modelagem científica, pois, nas situações experimentais típicas, os estudantes precisam manifestar o conhecimento na forma operatória. Essa não é uma tarefa fácil, pois, como alerta Vergnaud (1996, p.13), “*um dos problemas do ensino é desenvolver ao mesmo tempo a forma operatória do conhecimento, isto é, o saber fazer, e a forma predicativa do conhecimento, isto é, o saber explicitar os objetos e suas propriedades*”. No laboratório os estudantes precisam também resolver problemas sobre a realidade, idealizando objetos e/ou eventos para torná-los tratáveis à luz de conhecimentos científicos, construindo ou adotando modelos que podem ser úteis para resolver a situação em questão. Um aspecto central nesse processo é a validação dos modelos utilizados: é por meio da contrastação empírica entre as evidências coletadas na investigação experimental e as predições construídas com modelos teóricos que a sua validade é aferida.

A MDC+ também se apoia nas ideias de Bunge (1989; 1998; 2010), especialmente aquelas vinculadas com aspectos relacionados ao trabalho experimental. Segundo esse autor, as atividades empíricas são sempre precedidas por um trabalho teórico, no qual se estabelecem as bases para o processo de contrastação das ideias científicas. Nesse sentido, um experimento é delineado tendo em vista os pressupostos teóricos assumidos na construção dos modelos usados para dar suporte à investigação. Por meio da contrastação empírica entre as predições do modelo teórico utilizado e as evidências experimentais, é possível avaliar se o modelo é satisfatório ou não para descrever a situação considerada, bem como determinar seu grau de precisão ou domínio de validade.

Segundo Bunge, existem três operações empíricas relacionadas às investigações experimentais: *observações*, *medições* e *experimentos*. A observação direta, aquela sensível aos sentidos, é a operação empírica mais básica. No laboratório, a observação é sempre intencional e precedida por algum conhecimento prévio sobre o sistema observado. No entanto, a maioria dos

eventos estudados pelos cientistas não são observáveis. Por exemplo, ao estudar o comportamento de um circuito elétrico, não observamos a corrente passar pelos fios. Porém, inferimos que existe corrente passando em um circuito porque o amperímetro acusa tal evento. Amparando o funcionamento do amperímetro, existem teorias auxiliares que relacionam, por exemplo, supondo um amperímetro analógico, a corrente que passa pelo circuito com grandezas físicas como o campo magnético produzido por essa corrente e o torque no eixo em que o ponteiro do amperímetro está fixado. A posição angular do ponteiro em uma escala numérica quantifica a observação indireta de que naquele circuito existe corrente elétrica. Assim, percebemos que o processo de medição é uma operação empírica que se utiliza de teorias e modelos auxiliares para quantificar observações. Outro exemplo é a situação em que se usa um termômetro de mercúrio para medir a temperatura. Nesse caso, estamos tomando como modelo teórico auxiliar a dilatação linear do mercúrio líquido na faixa de temperatura de realização da medição. Em geral, tais modelos teóricos auxiliares usados no processo de medição não são postos à prova pelo processo de contrastação empírica. Por fim, os experimentos científicos, na definição de Bunge, formam parte de uma classe de eventos construídos de forma deliberada, nos quais se provoca alguma mudança em um dado sistema com alguma finalidade específica. Nessa definição, quando os cientistas apontam instrumentos para um buraco negro, com o objetivo de estudá-lo, não estão fazendo experimentos, e sim observações e medições. Isso porque não foi provocada qualquer mudança deliberada no objeto de estudo. Como na definição de Bunge os experimentos envolvem mudanças deliberadas no sistema estudado, um aspecto fundamental dessa operação empírica é o controle de parâmetros e variáveis. Com isso, o experimentador busca não apenas medir variáveis relevantes, como também minimizar efeitos não levados em consideração no modelo teórico de referência da investigação.

Fica claro, portanto, que as situações experimentais, por serem delineadas a partir de um corpo prévio de ideias (e não em um vazio teórico), são conduzidas em um meio artificialmente controlado, visando reproduzir condições para as quais o modelo teórico foi construído. Levando em consideração essas ideias, os autores da MDC+ identificaram os principais conceitos típicos do fazer experimental, associando-os com os conceitos MDC por meio da ECR mostrada na Figura 3 (HEIDEMANN, ARAUJO & VEIT, 2016).

A análise da ECR da Figura 3 pode começar pelo conceito de **modelo teórico de referência**: conforme destacado na figura, todo o processo de **delineamento investigativo** - isto é, o planejamento experimental - é calcado em um modelo teórico de referência. Esse processo abrange uma série de **operações empíricas (observações, medições e experimentos)** que requerem do estudante um rigoroso **controle de variáveis**, de forma que as **idealizações/ aproximações** feitas previamente sejam satisfatórias para a investigação do evento. É na etapa das operações empíricas que os **dados empíricos** são coletados. Esses dados, depois de sofrerem as devidas transformações (p. ex., analisados estatisticamente), constituem as **evidências** construídas. Além disso, esses dados, aplicados no modelo teórico de referência, produzem **dados contrastáveis**, isto é, informações que, depois de devidamente tratadas, geram **predições** do modelo teórico de referência. O processo de

contratação empírica se dá quando as predições e as evidências são confrontadas. A ECR destaca também o papel dos **modelos teóricos auxiliares** na execução das operações empíricas.

Desta forma, a fim de construir um referencial didático-metodológico capaz de apoiar o trabalho dos estudantes nas situações experimentais, na MDC+ foram derivados 12 invariantes operatórios de referência vinculados ao trabalho experimental. Por exemplo, vinculado ao conceito de “Delineamento Experimental”, foi associado o invariante operatório “*Delinear um arranjo experimental baseado no modelo teórico de referência para utilizar na investigação empírica*”; já o conceito de “Evidência” está associado ao invariante operatório “*Estabelecer relações entre dados empíricos e o comportamento dos referentes do modelo teórico de referência da investigação*”.

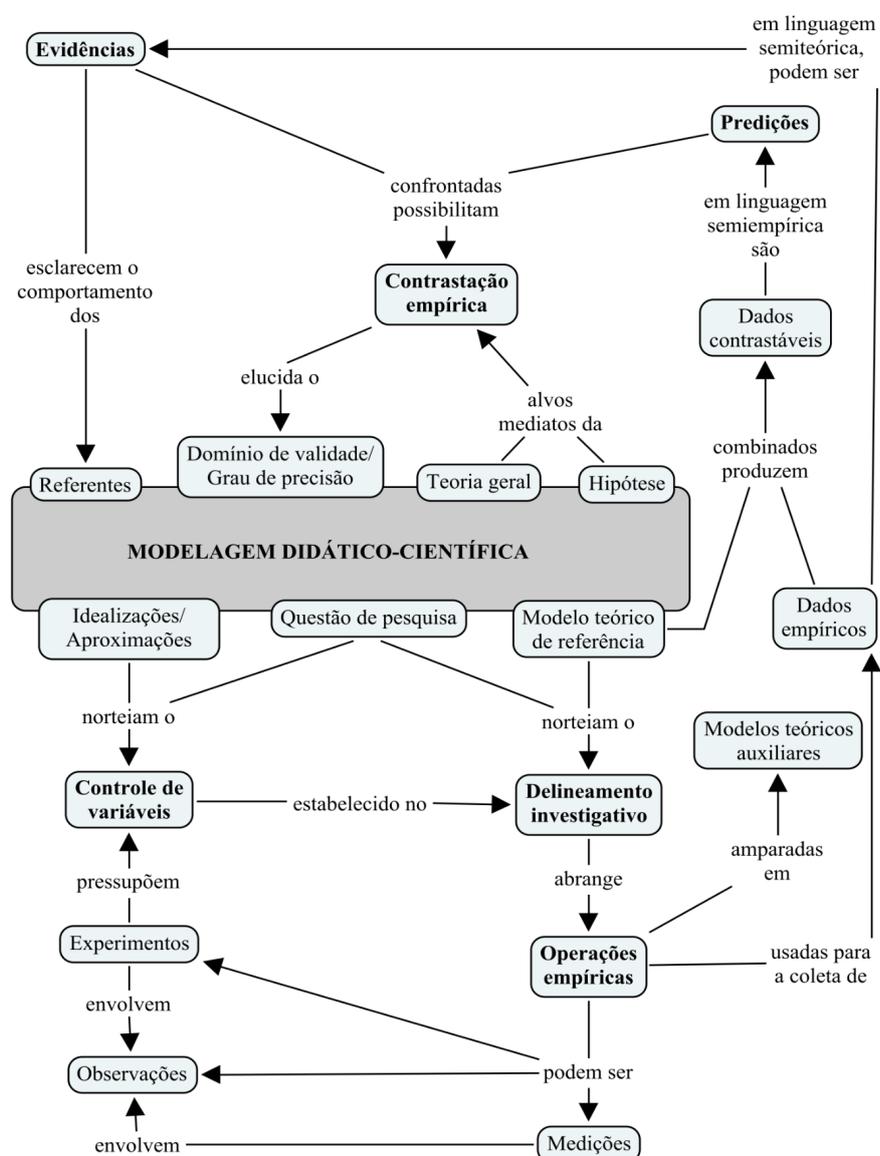


Figura 3 - Estrutura conceitual de referência da MDC+. O conceito “Modelagem Didático-Científica” subsume a estrutura conceitual exposta na Figura 2. Portanto, os conceitos que tangenciam esse conceito pertencem à estrutura conceitual de referência da MDC. Fonte: HEIDEMANN, ARAUJO & VEIT, 2016, p. 22.

A MDC+ dá enfoque ao processo de contrastação empírica das ideias científicas nas situações didáticas de laboratório enfrentadas por estudantes, por isso, defende que as atividades experimentais que se amparam na modelagem científica devem necessariamente começar com problemas autênticos, que tenham significado concreto para o estudante, fomentando situações que tenham potencial para dar sentido aos conceitos do campo conceitual da modelagem.

Optamos por utilizar como referencial teórico a MDC+ porque ela já se mostrou um referencial teórico frutífero para se entender como se dá o processo de conceitualização do real à luz da teoria dos campos conceituais de Vergnaud nas situações experimentais típicas enfrentadas pelos estudantes no contexto de sala de aula em uma disciplina de Física Experimental sobre oscilações mecânicas, fluídos e termodinâmica de um curso de Física de nível superior (HEIDEMANN, 2015). Neste trabalho, buscaremos responder às nossas questões de pesquisa por meio da criação de situações experimentais relacionadas ao campo conceitual da Ótica, promovendo o enfrentamento de problemas que não são previamente idealizados, com o enfoque na resolução de problemas abertos mais próximos da realidade do estudante. A seguir, elucidamos a metodologia de pesquisa.

4 METODOLOGIAS DE ENSINO E DE PESQUISA

Essa pesquisa foi conduzida no contexto de aulas de laboratório de Física, em uma disciplina de Física Experimental IV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Conduzindo um estudo de natureza qualitativa, adotamos referenciais metodológicos de ensino e pesquisa alinhados com a MDC+ e com os objetivos das nossas questões de pesquisa. Na próxima seção, elucidamos a metodologia de ensino utilizada. Em seguida, apresentamos a metodologia de pesquisa empregada no estudo.

4.1 METODOLOGIA DE ENSINO

Uma vez que a disciplina de Física Experimental IV é de natureza prática, buscamos conciliar o trabalho experimental com a MDC+ por meio da utilização de uma metodologia de ensino voltada para a experimentação denominada Episódios de Modelagem (EM) (HEIDEMANN, ARAUJO & VEIT, 2016). Os EM se constituem em uma metodologia alinhada com a perspectiva de que o laboratório didático oferece um contexto propício para discussões epistemológicas relacionadas com o processo de modelagem científica. Pautada na MDC+, almeja-se defrontar os estudantes com situações didáticas experimentais que requeiram a construção, uso e validação de modelos didático-científicos. Os EM podem ainda ser entendidos como atividades práticas, de caráter aberto, motivadas por uma situação-problema autêntica, geralmente com significado além do contexto acadêmico. O grau de abertura dos EM é delimitado por meio dos Guias da Atividade, como será explicado posteriormente. Da problemática trazida, derivam-se questões de pesquisa que os estudantes devem buscar, em grupos, responder ao final da atividade com base nos resultados de suas investigações empíricas. Em todos os EM o estudante precisa adotar um modelo teórico de referência que dirigirá o delineamento, execução e análise de um experimento, com o objetivo de responder alguma questão de pesquisa previamente feita.

Destacamos que, em acordo com a MDC+, a situação-problema inicial de um EM se refere sempre a um evento do mundo real, apresentada de forma geral, sem qualquer idealização. A atividade demanda uma postura ativa do estudante, dando-lhe, inclusive, oportunidade de propor e investigar suas próprias questões de pesquisa. A partir das questões gerais de pesquisa formuladas na situação-problema do EM, derivam-se questões mais específicas, de acordo com o interesse dos estudantes que vão realizar a investigação. Por exemplo, a questão geral de um dos EM aplicados nesta pesquisa é a seguinte: *“Como a poluição pode influenciar a fotossíntese das algas por meio de alterações na atenuação da luz solar?”*. A partir dessa questão, as seguintes questões específicas de

pesquisa poderiam ser derivadas: “*Como a luz é atenuada pela fumaça?*”; “*Como a água poluída com microplásticos transparentes atenua a luz solar?*”; “*Como a luz de um laser de He-Ne é atenuada ao atravessar diferentes meios materiais, como o acrílico?*”. Observe que as questões específicas (atenuação da luz em diferentes meios materiais) podem divergir da questão geral (atenuação da luz nos oceanos e seus efeitos na fotossíntese), porém dizem respeito ao mesmo fenômeno, isto é, a atenuação da luz, e a resposta a ela fornecerá subsídios para a construção de uma solução para a questão geral da investigação. Com isso, um conteúdo específico pode ser ensinado de acordo com os interesses dos estudantes. Esse tipo de abordagem é diferente das atividades usuais desenvolvidas nos laboratórios didáticos. Para evidenciar a diferença, confeccionamos o Quadro 2, que compara uma questão específica de um EM com as tarefas a serem resolvidas em uma atividade experimental usual.

Quadro 2 - Comparação entre uma questão de pesquisa específica de um EM orientado pela questão geral “*Como a poluição pode influenciar a fotossíntese das algas por meio de alterações na atenuação da luz solar?*”, e as orientações de uma atividade experimental não focada no processo de modelagem científica.

Questão de pesquisa geral do EM	Questão de pesquisa específica do EM	Tarefa proposta em um roteiro fictício de atividade experimental
<i>Como a poluição pode influenciar a fotossíntese das algas por meio de alterações na atenuação da luz solar?</i>	<i>Como a luz é atenuada pela fumaça?</i>	<i>Determine o coeficiente de atenuação da luz emitida pelo aparelho detector na amostra contendo fumaça disponibilizada.</i>
	<i>Como a água poluída com microplásticos transparentes atenua a luz solar?</i>	<i>Determine o coeficiente de atenuação da luz branca na amostra disponibilizada.</i>
	<i>Como a luz de um laser de He-Ne é atenuada ao atravessar diferentes meios materiais, como o acrílico?</i>	<i>Determine o coeficiente de atenuação da luz do laser nos cilindros transparentes disponibilizados.</i>

No Quadro 2, as questões feitas aos estudantes em atividades experimentais usuais, bem como as situações em que se aplicam, são concebidas para que as idealizações assumidas na construção dos modelos teóricos a serem utilizados sejam satisfeitas (p. ex., quando se assume meio homogêneo, se despreza a perda de energia na troca de meio). Outro aspecto importante é que as questões das atividades experimentais usuais são enunciadas de forma fechada, isto é, o caminho para a solução do problema é previamente estabelecido. Por exemplo, na primeira questão de pesquisa do Quadro 2, o estudante deve utilizar a amostra disponibilizada para calcular o coeficiente de atenuação da luz branca. Assim, todos os estudantes fazem um mesmo experimento e chegam a resultados muito semelhantes.

Em contraste, as questões do EM não fornecem informações detalhadas da investigação, cabendo ao estudante tomar decisões sobre os fatores relevantes, bem como planejar o delineamento experimental. A comparação entre os dois tipos de questão no Quadro 2 mostra que as

questões de pesquisa de um EM são tipicamente feitas em um nível mais alto de generalização em comparação com as questões feitas nas atividades experimentais usuais, que se aplicam aos eventos preconcebidos do laboratório, apenas. Entendemos que isso é essencial, pois dessa forma o estudante é levado a refletir sobre os modelos a serem utilizados, bem como as idealizações subjacentes ao seu processo de construção. Porém, a literatura aponta que, para que os estudantes desenvolvam concepções adequadas sobre modelos e modelagem, não basta apenas envolvê-los em atividades dessa natureza. Para isso, é essencial que o professor faça discussões explícitas sobre o processo de modelagem e que essas discussões permeiem toda a disciplina (LEDERMAN, BARTOS & LEDERMAN, 2014; HEIDEMANN, 2015).

Ao final de um EM, o estudante terá sido envolvido em uma série de aspectos importantes do processo de modelagem científica, favorecendo a construção de concepções epistemológicas mais adequadas, especificamente, o entendimento de que os modelos científicos são representações simplificadas da realidade, e de que modelar é uma atividade essencialmente humana, que depende de escolhas e ações do investigador.

Em geral, o enfrentamento de um EM requer a mobilização de diversos conceitos de referência do campo conceitual da MDC+, porém cada EM pode ser delineado para enfatizar alguns desses conceitos, como veremos. Essa versatilidade é particularmente útil no contexto desta pesquisa, já que, dessa forma, podemos mapear de forma mais precisa os avanços e retrocessos dos estudantes no campo conceitual da MDC+.

Para a realização dessa pesquisa, foram desenvolvidos quatro EM, cada um dando enfoque a um conceito do Campo Conceitual da MDC+. O primeiro EM (EM 1) dá enfoque ao conceito de “expansão” na investigação dos efeitos da atenuação da luz pela matéria. Já o segundo (EM 2) enfatiza o conceito de “modelo teórico de referência” e está centrado em estudos sobre a variação do índice de refração dos materiais como função de parâmetros físicos. O terceiro EM (EM 3) destaca o conceito de “controle de variáveis” em um estudo sobre os processos de polarização da luz. Por fim, o quarto EM (EM 4) foi delineado para dar sentido ao conceito de “medição”, e envolve a construção e uso de um espectrômetro. Até o presente momento, um artigo sobre o primeiro EM foi publicado (WEBER; HEIDEMANN; VEIT, 2020) e outro sobre o terceiro EM foi submetido para publicação (WEBER; HEIDEMANN; VEIT, 2021, submetido).

As aulas práticas conduzidas por meio dos EM são divididas em quatro etapas, sendo que três delas ocorrem de forma presencial, no laboratório didático, e uma delas se constitui em uma preparação, em horário extraclasse. Essas etapas serão ilustradas na apresentação do primeiro EM, quando é destacado também o enfoque no processo de modelagem científica dado em cada uma delas. Mais detalhes podem ser consultados em Heidemann, Araujo e Veit (2016).

Nas atividades realizadas neste estudo, as investigações demandaram, no mínimo, três encontros de 1h40min cada. A exceção foi o terceiro EM, que demandou uma aula a mais em função da dificuldade que alguns grupos tiveram em delinear e montar os experimentos. Os materiais do laboratório disponibilizados em todos os EM são aqueles típicos do laboratório de Ótica: *lasers*, lâmpadas incandescentes e fluorescentes, canhão de luz branca, luxímetros, fontes de tensão, discos

aferidos, polarizadores, redes de difração, colimadores, trilhos, cavaleiros, muflas, gerais e suportes. Dependendo da demanda específica de cada EM, materiais extras são disponibilizados, como varetas de vidro e canos de PVC usados no primeiro EM.

Com relação à dinâmica de trabalho, estipulamos um número máximo de quatro estudantes por grupo. Os estudantes se organizavam de forma livre, podendo trocar de grupo entre as diferentes investigações. Os papéis dos estudantes em cada grupo eram definidos por eles. Tipicamente um estudante se envolvia em várias etapas do processo investigativo, de forma que não havia uma demarcação clara sobre as responsabilidades de cada integrante do grupo. Para fins de avaliação, foram considerados seis relatórios: quatro sobre as investigações envolvendo os EM e dois sobre as investigações tradicionais da disciplina, guiadas pelos roteiros usuais. A nota final dos estudantes foi calculada pela média aritmética entre as notas dos seis relatórios. Os laboratórios de ensino do Instituto de Física da UFRGS possuem funcionários (laboratoristas) que auxiliam a professora na organização dos materiais das aulas e, eventualmente, os estudantes em questões técnicas durante as aulas. Além disso, quando necessário, tanto o pesquisador quanto a professora que ministrou a disciplina ajudavam os estudantes nessas situações, dando suporte aos alunos. O papel da professora na disciplina foi o usual: ministrar as aulas e avaliar as atividades realizadas, atribuindo o conceito final dos estudantes na disciplina, de modo que os alunos não receavam ser penalizados ao expor as suas dificuldades para o pesquisador. A professora não participou dos procedimentos de coleta de dados para a pesquisa, sendo essa uma responsabilidade do pesquisador, que, sempre que possível, se abstinha de interferir na dinâmica de trabalho dos estudantes, buscando se concentrar no registro de informações relevantes para a pesquisa.

A seguir, apresentamos os quatro EM construídos para a realização da pesquisa, na ordem em que foram desenvolvidos na disciplina, chamando atenção para a ênfase dada do ponto de vista da modelagem. O primeiro EM será apresentado em maior detalhe, com o objetivo de exemplificar a metodologia de ensino e evidenciar como o conceito enfatizado (expansão de um modelo) é privilegiado na atividade. Os outros EM são apresentados de forma mais breve.

4.1.1 Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”

A seguinte situação-problema serviu de mote para investigações do primeiro EM:

Sabemos que a radiação eletromagnética não precisa de nenhum meio para se propagar. No entanto, ao atravessar um meio material transparente como o vidro, o ar ou a água, parte da energia é absorvida pelo meio e não é transmitida integralmente. É de fundamental importância, por exemplo, que a energia luminosa proveniente do Sol atravesse a atmosfera e chegue a uma determinada profundidade na água para que as algas presentes na zona fótica dos oceanos consigam realizar a

fotossíntese. (Esses organismos marinhos produzem mais oxigênio que as árvores!) Como se dá a atenuação da energia luminosa ao atravessar os meios materiais? Como a poluição dos oceanos pode influenciar a fotossíntese das algas por meio de alterações na atenuação da luz solar?

Como pode ser constatado, a situação motivadora do EM envolve questões que têm implicações além do contexto acadêmico. É uma situação-problema do mundo contemporâneo, enunciada sem qualquer idealização e com poucas informações iniciais. Tipicamente, os estudantes costumam ter contato com o fenômeno da atenuação da luz decorrente da propagação radial no vácuo e raramente estudam aspectos relacionados à atenuação nos meios materiais em disciplinas de Física Geral Experimental. Para que o estudante tenha condições de realizar investigações sobre a atenuação da luz, é necessário que compreenda os fenômenos de interação da luz com átomos e moléculas, levando em consideração por exemplo, processos de absorção e espalhamento. Ainda, a geometria da fonte de luz tem influência nesse processo, influenciando a taxa de decaimento da energia luminosa. Faz-se necessário, portanto, expandir o modelo teórico de propagação da luz no vácuo. Nesse EM, isso é feito por meio da lei de Beer-Lambert (KOSTINSKI, 2001). Espera-se que os estudantes utilizem esse modelo para descrever a atenuação da energia luminosa ao se propagar por diferentes meios.

Tarefa Prévia: para que os estudantes estivessem minimamente familiarizados com os conhecimentos necessários para compreender e enfrentar o problema enunciado, a professora solicitou aos estudantes a realização, antes da primeira aula presencial, de uma “Tarefa Prévia”, que se constitui na primeira etapa de um EM. Nesta atividade, a Tarefa Prévia foi a leitura de dois textos curtos. Um deles foi a seção de um livro didático sobre Vetor do Poynting - Seção 33-5 do livro Fundamento de Física (HALLIDAY & RESNICK, 2009) -, e outro, um material suplementar sobre a lei de Beer-Lambert, produzido pelo pesquisador (veja no Apêndice A). Para o enfrentamento desse EM, a leitura do material suplementar foi essencial porque nele é dada ênfase ao processo de modelagem subjacente aos modelos teóricos utilizados – algo que não costuma ocorrer nos livros didáticos tradicionais. Assim, tendo executada a tarefa de leitura previamente, os estudantes têm subsídios teóricos para enfrentar a situação-problema formulada no contexto de laboratório. Também foi solicitado aos estudantes que, após a realização da tarefa de leitura, respondessem a um questionário com quatro questões³ (veja no Apêndice B) enviando suas respostas para a professora até um dia antes da primeira aula presencial do EM por meio da plataforma de Ensino a Distância (Moodle) utilizada no curso. Uma das questões desse questionário era, por exemplo, “*Quais mecanismos são responsáveis pela atenuação da luz?*”. Além disso, em todas as tarefas iniciais dos EM, a última questão era reservada para dúvidas sobre o material estudado, sendo enunciada da seguinte forma: “*Como foi a sua compreensão da Seção 33-5? Tem algum ponto que você não entendeu ou não ficou muito claro?*”.

³ Foi utilizado um questionário eletrônico, onde os estudantes podiam responder de forma *online*.

A intensidade luminosa pode ser medida pela sua irradiância I , em W/m^2 , ou pela sua iluminância E_V , em lux (1 lux = 1 lúmen por m^2). A medida em lux leva em consideração a sensibilidade do olho humano aos diferentes comprimentos de onda da luz. Um instrumento típico de laboratório⁴ capaz de medir iluminância é o luxímetro. Esse aparelho foi usado nesse e no terceiro EM (sobre polarização da luz). Na situação idealizada em que existe vácuo, a luz pode se propagar sem perder energia para o meio. Se a fonte luminosa for colimada, espera-se que sua iluminância se mantenha constante mesmo se afastando da fonte. Se a fonte for pontual e isotrópica, espera-se que a iluminância diminua com a distância, mas não por um efeito da interação com a matéria, e sim pelo fato de que a luz se espalha por uma área cada vez maior (a área de uma esfera). Se essas fontes estiverem imersas em um meio material atenuante, os modelos para o vácuo não descrevem adequadamente o valor da iluminância como uma função da distância à fonte luminosa. É preciso expandir tais modelos, o que é feito, nesse caso, com o uso da lei de Beer-Lambert.

O modelo de Beer-Lambert é derivado de algumas hipóteses sobre a propagação da luz pela matéria. Considera-se como hipótese fundamental que a luz, ao incidir normalmente na superfície de um material, atravessando-o, perde energia com uma taxa proporcional à sua intensidade inicial. Além disso, são assumidas algumas idealizações com relação a essa situação, como: a reemissão da luz, decorrente da absorção, não contribui para o feixe original; a luz espalhada não volta a contribuir com o feixe original; o meio material, suposto homogêneo, não é alterado pela incidência da luz. Assumindo tais idealizações, chega-se nas versões expandidas (Lei de Beer-Lambert) do modelo de propagação da luz no vácuo, cujas previsões para as relações entre a iluminância e a distância das fontes são representadas na terceira coluna do Quadro 3. Detalhes sobre os procedimentos envolvidos neste processo de expansão podem ser consultados em Weber, Heidemann e Veit (2020).

Quadro 3 - Comparação entre os modelos resultantes do processo de expansão, dependendo do tipo de fonte emissora de luz. Nas equações, E_V e E_{V_0} representam a iluminância da luz em um ponto do espaço e na superfície da fonte, em lux, respectivamente, Φ_0 é o fluxo luminoso, em lúmens, e μ é o coeficiente de atenuação linear do meio material.

Tipo de fonte emissora da luz	Modelo original: propagação da luz no vácuo	Modelo expandido: propagação da luz na matéria
Colimada, com raios paralelos (<i>lasers</i>)	$E_V(x) = E_{V_0}$	$E_V(x) = E_{V_0} e^{-\mu x}$
Isotrópica, com raios radiais (fonte pontual)	$E_V(r) = \frac{\Phi_0}{4\pi r^2}$	$E_V(r) = \frac{\Phi_0}{4\pi r^2} e^{-\mu r}$

4 Muitos *smartphones* possuem um sensor de luminosidade - responsável por desligar a tela durante as chamadas - que mede iluminância, podendo ser usado em investigações experimentais. Para isso é necessário baixar algum aplicativo que o utiliza com esse fim.

Conforme mencionado, cada EM demanda, em menor ou maior grau, um grande número de conceitos do Campo Conceitual da MDC+. Entretanto, a atividade pode ser explorada para ressaltar algum conceito. Esse EM foi desenvolvido para dar ênfase ao conceito “expansão” de um modelo científico. Um modelo sofre expansão quando seu domínio de validade é ampliado por meio de modificações nas idealizações assumidas ou pela inclusão de novos referentes, aumentando assim seu grau de precisão e domínio de validade. Nesta atividade, o conceito de “expansão” é focado a partir da necessidade de se expandir o modelo de propagação da luz no vácuo.

Discussão Inicial: a segunda etapa, que se constitui no primeiro encontro presencial do EM, é denominada “Discussão Inicial”. No início da aula, a professora, tendo analisado previamente as respostas dos estudantes à Tarefa Prévia, busca sanar suas principais dificuldades. Esse procedimento, de curta duração, tem por objetivo garantir que os estudantes estejam munidos de conhecimentos mínimos para compreender e enfrentar a situação-problema que lhes é exposta nesta etapa. No desenvolvimento deste EM, a duração dessa parte da Discussão Inicial foi em torno de 10min. Exposto o problema (neste EM, da alteração da taxa de produção de oxigênio pelas algas por conta da poluição), a professora apresenta algumas sugestões de experimentos a partir dos quais os estudantes devem definir questões de pesquisa específicas. Essas sugestões se encontram em um Guia de Atividade (veja no Apêndice C), distribuído para todos os estudantes no início da aula. A necessidade do Guia da Atividade vem do fato de que nem todos os estudantes se sentem seguros ou têm nível de maturidade acadêmica suficiente para tomar decisões que tenham como consequência o delineamento de um experimento. De fato, na maioria das vezes, os estudantes têm dificuldades para delinear um experimento que possibilite responder uma questão de pesquisa (HEIDEMANN, 2015). Mesmo com a tarefa de leitura prévia à aula, muitos estudantes ainda se sentem perdidos quando lhes é incumbida a responsabilidade de assumirem um papel mais ativo na construção de experimentos. Isso ocorre pela longa tradição de realização de atividades experimentais fechadas, onde é possível executar um experimento simplesmente seguindo um roteiro de forma passiva (HODSON, 1994; HOFSTEIN & LUNETTA, 2004). Por isso, a professora distribui o Guia da Atividade, que contém apenas informações essenciais para evitar que o estudante se sinta perdido, dosando assim o grau de abertura da atividade em um nível mais adequado. Também gostaríamos de destacar que não se espera que os estudantes construam seus próprios modelos para realizar os EM, mas que explorem modelos previamente, discutindo, utilizando-os como referências em suas investigações de forma crítica, refletindo sobre seus pressupostos e, conseqüentemente, sobre suas limitações. Um dos papéis do Guia da Atividade é o de resumir alguns modelos que podem ser levados em consideração na investigação proposta.

Assim, expostas as sugestões de pesquisa, a professora permite que os estudantes reflitam e se organizem em grupos (neste estudo, os grupos tinham no máximo cinco integrantes). Após a reflexão, cada grupo estabelecia uma questão de pesquisa para responder, vinculada com a situação-problema motivadora do EM. Os estudantes ficam livres para delinear um experimento que forneça subsídios para responder às questões de pesquisa formuladas com o suporte teórico dos modelos – derivados da lei de Beer-Lambert - que descrevem a atenuação da luz propostos para a investigação.

Para cada EM foi produzido um Guia de Atividade⁵. Dentre outras coisas, constam nos guias algumas sugestões de investigação, sem que as montagens experimentais associadas sejam expostas, pois é atribuição do estudante delinear o experimento. No EM sobre atenuação da luz, são oferecidas sugestões de investigação, conforme exposto no Quadro 4, que podem ser adotadas com ou sem modificação, a critério do grupo.

Quadro 4 - Sugestões de investigação para o primeiro EM.

Investigação a)	Investigação b)	Investigação c)
Os detectores de fumaça fotoelétricos são dispositivos essenciais na contenção de incêndios. O princípio de funcionamento deste equipamento é baseado na atenuação da luz provocada pela fumaça, que deixa de ser detectada por um sensor, disparando o alarme. Avalie a atenuação da energia luminosa pela fumaça.	Um <i>laser</i> é uma fonte monocromática, isto é, uma fonte de luz que emite luz em apenas um comprimento de onda. Avalie a atenuação da energia luminosa de um <i>laser</i> em um meio sólido como o vidro ou acrílico.	A zona fófica dos oceanos é de importância ecológica fundamental: nessa região encontra-se a maior parte da vida marinha e nela ocorre a fotossíntese pelas algas, responsáveis por mais de 50% da produção de oxigênio global. Avalie a atenuação da energia luminosa da luz no meio marinho.

Cada uma das três propostas investigativas foram previamente testadas pelo pesquisador antes de terem sido oferecidas aos estudantes como sugestão. O mesmo foi feito para as investigações propostas nos outros EM: o pesquisador realizava as investigações previamente à aplicação das atividades para verificar a exequibilidade da proposta em termos dos materiais disponíveis no laboratório e do grau de dificuldade de sua execução, que devia ser adequado para estudantes em nível de graduação. Dessa forma, é possível apresentar resultados realistas durante a Discussão Final. Observe, ainda, que as linhas investigativas possíveis de serem adotadas podem divergir da situação-problema original (atenuação da luz na água poluída). Todas elas, no entanto, abordam o mesmo fenômeno físico, isto é, a atenuação da luz pela matéria, o que faz com que elas fomentem a mobilização de conhecimentos que possibilitam a compreensão da atenuação da luz na água. Entendemos que essa liberdade é importante pois incentiva o estudante a seguir linhas investigativas do seu interesse, aumentando o nível de engajamento na atividade. Além disso, torna-se possível contemplar um leque maior de conhecimentos, facilitando a integração dos EM na súmula da disciplina.

Adotada uma linha investigativa, os estudantes procuram uma forma de criar uma montagem experimental com os materiais do laboratório, ficando a critério dos estudantes decidir quais deles lhes serão úteis. Caso não sejam suficientes, eles próprios podem providenciar materiais. Por exemplo, se um grupo quer investigar a atenuação da luz na água suja com fuligem (como foi o caso nesse EM em particular, em que o fenômeno da “chuva negra”⁶ foi estudado), um dos integrantes do grupo se responsabiliza por trazer fuligem na próxima aula, quando a coleta de dados será realizada.

⁵ Os Guias de Atividade de todos os EM sofreram melhorias, fruto de aplicações posteriores em outras turmas. Tais alterações, no entanto, não foram significativas para os dados coletados.

Na Figura 4 estão ilustradas três possíveis montagens experimentais utilizadas para responder às questões de pesquisa formuladas nas propostas investigativas do Guia da Atividade desse EM. Essas montagens não foram as únicas: houve um grupo que utilizou um aquário para confinar uma quantidade de água com plástico triturado dentro (simulando poluição por microplásticos); outro usou blocos de acrílico justapostos para aumentar o caminho óptico entre a luz de um *laser* e o detector.

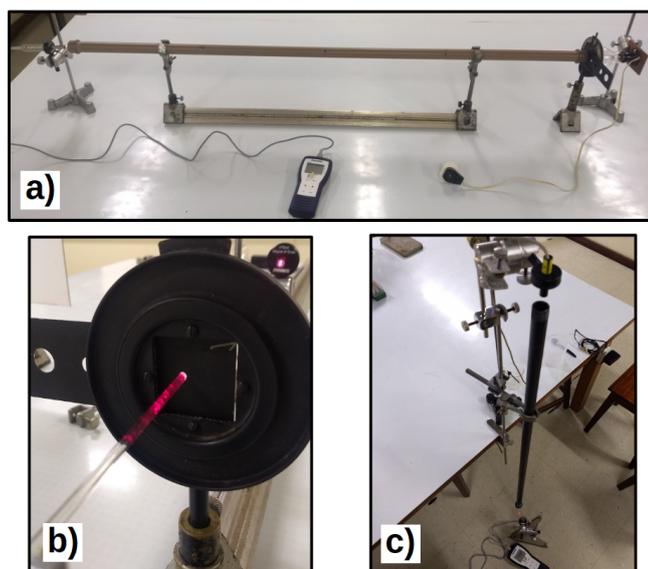


Figura 4 - Montagens experimentais utilizadas para realizar as investigações a), b) e c) referidas no Quadro 4. Em todas as montagens, mede-se a iluminância na entrada e saída de: a) um cano cheio de fumaça; b) uma vareta de vidro; e c) um cano com água e sal.

Para ilustrar o processo de modelagem na execução do experimento, considere a montagem C na Figura 4, em que se mede a atenuação da luz na água salgada (simulando água do mar). Ao utilizar um *laser* como fonte luminosa, o estudante precisa mobilizar a lei de Beer-Lambert para fontes colimadas. É preciso ter ciência, no entanto, que o *laser* não é uma fonte totalmente colimada, divergindo levemente. O meio atenuante, suposto homogêneo, deve ser cuidadosamente preparado para evitar precipitação de sal no fundo do cano, que pode bloquear a luz. Parte da luz do *laser* é refletida na interface ar-água, diminuindo a quantidade de energia que entra no meio – e chega no detector. Ainda, quando a luz entra na água, a pequena lente formada pelo menisco curvo provoca uma leve divergência dos raios de luz provenientes do laser. Essa distorção no feixe cresce à medida que se aumenta a coluna d'água salgada no cano. Todos esses fatores não são levados em consideração no modelo de Beer-Lambert e devem ser controlados (minimamente) pelo estudante. Medindo a iluminância na saída do cano, é possível ajustar a lei de Beer-Lambert aos dados e obter o

6 Ocorre quando o excesso de poluentes no ar escurece a chuva. A fuligem foi usada por um grupo nesse experimento porque esse foi o poluente que provocou o fenômeno da chuva negra em São Paulo, no ano de 2019. Na ocasião, a fuligem chegou à cidade pelos ventos vindos da região do Pantanal, que sofria com as queimadas naquele ano.

coeficiente de atenuação da água com sal. A análise dos dados deve ser feita tendo em vista as fontes de erro mencionadas.

Investigação: todo o tempo restante da aula é deixado livre para que os estudantes discutam sobre o planejamento da investigação escolhida. Esta etapa, a terceira do EM, é denominada de “**Investigação**”. É importante destacar que *não costumam ser realizados experimentos* na primeira aula do EM. Neste estudo eles ocorrem no segundo encontro. Entretanto, o processo de investigação já começava na primeira aula, na medida em que os estudantes planejavam formas de executar o experimento. A primeira aula é usualmente voltada para que os estudantes se preparem para a investigação empírica, avaliando modelos científicos que podem ser úteis para investigar o fenômeno, delineando um experimento, familiarizando-se com os instrumentos de coleta de dados, tirando dúvidas com a professora, etc. Para que a investigação ocorra de forma adequada, dentro das limitações de tempo de uma aula de laboratório, é essencial que os estudantes tenham clareza sobre os aspectos teóricos e práticos do experimento. Por esse motivo, a professora pede para que os estudantes esbocem em seus cadernos de laboratório todas as etapas da coleta e análise de dados, bem como o modelo teórico de referência utilizado na investigação. Para auxiliá-los nesse processo, distribuimos um material contendo questões norteadoras para o desenvolvimento de experimentos, disponível no Apêndice D. Com isso, espera-se que, ao chegar o dia da coleta de dados, os estudantes já tenham planejado o que fazer, o que evita perdas de tempo e frustrações.



Figura 5 - Dois estudantes montando suportes para acoplar um cano de PVC cheio de água com sal durante a etapa da Investigação nesse EM.

Na aula seguinte (segundo encontro presencial do EM), antes dos estudantes realizarem os experimentos, pedia-se para que explicitassem em seu caderno o modelo de fonte (pontual ou

colimada), a montagem experimental e como as grandezas relevantes (o coeficiente de atenuação da luz) seriam medidas. Esse planejamento devia ser aprovado pela professora ou pesquisador antes de iniciar a montagem. Portanto, foi somente nessa etapa que os estudantes efetivamente montaram aparatos necessários para realizar os experimentos, realizam a coleta dos dados e iniciam a análise. Preferencialmente, a professora não faz exposições nessa etapa, limitando-se apenas a orientar os estudantes durante todo o tempo de aula enquanto eles realizam suas investigações.

Durante a aula, os estudantes trabalham em grupo, porém a professora está sempre presente para intervir quando necessário, dirimindo dúvidas, fazendo sugestões, alertando os estudantes em caso de possíveis problemas com a montagem experimental, etc.

Discussão Final: no terceiro e último encontro do EM, etapa denominada de “Discussão Final”, cada grupo apresenta os resultados obtidos para a turma. Para que os estudantes sejam sintéticos na apresentação de resultados, concentrando-se naquilo que realmente foi essencial na investigação, pede-se que resumam seus resultados em pequenos quadros brancos, de 1mx1m, conforme mostra a Figura 6. O tempo de apresentação é limitado a aproximadamente 10 min por grupo, sendo reservado em torno de 5 min para perguntas discussões ao final.



Figura 6 - Grupo formado por três estudantes apresentando os resultados de sua investigação sobre a atenuação da luz no acrílico.

Os objetivos desta etapa são: fomentar o debate entre o grupo, estimulando os estudantes a exercitarem a argumentação e o linguajar científico ao explicarem para seus pares o que foi realizado; enriquecer a atividade, que passa a ser percebida sob diferentes perspectivas na medida em que os estudantes entendem que o mesmo problema pode ser resolvido com diferentes abordagens, usando diferentes montagens e modelos teóricos de referência; corrigir equívocos de interpretação por parte dos estudantes, permitindo que o problema seja sanado antes da entrega de um relatório; promover a construção de concepções epistemológicas mais adequadas a partir da compreensão dos processos de modelagem envolvidos nas investigações. Ainda, durante a Discussão Final, a professora pode discutir aspectos importantes sobre modelagem, como as consequências das idealizações assumidas no processo de construção dos modelos; sobre os impactos da dificuldade em controlar variáveis e

fatores assumidos nos modelos; sobre o processo de contrastação empírica entre as previsões dos modelos e as evidências, etc.

Ao final da aula, a professora ainda contribui na discussão apresentando uma possível solução do problema, chamando a atenção para os aspectos da modelagem que permearam todo o processo.

Elaboração de Relatório: Até uma semana depois da realização da Discussão Final, os estudantes tinham que entregar, individualmente, um relatório sintetizando a investigação realizada. A correção foi baseada em um protocolo, disponível no Apêndice E, também distribuído aos estudantes para que possam se autoavaliar. Esperava-se que os relatórios levassem em conta as discussões e sugestões apresentadas pelos colegas e pela professora durante a Discussão Final.

4.1.2 Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”

As situação-problema que motivou as investigações nesse EM foi a seguinte:

A maior parte da comunicação global se dá por satélites ou por cabeamento de fibra ótica. Para garantir a comunicação entre os países separados pelos mares, uma extensa rede de cabos marítimos está em operação. Um cabo de fibra ótica consegue transmitir luz porque seu interior é feito com um material transparente. À primeira vista, desde que o cabo seja retilíneo, podemos conceber que a luz se propaga de um ponto a outro sem problemas. No entanto, mesmo quando o cabo se enrola ou faz uma curva, a luz muda de direção junto com o cabo, chegando ao seu destino. Como a luz se propaga dentro de um cabo de fibra ótica? Quais propriedades do cabo influenciam a transmissão da luz?

Para enfrentar esse problema, o estudante precisa ter conhecimentos sobre as características da propagação da luz pela matéria, bem como sobre o índice de refração. A reflexão total da luz - vista como um dos fenômenos determinantes da transmissão da luz pelo cabo - pode ser usada como conteúdo âncora para o estudo do índice de refração. Usualmente, os estudantes costumam considerar o índice de refração de um material como uma grandeza que permanece essencialmente constante. Entretanto, o tipo de material, sua temperatura e o comprimento de onda da luz são fatores que influenciam esse parâmetro. A compreensão desses aspectos oportuniza uma reflexão crítica sobre as simplificações da realidade imbricadas nos modelos, que muitas vezes são evocadas de forma implícita. Uma forma de estimar o índice de refração com razoável precisão é através da utilização de prismas. No contexto da graduação, os prismas são usados para evidenciar, tipicamente de forma qualitativa, a dispersão da luz. Nesse EM, exploramos a equação do prisma para estudar o índice de refração dos materiais de forma quantitativa.

Para que os estudantes tivessem suficiente compreensão prévia sobre essas questões, pedimos para que lessem dois capítulos de um livro didático sobre reflexão e refração da luz - Seção 33-8 do livro Fundamento de Física (HALLIDAY & RESNICK, 2009) -, além do material suplementar produzido pelo pesquisador (disponível no Apêndice F), no qual a física subjacente à equação do prisma é elucidada, dando ênfase ao processo de modelagem envolvido na construção dos modelos teóricos. Além disso, os estudantes respondiam ao questionário sobre as leituras.

Para chegar no modelo que descreve a deflexão da luz por prismas, que serve de referência para as investigações propostas no EM 2, trabalha-se no domínio da Ótica Geométrica e se assume como pressuposto teórico a validade da Lei de Snell, que fornece a relação entre o ângulo de incidência e de refração em um material dielétrico. Admitimos adicionalmente que o prisma é feito de um material homogêneo e que suas superfícies são perfeitamente planas. A partir dessas hipóteses, deriva-se o modelo que descreve a deflexão da luz por prismas a partir de considerações puramente geométricas.

Esse EM foi desenvolvido privilegiando o conceito de “modelo teórico de referência”. Na MDC+ esse conceito é fundamental na medida em que se entende que investigações empíricas são delineadas no seio de um modelo teórico de referência, que orienta todo o processo, desde o planejamento, montagem do experimento, execução e análise dos resultados. Muitas vezes o modelo teórico de referência é levado em consideração de forma implícita nas etapas da investigação, dando força à percepção de que experimentos científicos demandam uma suposta neutralidade, sendo desvinculados de qualquer concepção prévia do cientista que o conduz. O conceito de “modelo teórico de referência” é privilegiado no EM porque a intencionalidade do fazer científico fica evidente, por exemplo, na situação em que o estudante calcula o índice de refração do prisma com a luz no ângulo de desvio mínimo; quando incide a luz em um ângulo específico, de acordo com o tipo de prisma, para observar uma deflexão observável em um anteparo distante.

Nesse EM propomos duas investigações (veja no Apêndice G), ambas propícias para serem realizadas com prismas. Uma delas é a seguinte:

Fibras óticas transportam informação em três comprimentos de onda preferenciais: 850nm, 1300nm e 1550nm. Esses valores pertencem à faixa do infravermelho e, em geral, quanto maior o comprimento de onda, melhor a transmissão. Qual a influência do comprimento de onda da luz na reflexão interna total? Como o índice de refração se comporta como uma função do comprimento de onda? Utilize a equação de Sellmeier para relacionar o ângulo de reflexão total da luz com o comprimento de onda.

É possível calcular o índice de refração como função do comprimento de onda incidindo um feixe de luz branca em um prisma que dispersa as cores em um anteparo distante. Com as distâncias de cada cor ao ponto que o feixe atingiria o anteparo se o prisma não fosse interposto, é possível calcular o índice de refração para cada componente do espectro. Os estudantes são ainda encorajados a utilizar a equação de Sellmeier para ajustar os dados empíricos.

Em termos da modelagem, é essencial delinear o experimento com base no modelo que descreve a deflexão da luz por prismas. Isso porque, para fazer a medida do índice de refração de cada cor do espectro, o feixe de luz branca deve incidir em um ângulo que produz o mínimo desvio ao atravessar o prisma. Esse ângulo é derivado do modelo teórico do prisma, que guia toda a coleta de dados.

Como dito anteriormente, os estudantes tinham liberdade para fazer suas investigações. Na Figura 7, um grupo apresenta seus resultados sobre uma investigação que tinha como objetivo a determinação do índice de refração da água em função da concentração de sal. Por mais que essa situação divirja da situação-problema original, os estudantes se concentraram em estudar o mesmo fenômeno, isto é, a reflexão total da luz.

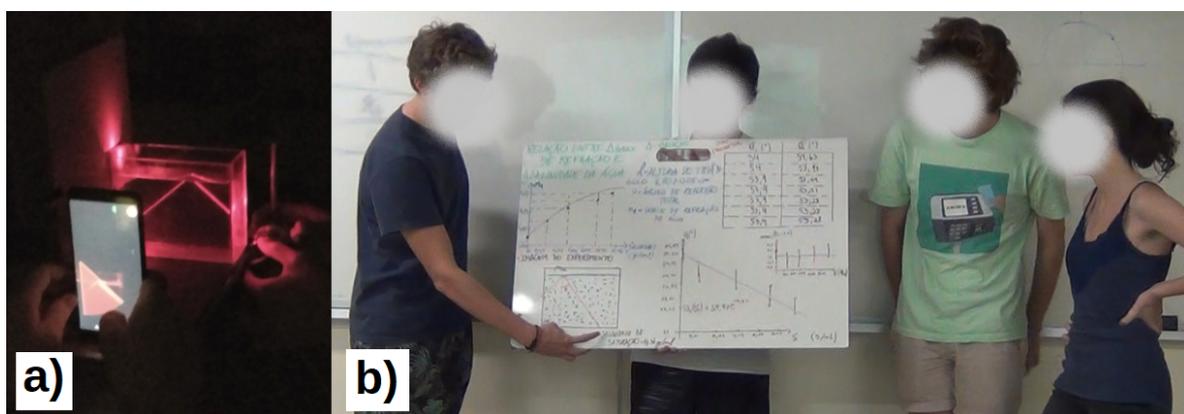


Figura 7 - Um grupo decidiu fazer uma investigação diferente das propostas no guia. Em a), uma foto do seu experimento durante a etapa da Investigação e, em b), da sua apresentação durante a Discussão Final.

4.1.3 Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”

Nesse EM, a seguinte situação-problema serviu de mote:

Um boato sobre uma relíquia mística de uma tribo ancestral motivou a expedição de um grupo de arqueólogos na região em que a lenda se refere. Segundo guias locais, a lenda conta que a relíquia pode ser vista no fundo de um lago de águas cristalinas a partir da sua margem e observando no sentido oeste. Porém, segundo a lenda, a relíquia só é visível por volta do meio dia, desaparecendo misteriosamente ao longo da tarde. Intrigada com a situação, uma arqueóloga questiona se a reflexão da luz solar sobre a superfície da água pode de alguma forma ofuscar a imagem do fundo do lago. Quais fatores influenciam na intensidade da luz solar refletida pela superfície? Em quais condições a relíquia é visível para um observador parado na margem do lago?

Para ter condições de atacar esse problema, é essencial que o estudante compreenda que o tipo de polarização da luz é fundamental para entender o desaparecimento da relíquia, já que a intensidade da luz refletida e transmitida pela água é dependente dessa propriedade. Por exemplo, a luz de um *laser* é polarizada, ao contrário da luz proveniente do Sol. A condição de visibilidade da relíquia é determinada pela concorrência entre raios de luz refletidos diretamente na superfície da água com raios de luz refletidos pela relíquia submersa. É necessário, portanto, estudar os coeficientes de reflexão e transmissão da luz não polarizada. Essas grandezas podem ser estudadas, por exemplo, por modelos baseados nas equações de Fresnel, que permitem o cálculo da amplitude do campo elétrico da luz refletida em um meio; também podem ser estudadas pela lei de Malus, que fornece a intensidade da luz polarizada transmitida por um polarizador. Por exemplo, na Lei de Malus, os estudantes precisam controlar a direção de polarização do polarizador, já que a Lei leva em consideração o ângulo entre essa direção e a direção de polarização da luz que incide no polarizador. Isso é feito acoplando um transferidor a um dos polarizadores, de forma a ter controle sobre essa variável. Assim, é possível evidenciar que os procedimentos de controle de variáveis estão relacionados ao processo de modelagem subjacente à investigação.

A Tarefa Prévia desse EM consistiu na leitura de dois textos: uma seção de um livro didático sobre polarização da luz - Seção 33-7 do livro *Fundamento de Física* (HALLIDAY & RESNICK, 2009); e um material suplementar produzido pelo pesquisador (disponível no Apêndice H) no qual as equações de Fresnel e o modelo teórico de reflexão e transmissão da luz pela matéria foram deduzidos, como no texto anterior, chamando a atenção para os aspectos essenciais do processo de construção desses modelos. Além da leitura dos textos, os estudantes responderam ao questionário eletrônico.

Para chegar em um modelo que prediz os coeficientes de reflexão e transmissão da luz pela matéria, primeiramente derivamos as famosas equações de Fresnel (LORRAIN, 1988). Isso é feito evocando conceitos da Teoria Eletromagnética clássica. Podemos idealizar a situação, exigindo que a radiação seja linearmente polarizada e monocromática, os meios em que a luz se propaga sejam isotrópicos, lineares e dielétricos, e, assim, calcular o coeficiente de reflexão e transmissão pela interface entre os meios em função desses parâmetros. A partir dessas relações, é possível obter um modelo que descreve o mesmo fenômeno para luz não polarizada, como a do Sol.

O EM dá enfoque ao conceito de “Controle de Variáveis”. O domínio desse conceito é importante porque, ao executar atividades empíricas, é essencial que o estudante estabeleça procedimentos de controle de variáveis que minimizem o efeito dos fatores não levados em consideração no modelo teórico de referência que dirige a investigação. Isso significa ter controle sobre os referentes (entidades reais ou supostas como tais levadas em consideração) e variáveis/parâmetros (representam o sistema físico, bem como agentes externos que atuam sobre ele, podendo assumir valores numéricos contínuos ou discretos) envolvidos. Em particular, esse EM privilegia o conceito de controle de variáveis porque, para realizar as investigações, é essencial o

estabelecimento de uma série de procedimentos de controle de variáveis dirigidos pelas idealizações e aproximações consideradas no modelo teórico que fundamenta a investigação.

Foram propostas três investigações no Guia da Atividade (veja no Apêndice I), todas envolvendo a determinação de coeficientes de reflexão ou transmissão da luz. Uma delas é a seguinte:

Investigue a reflexão da luz polarizada paralela ou perpendicularmente ao plano de incidência quando ela é refletida em uma superfície dielétrica como o vidro ou o acrílico. Existe um ângulo em que não existe reflexão? Em que situação?

Nessa investigação, os estudantes podem avaliar a intensidade da luz que sofre reflexão incidindo a luz de um *laser* em uma porção d'água e medindo a intensidade da luz refletida por ela.

Em termos de modelagem, é essencial que o estudante controle a direção de polarização do *laser*, que pode ser perpendicular ou paralela ao plano de incidência. Para fazer isso, pode, por exemplo, orientar-se pelo ângulo de Brewster⁷; outro parâmetro a ser controlado e que deve ser medido com alguma precisão é o ângulo de incidência da luz na água. De maneira geral, o experimento permite estudar a influência do estado de polarização da luz no fenômeno da reflexão e transmissão entre dois meios.

Nesse EM, o conhecimento construído permitiu explicar, inclusive, fenômenos inexplicados nos dois EM anteriores, reavivando as aprendizagens dos estudantes, fazendo-os revisitarem conceitos importantes sobre modelagem. Esses fenômenos foram: a perda de energia na transmissão da luz na interface entre dois meios (no EM Atenuação da Luz); e a reflexão total da luz (no EM Reflexão Total da Luz).

4.1.4 Episódio de Modelagem “Espectroscopia”

A situação-problema que motivou o último EM foi a seguinte:

Atualmente as telas dos dispositivos eletrônicos são vendidas comercialmente alegando poder reproduzir mais de 16 milhões de cores diferentes (apesar de o olho humano reconhecer pouco mais do que 10 milhões). Com uma simples lente de aumento é possível olhar de perto a superfície dessas telas e constatar que existem várias unidades iguais formadas por três cores, apenas: vermelho, verde e azul. Essa unidade forma um pixel. Como um pixel de três cores pode gerar todas as cores

⁷ O ângulo de Brewster pode ser definido como o ângulo de incidência para o qual a luz polarizada paralelamente ao plano de incidência não é refletida.

que reconhecemos nas telas? De maneira geral, como é possível produzir milhares de cores com apenas três?

A compreensão da formação das cores pelas telas e a sua interpretação pelo olho humano passa por dois aspectos: i) O Gamut sRGB; e ii) o espectro de emissão dos *pixels*. O Gamut pode ser entendido como o conjunto das cores reproduzíveis por um dispositivo de tela, sendo que um dos mais usados é o sistema sRGB. Para gerar cada cor, os pixels vermelho, verde e azul ascendem com diferentes intensidades, emitindo um espectro característico, que pode ser medido com um espectrômetro. Nesse EM os estudantes fazem essa medida, construindo o seu próprio espectrômetro usando apenas três materiais: um pedaço de DVD, papel e fita adesiva. O DVD funciona como uma rede de difração, e pode ser montado sobre uma estrutura de papel, que é acoplada na *webcam* de um computador com o auxílio da fita adesiva. A partir daí, um *software* livre é utilizado para analisar os dados. Do ponto de vista da modelagem, esse experimento deixa explícita a importância de se entender os modelos e teorias que fundamentam o processo de medição.

Diferentemente dos EM anteriores, antes da atividade pedimos para que os estudantes realizassem a leitura de um único texto de um livro didático, envolvendo os conteúdos de redes de difração, espectroscopia, dispersão e resolução - Seções 36-8 e 36-9 do livro Fundamento de Física (HALLIDAY & RESNICK, 2009). Não houve material suplementar nesse EM; no lugar dele, o pesquisador disponibilizou aos estudantes um manual de montagem e operação do espectrômetro, contendo dicas de operação (p. ex., procedimentos de calibração e manipulação do *software*). Esse manual pode ser consultado no Apêndice J. Os estudantes responderam ao questionário como de costume.

O processo de medida pelo espectrômetro é fundamentado em uma técnica específica. Primeiramente, a luz proveniente do objeto a ser analisado é colimada por uma fenda estreita na entrada do espectrômetro. Na saída, essa luz sofre difração na rede de difração do DVD, que é previamente descascado para deixar a luz passar através dele. O ângulo de incidência da luz no DVD é projetado para que o primeiro máximo de difração se forme sobre o CCD⁸ *webcam*. O sinal elétrico gerado no CCD indica a presença e intensidade relativa dos vários comprimentos de onda dentro do espectro visível. Esses sinais são interpretados por um *software* denominado *SpectralWorkbench*, disponibilizado pela plataforma de conhecimento livre *Publiclab*⁹. Fazendo o *login* na plataforma, os estudantes podem salvar e compartilhar os espectros observados, fazer o *download* de espectros de outros usuários, etc.

Esse EM foi construído para dar enfoque a um conceito fundamental do fazer experimental: o conceito de Medição. Uma medição pode ser definida como uma observação quantificada de um fenômeno. O processo de medição é sempre intermediado por modelos teóricos que fundamentam o funcionamento do aparelho usado na medição, desde um mais básico, como uma régua, até um mais complexo, como um luxímetro. A medição envolve sempre a coleta de alguma característica relativa a

8 O CCD, sigla em inglês para *Charged-Coupled Device*, é um conjunto de células semicondutoras que produzem eletricidade quando expostas à luz com certos comprimentos de onda.

9 Disponível em: <https://publiclab.org/>. Acesso em: 13/04/2021.

um fenômeno (p. ex., medir a intensidade da luz que incide sobre uma superfície). Em seguida, tal dado é de alguma forma transformado, por meio de algum modelo que fundamenta o funcionamento do instrumento de medida, fornecendo um resultado, interpretado por nós como a medida quantificada das propriedades desse objeto/evento (p. ex., sobre a superfície incide luz de 5 klux). Entretanto, em diversas situações, as hipóteses subjacentes à construção de tais modelos não são colocadas à prova, de forma que aceitamos o resultado da medição sem reflexões adicionais sobre os processos envolvidos.

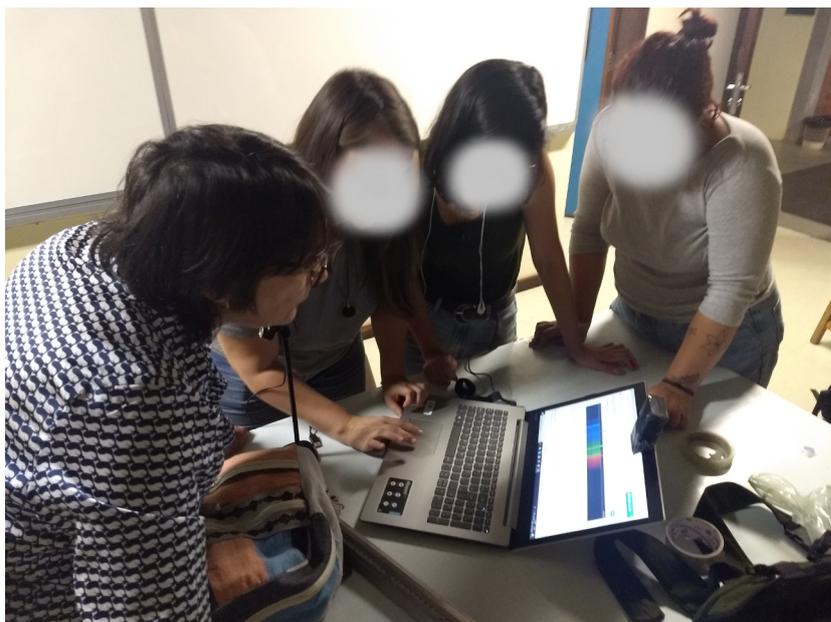


Figura 8 - Três estudantes realizando a calibração de um espectrômetro acoplado na *webcam* do computador. A professora aparece à esquerda na foto, auxiliando o grupo. A atividade foi realizada no EM Espectroscopia, durante a etapa da investigação.

Nesse EM, diferentemente dos anteriores, pedimos que os estudantes necessariamente investigassem a questão dos *pixels*. Além disso, pedimos para que medissem o espectro de algum outro material à sua escolha. Fizemos isso porque, uma vez montado o espectrômetro, a medição é rápida, pois basta registrar a imagem no computador. No Guia da Atividade, foram sugeridas três investigações adicionais (ver no Apêndice K), sendo que uma delas foi a seguinte:

As folhas possuem uma série de pigmentos fotossintéticos, não apenas a clorofila. No processo de fotossíntese a energia do Sol é convertida em energia química, sendo armazenada em açúcares. Quais são os comprimentos de onda utilizados pelos pigmentos para fazer a fotossíntese? Nessa investigação você medirá um espectro de absorção.

Nesse experimento os estudantes precisavam obter um espectro de absorção. Para isso foi possível utilizar o espectrômetro para medir o espectro da luz proveniente de uma amostra contendo

pigmentos fotossintéticos; essa amostra deveria ser iluminada com luz de fundo branca, que funciona como espectro contínuo. Subtraindo os dois espectros, é possível obter a informação desejada.

Do ponto de vista da modelagem, a realização desse experimento requer procedimentos que dão sentido ao conceito de “medição” porque o entendimento da técnica por trás do funcionamento do espectrômetro é essencial para se compreender os resultados de cada medida. Isso ocorre, por exemplo, quando o estudante obtém o espectro de absorção usando a mesma fonte; quando se faz uma boa calibração do espectrômetro utilizando algum espectro conhecido, como o do gás de mercúrio presente em lâmpadas fluorescentes; quando se entende as limitações da medição tendo em vista a sensibilidade do CCD da câmera, que opera principalmente na faixa do visível; quando se limita a exposição de luz que entra pela fenda evitando superexposição, etc.

4.1.5 Considerações gerais sobre os Episódios de Modelagem

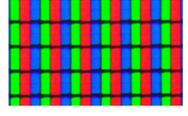
Uma característica importante de todas as atividades propostas nos EM é que elas requerem esforços dos estudantes em situações de modelagem. Isso ocorre quando eles decidem sobre qual é o modelo teórico de referência da investigação, planejam o experimento, estabelecem procedimentos de controle de variáveis, realizam operações empíricas envolvendo a medição de grandezas relevantes, contrastam empíricamente predições e evidências, etc.

Mesmo que os EM tenham sido estruturados para dar enfoque a um conceito da MDC+, os estudantes precisaram mobilizar vários conhecimentos relacionados a conceitos da MDC+ em cada atividade. Por isso, o pesquisador conseguiu obter uma visão holística sobre o processo, mapeando os avanços e retrocessos dos estudantes no domínio desse campo conceitual.

Ainda, como as atividades evocavam conceitos específicos da Ótica, um campo conceitual subjacente ao campo da MDC+, também foi possível avaliar o processo de atribuição de sentido aos conceitos desse campo. Entretanto, o enfoque desta dissertação concentra-se em avaliar as potencialidades do EM para auxiliar os estudantes: i) a amenizar suas dificuldades típicas da Ótica; e ii) no domínio do campo conceitual da MDC+.

No Quadro 5, resumimos o conteúdo de cada EM do ponto de vista da modelagem e da Ótica. A seguir apresentamos a estrutura da disciplina de Física Experimental IV, a forma como os EM foram aplicados, os participantes da pesquisa e a metodologia de pesquisa de forma detalhada.

Quadro 5 - EM construídos para a realização desta pesquisa.

EM		Conceitos de modelagem que o EM dá enfoque	Conhecimentos de Ótica privilegiados no EM
	Atenuação da luz;	Expansão do modelo;	Transporte de energia e modelo de Beer-Lambert;
	Reflexão total da luz;	Modelo teórico de referência;	Índice de refração e modelo que descreve a deflexão da luz que atravessa um prisma;
	Polarização da luz;	Controle de variáveis;	Polarização, coeficientes de reflexão e transmissão e Equações de Fresnel;
	Espectroscopia;	Medição;	Espectroscopia e redes de difração;

4.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para respondermos às nossas questões de pesquisa, precisávamos proporcionar aos estudantes situações experimentais sobre Ótica com potencial de dar sentido aos conceitos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental. Nosso enfoque foi em identificar as situações e seu potencial para dar sentido aos conceitos da MDC+. Isso foi feito avaliando se os estudantes manifestavam conhecimentos explícitos relacionados aos conceitos desse campo conceitual. Não está no escopo deste trabalho identificar, por exemplo, invariantes operatórios dos indivíduos participantes da pesquisa. Para isso, optamos por explorar um contexto de aulas de laboratório de Física em nível de graduação, mais especificamente uma turma da disciplina de Física Experimental IV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que contava com alunos do Bacharelado e Licenciatura em Física. Nessa disciplina são abordados conceitos da Física que pertencem ao campo conceitual da Ótica em situações experimentais. Precisamente, os conteúdos de Física tratados nessa disciplina são ondas eletromagnéticas, Ótica Física, Geométrica e Espectroscopia.

Parar alcançar os objetivos desse estudo, amparamo-nos em um referencial metodológico de pesquisa que leva em consideração, simultaneamente, a natureza das questões de pesquisa que se pretende responder e o contexto de realização da pesquisa. Conforme mencionado na introdução, as questões de pesquisa foram as seguintes:

Questão de pesquisa 1: Como os EM podem contribuir para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da Ótica, favorecendo a amenização de dificuldades típicas dos estudantes na aprendizagem de conceitos físicos da Ótica?

Questão de pesquisa 2: *Como os EM podem contribuir para que os estudantes deem sentido para conceitos da MDC+, em particular aos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental?*

Já o contexto de realização da pesquisa, foi a implementação de uma metodologia de ensino aberta (os EM), focada na modelagem em uma turma da disciplina de Física Experimental IV. Nesse tipo de situação, além das ações dos estudantes serem imprevisíveis, se influenciam mutuamente, tanto em nível individual quanto coletivo, já que os EM foram concebidos para serem atividades a serem realizadas em grupo. Ainda, ao enfrentar uma mesma situação sob diferentes perspectivas, em diferentes momentos, as ações dos estudantes podem ser diferentes, sobrepondo-se mutuamente, não apresentando limites bem definidos. Dessa forma, ao estudar as ações dos estudantes, não podemos traçar uma sequência bem definida de eventos que explicam os fatos, pois os desenvolvimentos se dão em meio a avanços e retrocessos. Outra característica importante desta pesquisa é que ela ocorre em meio a acontecimentos contemporâneos, em uma situação que o pesquisador não tem controle sobre os eventos possíveis.

Entendemos que as características do contexto de estudo acima elucidadas justificam a realização de uma pesquisa de natureza qualitativa, na forma de um estudo de caso, seguindo as orientações metodológicas de Robert Yin (2005, 2011). A escolha também se justifica porque, na acepção de Yin, estudos de caso são adequados para se responder a questões de pesquisa do tipo “como” (YIN, 2005). Também podemos classificar este estudo como de natureza “explanatória”, pois partimos de proposições teóricas concebidas com base em pesquisa anterior (HEIDEMANN, 2015) e buscamos com esse estudo avaliar em que medida essas proposições teóricas foram corroboradas. De forma mais específica, o presente estudo contou com um caso, que foi a turma escolhida, e sete unidades de análise, constituídas pelos estudantes da turma selecionados para participar da pesquisa. Portanto, na nomenclatura de Yin, esta pesquisa se constitui em um estudo de caso único, explanatório e incorporado (conta com múltiplas unidades de análise incorporadas ao caso).

Ao delinear o caso, optamos por um estudo incorporado porque, através dele, é possível realizar um estudo mais aprofundado, focado na análise individual dos avanços e retrocessos dos estudantes no domínio do Campo Conceitual da MCD+ vinculado com a Ótica, possibilitando mais embasamento para responder às questões de pesquisa. De fato, a vantagem de um estudo de caso incorporado consiste em poder capturar aspectos que poderiam ser deixados para trás em uma

análise holística, que suaviza possíveis discrepâncias entre os dados. Portanto, a análise é feita com base nas evidências coletadas referentes a cada participante da pesquisa, porém nenhuma conclusão se baseia unicamente em uma única evidência.

Segundo as orientações metodológicas de Yin (idem), foi estabelecida para cada questão de pesquisa uma proposição teórica, que serviram para orientar a coleta de dados em campo. Nesse caso, as proposições teóricas foram derivadas de conclusões de um estudo de caso explanatório, fruto de pesquisas com EM no contexto de atividades experimentais do campo conceitual das Oscilações Mecânicas e da Termodinâmica (HEIDEMANN, 2015). Essas proposições são as seguintes:

Proposição Teórica 1: *Os EM desenvolvidos proporcionam aos estudantes situações com potencial para dar sentido aos conceitos do campo conceitual da Ótica, e que favorecem a construção de conhecimentos (conceitos e teoremas) desse campo a partir da mobilização deles no planejamento, execução e análise de experimentos didáticos.*

Proposição Teórica 2: *Durante o desenvolvimento de um EM, os estudantes enfrentam situações que possibilitam que eles: i) deem sentido a conceitos da MDC+; e ii) avancem gradualmente em seus domínios do campo conceitual da MDC+.*

Com base nas proposições teóricas formuladas, planejamos procedimentos de coleta de dados para realizar uma análise que pudesse avaliar a plausibilidade de tais proposições, ajudando assim a responder às questões de pesquisa. Isso foi feito pensando em satisfazer critérios que, de acordo com Yin (2011), conferem qualidade ao projeto de pesquisa. Segundo esse autor, esses critérios são: validade de construto, confiabilidade e validade externa.

A validade de construto se refere à capacidade de responder às questões de pesquisa por meio dos dados coletados. Segundo Yin, uma tática para que isso ocorra é a utilização de várias fontes de evidência que permitam realizar linhas convergentes de investigação. Em conformidade com essa recomendação, nesta pesquisa, foram utilizadas como fontes de evidência, durante a fase de coleta de dados: caderno de campo, questionários aos estudantes (sobre a Tarefa Prévia – vide Apêndice B), avaliação de relatórios, entrevistas semiestruturadas, gravação da apresentação dos estudantes durante as discussões finais em cada EM e protocolos de observação. Os protocolos de observação podem ser consultados nos Apêndices de L a O. A forma como essas fontes de evidências foram utilizadas é descrita a seguir, quando elucidarmos o procedimento de análise dos dados.

Já a confiabilidade se refere à replicabilidade da pesquisa, isto é: se o mesmo estudo fosse feito em um contexto semelhante e com as mesmas lentes de pesquisa, se chegaria às mesmas conclusões? Para aumentar a confiabilidade da pesquisa, todo o procedimento de análise de dados será descrito em detalhes, buscando deixar claras quais fontes de evidência fundamentaram as conclusões, minimizando a parcialidade do estudo. Para isso, criou-se bancos de dados físicos e

eletrônicos, onde os elementos relevantes para responder às questões de pesquisa foram armazenados.

Por fim, o critério de validade externa se refere à capacidade de replicação dos resultados do estudo para outros contextos, que não o estudado. Esse critério é satisfeito porque o caso alvo da pesquisa foi escolhido com base na sua representatividade (*idem*), isto é, assumimos que a turma de Física Experimental IV é representativa das turmas de disciplinas experimentais sobre Ótica de cursos de Física da UFRGS. Destaca-se, no entanto, que a generalização almejada no estudo de caso não é *estatística* (isto é, baseada em amostras representativas de um universo), mas sim *analítica*. Nesse tipo de estudo, o processo de generalização de resultados ocorre no seio de uma teoria. Assim, para responder as questões de pesquisa, buscou-se enquadrar as evidências empíricas no quadro teórico da MDC+.

A seguir, descrevemos o caso alvo deste estudo – a turma –, explicando porque foi escolhido; também fazemos uma breve descrição das unidades de análise que compõem este caso. Em seguida descrevemos os procedimentos de análise de dados.

4.2.1 O caso escolhido

No semestre de aplicação da pesquisa (2019/2), houve três turmas simultâneas da disciplina de Física Experimental IV na Universidade, uma diurna e duas noturnas. As três turmas tinham a mesma carga horária (2 horas-aula) e eram ministradas no mesmo dia da semana. Em todas elas, foram realizadas as mesmas atividades de modelagem descritas na seção anterior, sendo que o pesquisador trabalhou de forma colaborativa com as duas professoras ministrantes da disciplina. Entretanto, apenas uma turma foi alvo da pesquisa: a do turno noturno. Tal turma foi escolhida porque, em função de ter sido a turma em que mais relatórios de atividades foram entregues pelos estudantes, era a turma que nos disponibilizava mais dados cuja análise nos daria subsídios para responder às questões de pesquisa. Apesar de a turma escolhida ser do turno noturno, seus estudantes eram majoritariamente do curso diurno de Física, sendo representativa, portanto, do universo de estudantes de Física da UFRGS. Nesse semestre, estudantes do curso diurno frequentavam turmas em horário noturno porque houve alta demanda pela disciplina, resultando na abertura de turma extra à noite.

O pesquisador coletou dados ao longo de todo o semestre, de forma que foram integralizadas 32 horas-aula de imersão em campo. A turma contava com 15 estudantes, sendo 6 mulheres e 9 homens, com média de idade de 20,3 anos com desvio padrão de 1,4 anos. Nem todos os estudantes da turma participaram da pesquisa, no entanto. Selecionamos apenas os 7 que fizeram todos os relatórios sobre os EM propostos, além de terem cumprido todos os pré-requisitos da súmula da disciplina, como a exigência da entrega de, no mínimo, 6 relatórios.

Tradicionalmente, a disciplina de Física Experimental IV da UFRGS conta com 12 experimentos, guiados por roteiros que dão suporte às atividades investigativas preconcebidas. Para a realização desta pesquisa, o plano de ensino da disciplina foi alterado significativamente, com a devida autorização da Universidade. Por exemplo, a disciplina contava com 12 atividades práticas; após as modificações, passou a contar com oito, sendo quatro delas com EM e quatro experimentos tradicionais. Optamos por deixar na sua forma original alguns experimentos que são tidos como “clássicos” da Física, como os experimentos com lentes e espelhos, o experimento de Young e o de difração em redes Assim, ao todo foram removidos oito experimentos da disciplina para introduzir quatro EM, já que cada EM demandou três encontros presenciais. Todas as atividades desenvolvidas foram integradas com o plano de ensino, tendo sido, portanto, consideradas para fins de atribuição de conceito final do estudante na disciplina.

Todos os estudantes selecionados para participar da pesquisa assinaram um termo (disponível no Apêndice Q) de consentimento livre e esclarecido, informando que a pesquisa ocorre respeitando princípios éticos, dentre eles o de não divulgação das suas identidades, e o uso das suas imagens apenas para fins acadêmicos. Por isso, em vez de nos referirmos pelos seus nomes, usaremos a denominação Estudante 1, Estudante 2, etc. No Quadro 6 resumimos o perfil de cada estudante participante da pesquisa. Todos os estudantes, exceto o quarto, pertenciam ao curso de Bacharelado em Astrofísica e eram do sexo masculino. A Estudante 4 era licencianda em Física.

4.2.2 Análise de dados

Para Yin, analisar dados significa examinar, categorizar, tabular, testar, e combinar métodos quantitativo e qualitativos para elucidar as proposições teóricas em estudo (YIN, 2002, p.109). Esse não é um processo linear, onde se pode seguir a trilha que vai das evidências às conclusões. Por mais que Yin (2011) elenque as etapas da análise de dados em uma ordem lógica de condução da pesquisa, o autor entende que é possível que o pesquisador precise ir e voltar entre as etapas, tanto quanto for necessário, até que as evidências possam ser usadas da forma mais conveniente para responder às questões de pesquisa. Essas etapas são: compilação, desconstrução, reconstrução, interpretação e conclusão. A seguir apresentamos como essas etapas foram realizadas nesta pesquisa.

A etapa de compilação iniciou pelo reexame de todos os dados coletados através das diferentes fontes de evidências ao longo da pesquisa. Isso foi necessário para que o pesquisador se apropriasse da totalidade das informações disponíveis, organizando o material utilizável. Em seguida, baseado nas proposições teóricas, buscou-se isolar os trechos de evidência que pudessem ser úteis. Esses trechos foram então integrados em uma matriz qualitativa de análise, buscando facilitar o acesso e a rápida conferência de informações. A seguir, damos exemplos de fontes de evidência, na

forma de excertos e situações, que foram consideradas importantes para avaliar as proposições teóricas.

Quadro 6 - Participantes da pesquisa.

Estudante	Idade	Descrição
1	22	Estudante motivado e engajado no laboratório, trabalhando de forma colaborativa com seus colegas de grupo. Falava pouco durante a Discussão Final, preferindo deixar seus colegas apresentarem. Trabalhava em um dos laboratórios da universidade, como bolsista, por isso possuía muita experiência prática. Seus relatórios continham descrições sintéticas, porém suficientes, das investigações realizadas.
2	20	Estudante entusiasmado e curioso, trabalhando de forma colaborativa com seu grupo. Muitas vezes tomava a frente tanto no delineamento experimental quanto na apresentação da Discussão Final, fazendo muitas perguntas. Seus relatórios eram bem estruturados e ricos em relação à descrição do experimento.
3	20	Estudante comprometido, trabalhava de forma colaborativa com seu grupo. Por vezes, mostrava-se desmotivado com a falta de estrutura do laboratório, que não dispunha dos melhores materiais para realizar as investigações. Seus relatórios eram bem estruturados e continham descrições detalhadas do experimento.
4	22	Estudante empenhada e comprometida com a realização de todas as atividades propostas. Trabalhava de forma colaborativa, mas, por ser o integrante mais comprometido de seu grupo, muitas vezes precisava tomar a frente no delineamento experimental e na Discussão Final. Seus relatórios eram bastante ilustrativos do trabalho experimental realizado.
5	19	Estudante bastante extrovertido e brincalhão, tinha uma participação reduzida na tomada de decisão e no delineamento experimental. Visivelmente, as aulas da disciplina eram prazerosas para o estudante. Seus relatórios mostram que o estudante frequentemente estava mais a par do que fora feito do que seus colegas de grupo, apesar de sua aparente displicência.
6	19	Estudante extrovertido e brincalhão, participava pouco na tomada de decisões sobre a montagem do experimento de seu grupo, assim como o Estudante 5. Observamos, no entanto, que esse estudante não se comprometeu tanto quanto seus colegas e, talvez por isso, tenha apresentado dificuldades para interpretar os resultados em alguns dos experimentos realizados.
7	19	Estudante ávido pelo conhecimento, não media esforços para que a sua investigação fosse realizada da melhor forma possível. Geralmente, escolhia as investigações mais “difíceis” de realizar. Foi ao laboratório diversas vezes fora do horário para realizar medidas e seus relatórios eram muito bons. Era um pouco tímido para apresentar os resultados durante a Discussão Final.

Uma das fontes de evidência utilizada foi o caderno de campo. Estando o pesquisador presente em todas as atividades desenvolvidas pelos estudantes durante o horário de aula, foi possível acompanhar algumas discussões entre eles sobre suas estratégias para montar os

experimentos, debates sobre os modelos teóricos de referência que seriam utilizados, bem como a execução dos experimentos em si. Também foi possível capturar algumas das principais dificuldades enfrentadas pelos estudantes ao longo da disciplina, como será discutido mais à frente. Conforme as recomendações de Yin (idem), para cada EM, foi desenvolvido um protocolo de observação (disponíveis nos Apêndices de L a O), com o objetivo de orientar a coleta de informações pelo pesquisador, auxiliando-o a filtrar informações relevantes. Através da presença constante do pesquisador, foi criado um vínculo de confiança com os participantes da pesquisa, que se sentiam à vontade para manifestar suas ideias e esclarecer dúvidas tanto com a professora, quanto com o pesquisador. Entendemos que a criação deste vínculo foi de importância fundamental na medida em que promoveu elevado grau de interação entre os participantes da pesquisa e o pesquisador, facilitando a coleta de dados.

Por exemplo, durante o quarto EM, sobre espectroscopia, o pesquisador registrou no caderno de campo uma discussão entre estudantes de um grupo que pretendiam realizar uma investigação com o objetivo de determinar o espectro de absorção da clorofila. Denominamos essa discussão de “evidência 1”. Nessa conversa, a Estudante 4 relatou ter sentido dificuldade de compreender o princípio de funcionamento do espectrômetro porque o conteúdo de resolução e dispersão não havia sido abordado na disciplina de Física Geral. De fato, o grupo ao qual a Estudante 4 pertencia teve dificuldades de interpretar os resultados empíricos coletados pelo espectrômetro. Essa dificuldade ficou evidente na Discussão Final do EM e em alguns dos relatórios, mostrando que houve estudantes que permaneceram sem entender o princípio de funcionamento do espectrômetro mesmo após as discussões em sala de aula. Assim, o caderno de campo forneceu uma evidência de que os estudantes tiveram persistente dificuldade com o conceito de “medição”, já que a falta de compreensão sobre os pressupostos teóricos que fundamentam a medida no aparelho resultou em dificuldades de interpretação dos resultados. A situação elucidada mostra a importância dos registros no caderno de campo: comparando o planejamento experimental com as investigações realizadas e com as conclusões obtidas (manifestadas nos relatórios e Discussão Final), foi possível identificar e avaliar avanços e retrocessos dos estudantes.

Os relatórios produzidos pelos estudantes foram outra importante fonte de evidência nesta pesquisa. Isso porque um relatório pode ser entendido como uma fonte que condensa o entendimento do estudante sobre o experimento feito. Afinal, a composição de um relatório requer esforço para transformar ideias em palavras. De fato, essas ideias acabam sendo influenciadas pela Discussão Final em grupo, feita uma semana antes da data de entrega do relatório. Nessas discussões, o estudante tem a oportunidade de, se for o caso, redimir seus equívocos e melhorar aspectos que talvez tenham deixado a desejar. Assim, ao analisar o relatório temos uma interpretação consolidada sobre o que ficou para o estudante de toda a atividade. Nos relatórios, buscamos evidências na forma de frases, afirmações ou imagens, que demonstram que o estudante mobilizou conceitos de modelagem em seu desenvolvimento. Por exemplo, em um relatório do Estudante 7, referente ao primeiro EM, constava o seguinte trecho, denominado “evidência 2”:

“No feixe de um laser ideal, toda a intensidade luminosa é distribuída em uma única direção, i.e., independentemente da distância x que se está do laser, a intensidade luminosa deve ser a mesma [...] Para um laser real, não se tem um feixe perfeitamente focalizado, de forma que haverá um afastamento entre os raios de luz supostamente paralelos; logo, a iluminância medida a grandes distâncias do laser pode ser menor do que aquela medida nas suas proximidades.”

Esse excerto é uma evidência de que o primeiro EM foi frutífero para auxiliar o Estudante 7 a refletir sobre a idealização de se considerar que “Lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos”, concepção apontada no Quadro 1. Ainda, do ponto de vista da MDC+, ao usar a expressão “feixe de um *laser* ideal/real”, o estudante mostra que a atividade deu sentido ao conceito de idealização, contribuindo para seu avanço no domínio do campo conceitual da MDC+.

O mesmo tipo de procedimento de compilação foi realizado para as fontes de evidência não escritas, como as entrevistas semiestruturadas (gravação de áudio) e as apresentações durante a Discussão Final (gravação de vídeo); nesses casos, foi feito um trabalho de transcrição das vozes dos participantes. Entendemos que as discussões finais em grupo foram parte importante da análise porque a manifestação espontânea dos estudantes nessa situação se constitui em valiosa fonte de evidência para capturar concepções que, muitas vezes, permaneceriam ocultas na linguagem escrita. A percepção desse tipo de situação só é possível porque as interações instantâneas dos estudantes são capturadas em vídeo.

Um exemplo, denominado “evidência 3”, é o seguinte excerto, extraído da Discussão Final durante o terceiro EM, em que a polarização por absorção foi investigada por um grupo utilizando a lei de Malus como modelo teórico de referência:

Pesquisador: *A luz utilizada por vocês era colimada? Porque no desenho [no quadro branco] parece que a fonte é pontual.*

Estudante 2: *Ah, sim, no sentido de ela ser um feixe... tá [olha para o Estudante 1 em dúvida].*

Estudante 1: *Não era exatamente um feixe.*

Estudante 2: *É, não era exatamente um feixe. Então ele tem sim uma perda.*

O trecho evidencia que os Estudantes 1 e 2 não perceberam um aspecto essencial do modelo teórico de referência: para descrever a perda da intensidade luminosa no processo de polarização por absorção, o feixe que atravessa o polarizador precisa ser colimado. Por conta disso, o delineamento experimental, feito sem esse cuidado, comprometeu a validade da investigação. Assim, pode-se dizer que esse excerto está relacionado com a dificuldade dos estudantes com o conceito de “modelo teórico de referência”. Uma hipótese que poderia explicar o fato dos estudantes não terem se dado conta de que o feixe de luz branca utilizado não era colimado é a sua falta de experiência com os equipamentos do laboratório. Nesse caso em particular, o equipamento utilizado permitia ajustar o ângulo de abertura do feixe de luz projetado.

As entrevistas, realizadas individual e em grupo, também se constituíram em valiosas fontes de evidência. A abordagem dos temas nesses encontros era informal, já que o objetivo era ouvir as

concepções dos estudantes sobre algum evento sem lhes inculcir a preocupação de dar uma resposta “certa” ou “errada”. Todas as entrevistas foram realizadas do meio para o final do semestre, porque a partir desse ponto os estudantes já tinham realizado pelo menos dois EM, estando familiarizados com a metodologia de ensino empregada. As entrevistas tinham o propósito de avaliar concepções dos estudantes sobre modelagem e suas impressões sobre os EM em contrastação com as atividades tradicionais. Para isso, foi criado um guia de entrevista semiestruturada (disponível no Apêndice P), para orientar a ação do pesquisador durante a coleta de dados.

O próximo excerto, denominado de “evidência 4”, é uma transcrição de uma conversa realizada durante uma entrevista em grupo. Na ocasião, o pesquisador fazia menção a um experimento hipotético delineado para investigar um fenômeno. Para averiguar as concepções dos estudantes sobre o processo de contrastação empírica, perguntava-se:

Pesquisador: *A que tu atribuis a diferença entre a predição do modelo e a evidência? O que poderia ser uma fonte dessa diferença?*

Estudante 5: *Provavelmente a gente fez alguma [o estudante usa um palavrão para se referir a algum erro grosseiro].*

Estudante 3: *Eu acho que depende da diferença, também, tipo no experimento que a gente fez [usando os polarizadores], a gente obteve o mesmo formato da curva, só que em vez de ir pra zero...*

Estudante 5: [Interrompendo o Estudante 3] *É, ela ficava transladada pra cima.*

Estudante 3: *É, então essa constante que a gente poderia somar ali seria tipo erro experimental, sei lá.*

Pesquisador: *Então em geral a diferença é devida ao experimentador ou ao equipamento de medida, mas teria alguma outra possível fonte de erro?*

Estudante 5: *Tem as idealizações que a gente fez, mas acho que geralmente não seria tão grande assim o erro.*

Estudante 3: *hmm... Não sei.*

Nesse trecho, o Estudante 3 demonstra entender que diferenças entre predição e evidência têm *origem* no erro experimental, podendo ser “consertadas” adicionando constantes *ad hoc*. Já o Estudante 5, mesmo sem convicção, demonstra, no final de sua fala, entender que as idealizações assumidas na construção do modelo *podem* traduzir-se em diferenças entre predições e evidências. Assim, é possível depreender desse trecho que o Estudante 5 tem melhor compreensão sobre aspectos relacionados ao conceito de contrastação empírica, tendo concepções mais adequadas sobre o processo de modelagem do que o Estudante 3. Ainda, podemos extrair informações sobre as suas concepções sobre o conceito de controle de variáveis, já que a diferença entre predições e evidências decorre também da falta de controle sobre elementos que são desprezados nos modelos. Nesse caso, ambos os estudantes demonstram desconsiderar esse aspecto, atribuindo as diferenças apenas ao “erro experimental” ou às idealizações realizadas na construção do modelo.

Assim procedendo, compilou-se todos os dados coletados em cada uma das fontes de evidência. Ao final desse processo, o pesquisador dispunha de um banco de dados, na forma de planilhas eletrônicas, onde os elementos relevantes para responder às questões de pesquisa foram armazenados.

As etapas seguintes à de compilação foram as de desconstrução e reconstrução dos dados. Durante a desconstrução, separa-se do banco de dados os fragmentos ou pedaços de dados interessantes para serem analisados. Isso é feito por meio da criação de marcadores, que classificam os fragmentos de evidência visando facilitar sua consulta e comparação com outras evidências durante fases posteriores da análise. Nesta pesquisa, cada excerto foi classificado com os seguintes marcadores qualitativos, que indicam: a) o(s) estudante(s) a que o excerto se refere; b) a origem da evidência; c) o EM em questão; d) as concepção e/ou dificuldade da Ótica associada (se existente); e) o(s) conceito(s) da MDC+ a que se referem; e f) tipo de evidência, podendo ser positiva (+), negativa (-) ou confusa (?). Uma evidência foi tomada como positiva (+) quando os excertos indicavam avanço no Campo Conceitual da MDC+ e/ou amenização de concepções e/ou dificuldades típicas da Ótica. Trechos que denotam retrocesso na MDC+ e/ou manifestação de concepções equivocadas foram identificados como negativos (-). Já os excertos contraditórios e/ou de natureza pouco precisa sobre algum desses aspectos foram marcados como confusos (?). O Quadro 7 mostra um exemplo de como as quatro evidências acima mencionadas na fase de compilação foram desconstruídas e marcadas com os rótulos.

Quadro 7 - Ilustração de como as quatro evidências usadas a título de exemplo nesta seção foram trabalhadas durante a fase da desconstrução das evidências. No quadro se destacam os diferentes marcadores usados para classificar as evidências. Os dados foram gravados em uma planilha eletrônica que permite filtrar as informações por colunas.

Evidência	Estudante (s)	EM	Origem	Concepção / Dificuldade da Ótica	Conceito da MDC+	Tipo de evidência
1	4	4	Caderno de Campo	Obtenção do espectro de absorção.	Medição	(-)
2	7	1	Relatório	<i>Lasers</i> emitem raios de luz perfeitamente paralelos	Idealização	(+)
3	1 e 2	3	Gravação da Discussão Final	-	Modelo teórico de referência	(-)
4	3 e 5	3	Entrevista em grupo	-	Contrastação empírica	(?)

Segue do processo de desconstrução a etapa de reconstrução. Nessa fase, os dados são rearranjados para proporcionar outra perspectiva sobre algum aspecto de interesse a ser analisado. Isso foi feito almejando organizar os dados de forma proveitosa para fundamentar conclusões que pudessem dar suporte às proposições teóricas. Segundo Yin (idem), essa fase é determinante no

êxito do pesquisador, cujo trabalho é estabelecer uma narrativa argumentativa, pautada nas evidências construídas, que dê suporte às conclusões obtidas.

A seguir, ilustramos alguns dos processos de reconstrução usados nesta pesquisa. Por exemplo, para avaliar a primeira proposição teórica, buscamos selecionar fragmentos de dados que se referem a concepções e dificuldades típicas da Ótica, ordenando-os por ocorrência no respectivo EM. Nesse processo, criamos uma dimensão de análise que foi útil para averiguar se os EM defrontaram os estudantes com situações que envolvem concepções e dificuldades típicas da Ótica. Um exemplo dessa reconstrução está no Quadro 8, que relaciona as situações fomentadas pelo segundo EM com concepções equivocadas dos estudantes.

Quadro 8 - Fase da reconstrução de evidências. Dados utilizados para avaliar a primeira proposição teórica no segundo EM.

Concepções equivocadas & Dificuldades da Ótica	Situações fomentadas nos EM	EM
<i>“A velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio”.</i>	Para entender como ocorre a propagação da luz em cabos de fibra ótica, investigar a influência de fatores físicos (p. ex., temperatura e comprimento de onda da radiação) no índice de refração de diferentes materiais, por meio de diferentes métodos (p. ex., desvio da luz em prismas e reflexão total da luz).	2
<i>“Estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz”.</i>		

Ao triangular as informações do Quadro 8 com outras evidências (obtidas a partir da reconstrução dos mesmos dados em outra dimensão de análise), tivemos subsídios para entender em que medida o enfrentamento das situações foi frutífero para que os estudantes dessem sentido a conceitos de modelagem científica e de Ótica. Nessa situação, criou-se outros níveis de análise, buscando encadear evidências provenientes de diferentes fontes, como relatórios e gravação da Discussão Final. Yin ressalta que o processo de reconstrução não é linear, ou progressivo, podendo ser repetido quantas vezes for necessário.

Com relação à segunda proposição teórica, podemos ilustrar o processo de reconstrução com outro exemplo. Nessa proposição, buscava-se avaliar de forma mais específica como os EM podem contribuir no domínio, por parte dos estudantes, do Campo Conceitual da MDC+, em particular, dos conceitos de “modelo científico” (MC), “controle de variáveis” (CV) e “evidência experimental” (EE). Por isso, criamos um plano de análise específico, no qual o emprego de conhecimentos relacionados a esses conceitos, em cada EM, pôde ser avaliado para cada estudante. Muitas vezes, percebemos que os estudantes manifestavam tais conhecimentos de forma implícita e entendemos que mesmo nesses casos as evidências devem ser levadas em consideração. Por exemplo, o seguinte excerto do relatório do Estudante 7 é um exemplo de menção implícita a um procedimento de controle de variáveis: *“Após isso, mergulhou-se o prisma em água, fervendo-o por aproximadamente dez minutos, para que o seu interior estivesse uniformemente aquecido”*. O Estudante 7 relata ter aquecido o prisma uniformemente, porém omitiu, ou não achou necessário mencionar, que isso foi feito porque nessa condição o índice de refração era o mesmo em todo o material, suposto

homogêneo. No entanto, pelo conjunto do relatório do estudante fica evidente que a ação foi feita por esse motivo. Após a análise das evidências, cada um dos três conceitos foram rotulados com os seguintes marcadores: ✓ - O EM contribuiu para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+; x –O EM não contribuiu para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+; e (sem símbolo) – O EM contribuiu parcialmente para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+. Por exemplo, para o Estudante 1, o resultado desse processo está condensado no Quadro 9.

Quadro 9 - Fase da reconstrução de evidências. Dados referentes ao Estudante 1, utilizados para avaliar a segunda proposição teórica.

Estudante	Conceito	EM1	EM2	EM3	EM4
1	MC	x	x	✓	
	CV		✓	x	✓
	EE				✓

Na etapa seguinte, denominada interpretação, o pesquisador constrói uma narrativa interpretativa a partir dos dados reconstruídos em seus diversos planos de análise. Essa parte se constitui na parte analítica da investigação. Durante ela, dependendo dos resultados obtidos, o pesquisador pode sentir necessidade de voltar à etapa anterior, desconstruindo e reagrupando os dados novamente. Isso foi feito diversas vezes ao longo da análise. É a partir da análise dos dados que emerge uma conclusão, fundamentada em reflexões do pesquisador sobre os resultados obtidos.

Durante toda a análise de dados, seguindo as recomendações de Yin, buscamos sempre encadear evidências, estabelecendo uma clara vinculação entre elas e as conclusões obtidas. Sempre que possível, também buscamos nos apoiar em mais de um dado para dar suporte a uma conclusão, por isso estabelecemos vários planos de análise, que permitiram realizar a triangulação de evidências. Ainda, o pesquisador buscou se autorregular, atendo-se às fontes de evidências como instrumento para construir conclusões, minimizando interpretações tendenciosas no sentido de dar suporte a uma concepção prévia que não condiz com os dados coletados.

No próximo capítulo apresentamos os resultados da análise dos dados coletados. Em seguida concluimos esse estudo com as considerações finais.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentamos as evidências da investigação realizada, concentrando-nos na análise das proposições teóricas da pesquisa. Na primeira seção, nos debruçamos na primeira questão de pesquisa, mostrando como as evidências empíricas corroboram ou não a proposição teórica dessa questão. Em seguida, na segunda seção, o mesmo é feito para a segunda questão de pesquisa. Por fim, tecemos considerações finais, sintetizando os resultados relacionados com cada questão de pesquisa, levantando também proposições para investigações futuras.

5.1 QUESTÃO DE PESQUISA 1: COMO OS **EM** PODEM CONTRIBUIR PARA QUE OS ESTUDANTES AMPLIEM SEUS DOMÍNIOS DO CAMPO CONCEITUAL DA ÓTICA, FAVORECENDO A AMENIZAÇÃO DE DIFICULDADES TÍPICAS DOS ESTUDANTES NA APRENDIZAGEM DE CONCEITOS FÍSICOS DA ÓTICA?

Proposição Teórica 1: *Os EM desenvolvidos proporcionam aos estudantes situações com potencial para dar sentido aos conceitos do campo conceitual da Ótica, e que favorecem a construção de conhecimentos (conceitos e teoremas) desse campo a partir da mobilização deles no planejamento, execução e análise de experimentos didáticos.*

Conforme apresentado na Seção 2.3, a literatura aponta as principais dificuldades enfrentadas pelos estudantes em tópicos relacionados com a Ótica, sendo que tais dificuldades se manifestam em âmbito geral ou específico.

As dificuldades de âmbito geral se originam em experiências diárias, imprecisões de linguagem, e interações com professores e/ou livros didáticos. As experiências diárias e a linguagem constituem-se em fatores externos ao contexto escolar formal que fomentam concepções sobre tópicos de Ciência. Não foi intenção deste estudo investigar as dificuldades dos estudantes em âmbito geral com a mesma profundidade das dificuldades específicas, mas foi possível identificar avanços na qualidade do discurso científico dos estudantes, especialmente durante as discussões finais de cada EM. Identificamos evidências de que tais experiências fomentaram o uso de uma linguagem mais precisa. Por exemplo, no primeiro EM, as falas dos estudantes eram pontuadas por expressões imprecisas/vagas do tipo “*era uma distância pequena*”, “*tirar o ruído da saída de luz*” e “*o plot ficou com uma curva bem direitinha*”. Ao longo da disciplina, à medida que os estudantes foram se familiarizando com a apresentação dos resultados experimentais para a turma durante a Discussão Final, notava-se um melhora na qualidade de seus discursos, que passaram a contar com

expressões como “*era uma distância desprezível*”, “*colimar o feixe de luz*” e “*o ajuste ficou adequado*”. Apesar disso, as expressões informais na apresentação de resultados não foram eliminadas. De fato, o uso adequado do discurso científico é um fator importante, inclusive, para a superação de concepções alternativas advindas do cotidiano. Nesse sentido, apesar dos EM terem desempenhado um papel importante, não tínhamos expectativas de que em tão pouco tempo seriam superadas todas as dificuldades dos estudantes.

Com relação às dificuldades específicas do campo conceitual da Ótica, foi possível mapear o papel dos EM com mais precisão. De acordo com a Vergnaud (2012), o domínio sobre um determinado campo conceitual se dá pela atribuição de sentido aos conceitos pertencentes a esse Campo; para que isso ocorra com o campo conceitual da Ótica, é essencial que o sujeito enfrente situações que têm potencial para dar sentido a tais conceitos.

Cada EM foi delineado priorizando situações relacionadas com algum conceito específico da Ótica, como foi apontado no Quadro 5 da Subseção 4.1.5, porém uma série de conceitos são mobilizados simultaneamente nos EM. Buscamos então agrupar as dificuldades semelhantes da Ótica em subseções, avaliando, em cada uma delas, as situações fomentadas pelos EM e como elas contribuíram (ou não) para que os estudantes dessem sentido aos conceitos.

5.1.1 Compreensões sobre a interação da luz com a interface entre dois meios

Essa seção abrange os resultados sobre as investigações que envolviam processos de reflexão e transmissão da luz através da interface que separa dois meios. Apresentamos as evidências mais significativas sobre situações que exigiram a mobilização de conceitos de difícil apreensão por parte dos estudantes sobre esse tópico, conforme relatado na literatura.

Entre os estudantes, é comum a crença de que a “*luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas*” (POMPEA *et al.*, 2007). Temos evidência de que os EM 1 e 3 deram sentido ao conceito de reflexão da luz em diferentes materiais. Por exemplo, no primeiro EM, todos os estudantes participantes da pesquisa, exceto o Estudante 6, optaram por investigar a atenuação da luz ao atravessar varetas de vidro. Nessa situação parte da energia luminosa que atravessa a vareta é perdida por reflexão na interface rugosa do vidro¹⁰. Essa perda é detectável pelos instrumentos do laboratório e não passou despercebida pelos estudantes. Isso foi destacado na Discussão Final, quando o Estudante 2 explicou para seus colegas dizendo:

“Quando tu está indo do laser para o vidro, tu tens uma interface, digamos, a mais ali. Então meio que tu está passando, a principio... Não, certamente tem um pouco de ar ali, mas não sei se propriamente interfere, mas o fato maior é trocar de meio,

10 A interface de vidro (seção reta da vareta) era rugosa porque as varetas foram produzidas com uma técnica de corte na qual se parte o vidro após riscá-lo com um pequeno diamante.

eu acho. Então deve ter algum, pode ter algum efeito de reflexão ou algo do gênero, que faça com que esse valor [E_{V_0} ajustado] seja diferente do E_{V_0} do laser [iluminância medida na saída do laser]”.

Esse trecho mostra que o Estudante 2 percebeu que parte da energia luminosa foi perdida no processo de reflexão na interface entre o ar e o vidro rugoso. Também fica claro em sua fala a insegurança na apresentação dos resultados experimentais, bem como o uso de expressões imprecisas/informais, porém, como mencionado anteriormente, esse aspecto melhorou muito ao longo da disciplina, à medida que os estudantes ganharam mais confiança nos EM subsequentes. Os gestos do Estudante 1 durante a Discussão Final, movendo a cabeça durante a fala do Estudante 2, indicam que ele concorda com a fala do Estudante 2, seu colega de investigação. Apesar disso, ele não registrou tal aspecto no seu relatório experimental. Na Discussão Final, as falas dos estudantes 3, 4, 5 e 7, integrantes de um mesmo grupo, mostraram que eles compartilhavam da mesma percepção do Estudante 2. No entanto, apenas a Estudante 4 destacou tal elemento em seu relatório dizendo: *“Quando a luz passa de um meio transparente para outro, ocorre uma reflexão e [...] sua energia incidente sofrerá uma perda. Essa mudança é calculada pela variação da iluminância...”*. Portanto, esses trechos se constituem em evidências de que o EM 1 originou situações que contribuíram para a amenização das dificuldades apontadas, fomentando a atribuição de sentido a conceitos do campo conceitual da Ótica, como o conceito de interação da luz com interfaces. Por meio do EM, foi possível evidenciar que a reflexão da luz é um fenômeno que: i) ocorre mesmo em superfícies transparentes e rugosas; ii) diminui a energia da luz transmitida através da interface.

No terceiro EM (sobre polarização da luz), as atividades propostas envolviam o estudo dos coeficientes de reflexão e transmissão da luz polarizada por absorção ou reflexão. Todo o propósito do EM diz respeito ao cálculo da porcentagem de luz refletida ou transmitida por interfaces, de forma que o equívoco *“Luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas”* não se sustenta. Por exemplo, em uma investigação do EM foi possível identificar as situações em que há (ou não) luz refletida na superfície do acrílico como uma função do ângulo de incidência da luz, como foi destacado no relatório do Estudante 7 sobre esse EM da seguinte forma:

Este experimento, portanto, teve como objetivo investigar a refletividade (porcentagem de luz refletida com relação à luz incidente) de três faixas do visível (vermelho, verde e azul) quando polarizadas paralelamente ao plano de incidência; nessa condição, existe um ângulo em que nada de luz é refletida [referindo-se ao ângulo de Brewster].

No experimento em questão, o Estudante 7 utilizou um modelo baseado nas equações de Fresnel para descrever a intensidade da luz polarizada por reflexão. Porém, o restante dos estudantes participantes da pesquisa optaram por estudar os coeficientes de reflexão e transmissão da luz polarizada por absorção, utilizando como modelo teórico de referência a Lei de Malus. Nesse caso, o enfoque é na transmissão da luz, não na reflexão. Mesmo assim, era necessário levar em

consideração a perda de energia pela luz refletida, como destacado pelo seguinte trecho do relatório do Estudante 2:

Assim, se denotarmos as frações das radiações absorvida, transmitida e refletida por A, T e R, respectivamente, a seguinte equação deve ser verdadeira: $A + T + R = 1$. Neste experimento, não será medida a quantidade de radiação refletida; em vez disso, será utilizado o valor de referência de $R = 0,04 = 4\%$, típico para vários materiais na situação em que a incidência de iluminação é normal ao polarizador.

Os estudantes 1, 4, 5 e 6 também mencionam explicitamente em seus relatórios que parte da energia pode ser refletida por um polarizador por absorção. A Estudante 4 escreve: “*Somando a tentativa de diminuir a reflexão que pode ocorrer no próprio filtro [referindo-se ao polarizador] ...*”. De forma mais completa do ponto de vista da modelagem, o Estudante 6 escreve: “*Outro ponto importantíssimo que precisa ser idealizado é a funcionalidade dos polarizadores, pois ambos precisam ser ideais e perfeitos, para que somente polarizem e não acabem por refletir os feixes incidentes sobre estes*”. Somente o Estudante 3 não escreveu explicitamente em seu relatório que parte da diferença entre a predição da lei de Malus e a evidência experimental pode ser explicada por erros de medida provocados pela reflexão da luz ao atravessar um polarizador.

Além de suas contribuições para que os estudantes amenizassem a crença de que a luz reflete apenas em espelhos ou superfícies lisas, os EM 1 e 3 proporcionaram aos estudantes situações que possibilitaram um enriquecimento dos significados atribuídos por eles aos conceitos de reflexão e refração, pois também contribuíram para a superação de outro equívoco comum, que é a crença de que “*os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes*” (PALACIOS; NIEVAS; CERVANTES, 1989). Nas atividades, os estudantes analisavam a luz transmitida na interface de polarizadores, vidros, acrílicos, etc., porém a luz refletida foi um fator presente e levado em consideração por quase todos os participantes da pesquisa: no primeiro EM, quatro estudantes mencionaram que parte da luz é refletida ao atravessar o meio, enquanto no terceiro EM todos mencionaram.

Existem ainda dois equívocos diferentes, mas relacionados entre si, que os EM deram sentido. Um deles é a crença de que “*um objeto é visível porque luz o ilumina*” (POMPEA *et al.*, 2007) e o outro a concepção de que “*a cor é uma propriedade dos objetos*” (DJANETTE; FOUAD, 2014). Como discutido na Subseção 2.3.2, para a superação dessas crenças, é essencial compreender, entre outras coisas, que a visibilidade de um objeto é determinada pela sensibilidade do olho humano à luz que dele – do objeto – parte. Temos evidências de que os estudantes, por meio do quarto EM, construíram concepções adequadas sobre a natureza da visão. Em todos os relatórios desse EM, foram feitas referências explícitas ao processo de formação da visão por meio das células do olho humano e da interpretação do cérebro sobre a intensidade de sinais elétricos recebidos. Motivados pela pergunta “*como um pixel pode gerar milhões de cores?*”, os estudantes fizeram investigações em que decompunham o espectro de emissão e absorção de diferentes amostras, dando sentido a aspectos associados à formação da visão. Por exemplo, em uma investigação feita pelo Estudante 1,

luz com frequência correspondente à cor fúcsia é decomposta em suas componentes, como mostrado na Figura 9, retirada de seu relatório.

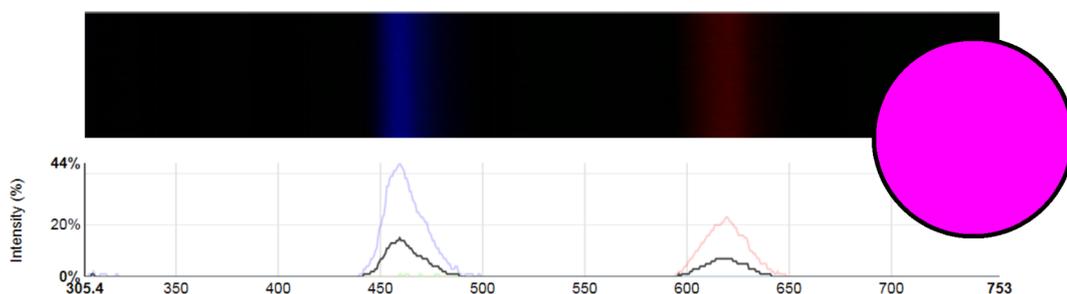


Figura 9 - Espectro de emissão dos pixels de uma tela de celular mostrando a cor fúcsia (indicada pelo círculo à direita da figura). Para gerar essa cor, o pixel ascende as cores azul (pico em 455nm) e vermelha (pico em 620nm) na proporção de intensidade de 2:1, aproximadamente. No eixo vertical mostra-se a intensidade relativa de saturação registrada no CCD da câmera e no eixo horizontal o comprimento de onda da luz, em nanômetros. O Estudante 1 analisou a composição espectral de várias cores.

A intensidade de cada componente (cores) é fundamental para formar a imagem do objeto que se vê. Em seu relatório sobre o experimento, o Estudante 1 explica as medidas:

Vemos que, para a formação dessas cores, é necessário a presença de mais de um pico de intensidade. Isso acontece pois mais de uma cor no pixel é ligada, por exemplo, na cor amarela é ligado a parte vermelha (em maior intensidade) e a parte verde do pixel, deixando a parte azul desligada, essa mistura de cores dá a percepção da cor amarela.

Os outros estudantes fizeram investigações semelhantes ao Estudante 1. Por exemplo, o Estudante 3 pontua que “a partir da união dessas três cores [RGB] com diferentes intensidades se faz possível criar toda a miríade de cores conhecidas”; segundo o Estudante 6, para entender o processo de formação das cores “torna-se inevitável a discussão acerca da natureza dos cones e bastonetes nos nossos olhos e suas implicações na visão”. De fato, a atividade reforça o fato de que a visibilidade dos objetos “é determinada por dois fatores: a frequência [da radiação] e a interpretação humana [cones e bastonetes]”, como aponta a Estudante 4, e que a visão humana é um sentido que pode iludir nossa percepção da realidade. O Estudante 2 percebe isso na sua investigação, onde o espectro de um suposto filtro verde é analisado. Conclui-se que “os filtros coloridos do laboratório não são verdadeiramente monocromáticos, pois permitem a passagem de um intervalo de comprimentos de onda”, como é demonstrado pela Figura 10, retirada de seu relatório.

Os estudantes 5 e 7 também fazem referências explícitas ao papel do olho humano na composição da imagem observada dos objetos. Conclui-se, portanto, que o quarto EM foi frutífero para auxiliar os estudantes a amenizar crenças equivocadas relacionadas ao processo de formação da visão, dando sentido para conceitos envolvidos com a visibilidade dos objetos. Em particular, esse

EM mostrou que a percepção da realidade por meio da visão possui limitações fisiológicas relacionadas à sensibilidade do olho humano.

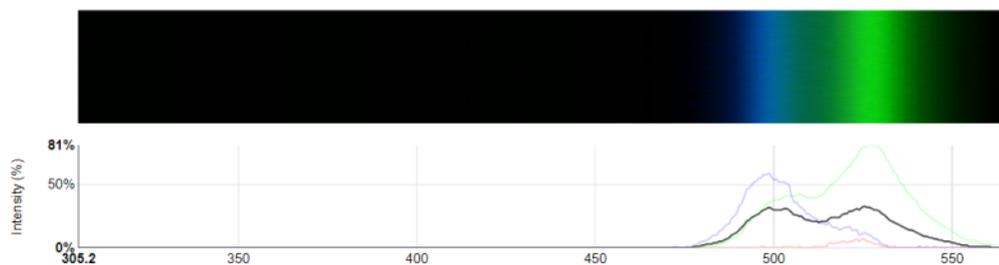


Figura 10 - Espectro de emissão de um filtro verde. Apesar da luz observada ser verde, o espectrômetro revela que uma faixa de comprimentos de onda não correspondente a essa cor está presente. A imagem foi retirada do relatório do Estudante 2.

5.1.2 Compreensões sobre a representação ondulatória e geométrica da luz

Nos EM, os estudantes lidaram com situações em que a luz foi representada por modelos do eletromagnetismo ou da Ótica Geométrica. Apenas o segundo EM não envolveu a utilização explícita da representação ondulatória da radiação. Questões relacionadas à Ótica Geométrica tiveram importância reduzida nos EM. Esses conceitos foram abordados nos experimentos tradicionais da disciplina, como as investigações com lentes e espelhos, que não foram alvo da nossa pesquisa.

O primeiro EM defrontou os estudantes com duas dificuldades comuns da Ótica, a saber: “*Estudantes têm dificuldade em entender as representações didáticas das ondas eletromagnéticas nos livros didáticos*” e “*Estudantes não se dão conta de que os campos elétrico e magnético em uma onda eletromagnética são interdependentes*” (AMBROSE et al., 1999). No questionário sobre a Tarefa Prévia, os estudantes eram indagados se o vetor de Poynting - assim como os campos elétricos e magnéticos da onda - também oscila no espaço e no tempo, podendo apontar em direções diferentes da direção de propagação da radiação. Para terem subsídios para responderem essa e outras questões do questionário, os estudantes tinham que ler um capítulo de um livro didático. Cinco estudantes apresentaram respostas equivocadas ou confusas para essa questão. Por exemplo, o Estudante 3 respondeu no questionário:

Não, o vetor de Poynting se move na direção de propagação da onda, tendo como magnitude a intensidade da onda, que por sua vez depende dos valores máximos dos campos elétricos e magnéticos. Assim, o vetor não oscila, mantendo-se constante na direção da propagação.

Apenas os estudantes 2 e 7 responderam essa questão corretamente. Por exemplo, o Estudante 7 disse: “O módulo do vetor de Poynting oscila no espaço e no tempo, mas a sua direção e sentido são sempre fixos, pois o produto vetorial de E por B sempre aponta na direção de propagação da onda”. Esse tema foi alvo de discussão entre os estudantes e o pesquisador, pois foram obtidas muitas respostas semelhantes à do Estudante 3. Pelas conversas, ficou claro que a maior dificuldade dos estudantes consistiu em entender que o vetor de Poynting pode ser usado para representar a intensidade *média* da energia luminosa que incide em uma determinada área. As dificuldades sobre o conceito de vetor de Poynting permearam os EM, de forma que os estudantes manifestavam suas dúvidas sempre que era necessário medir a intensidade luminosa, e o pesquisador e a professora precisavam abordar novamente o conceito¹¹. Atribuímos a baixa compreensão dos estudantes sobre o conceito de vetor de Poynting ao fato de que a representação ondulatória da radiação é mal compreendida. Assim, esse EM não foi suficiente para defrontar os estudantes com situações que os auxiliem a amenizar suas dificuldades.

Outra característica pouco compreendida sobre a natureza ondulatória da luz é o caráter não local da radiação. De fato, Ambrose *et al.* (1999) identificaram que “*estudantes entendem uma onda plana como tendo uma extensão espacial finita*”. Ou seja, muitos estudantes entendem que a luz existe em um local específico, delimitado, quando na verdade, se estende continuamente pelo espaço. Essa concepção equivocada se constitui em um obstáculo epistemológico que pode impedir o avanço na apreensão de conceitos importantes da Ótica. No terceiro EM, para estudar a interação da radiação eletromagnética com a matéria, exige-se a continuidade dos campos elétrico e magnético na interface que separa os dois meios, isto é, impõe-se as chamadas condições de contorno. Em particular, uma das condições de contorno exige que a componente do campo elétrico paralela à superfície da onda incidente na interface seja igual à componente do campo elétrico paralela à superfície da radiação transmitida através dela. Isso se justifica pelo caráter ondulatório - isto é, não local - da radiação. Nesse ponto, a noção corpuscular da luz não é adequada para entender o fenômeno porque nessa representação o fóton estaria de um lado ou do outro da interface, isto é, não se poderia falar em continuidade das ondas que se propagam nos meios.

Quando perguntados no questionário, todos os estudantes relataram ter compreendido bem as relações, porém os estudantes 2 e 7 procuraram o pesquisador para dirimir dúvidas especificamente sobre as condições de contorno. Isso fez com que o pesquisador questionasse outros estudantes sobre seus entendimentos sobre as relações deduzidas no material suplementar. Como resultado, constatou-se que os outros estudantes, possivelmente, “aceitaram” as condições de contorno, mas não compreendiam o significado físico das relações. Isso foi ao encontro com um resultado da literatura segundo o qual “*estudantes têm dificuldades em utilizar as condições de contorno da teoria eletromagnética nos contextos em que ela se aplica*” (QING, BETHANY & STEVEN, 2018). O Estudante 7 foi o único a mencionar explicitamente em seu relatório que “*na interface entre os dois meios [...] pode-se exigir a continuidade dos campos E e B ...*”, inclusive

11 Na maioria das vezes, percebemos que os estudantes queriam ser lembrados sobre o conceito de iluminância e a sua unidade, lux.

deduzindo as relações necessárias para sua investigação, como mostra a Figura 11, retirada de seu relatório.

$$\begin{aligned} (E_x)_1 &= (E_x)_2 & (\varepsilon_1 E_y)_1 &= (\varepsilon_2 E_y)_2 \\ (B_y)_1 &= (B_y)_2 & \left(\frac{B_x}{\mu_1}\right)_1 &= \left(\frac{B_x}{\mu_2}\right)_2 \end{aligned}$$

Figura 11 - Imposição das condições de contorno explicitadas pelo Estudante 7, em seu relatório.

Podemos dizer que esse EM foi o que mais demandou conhecimentos específicos, tanto da Ótica quanto de teoria eletromagnética. Por conta da limitação de tempo, não foi possível aprofundar discussões sobre essas questões.

No quarto EM, os estudantes realizaram medidas de espectros de emissão e absorção com um espectrômetro caseiro, discutindo os conteúdos de difração em redes, dispersão e resolução. A compreensão sobre a natureza ondulatória da luz era essencial para entender os princípios físicos que fundamentam o funcionamento do espectrômetro utilizado. Porém, temos evidências de que os estudantes tiveram dificuldades em entender a formação do padrão de difração e como ele foi usado para medir o espectro. Nesse EM, os participantes da pesquisa estavam em três grupos: os estudantes 1 e 2 no grupo A, os estudantes 3, 4, 5 e 6 no B e o Estudante 7 no grupo C. O pesquisador fez a seguinte pergunta para cada grupo, durante a Discussão Inicial: “*O espectrômetro foi construído para observar um dos máximos de difração. Vocês sabem dizer qual é e por quê?*”. Sobre essa pergunta, nos grupos A e B, os estudantes declararam não saber; deram respostas equivocadas ou sem convicção. O Estudante 1, por exemplo, acreditava que se observava o máximo central porque esse era o mais intenso (o que é equivocado, porque nessa posição não há separação das componentes do espectro), mas seu colega (Estudante 2) não sabia dar uma resposta; o Estudante 6, um dos três que responderam ao questionário, argumentou que poderia medir em qualquer máximo de difração, mas não sabia dizer qual o espectrômetro usava, assim como seus colegas. No grupo C, somente o Estudante 7 (também respondente do questionário) argumentou corretamente e com convicção que a medida é feita no primeiro máximo de difração porque nesse é possível distinguir as componentes com a máxima intensidade luminosa.

Essa pergunta foi feita porque se notou menor engajamento por parte dos estudantes nesse EM. Isso foi evidenciado já durante a aplicação do questionário sobre a Tarefa Prévia, respondido por apenas três dos participantes da pesquisa (os estudantes 4, 6 e 7). A Estudante 4 relatou no questionário sobre a Tarefa Prévia: “*como o professor de Física Geral 4 não havia ensinado esse capítulo, eu não entendi como chega nas fórmulas de resolução, difração e de redes*”. Os estudantes 6 e 7 disseram ter tido uma compreensão “Boa” dos textos. Quando questionados sobre o motivo de não terem feito a Tarefa Prévia, alegaram: i) sobrecarga de trabalho em outras disciplinas simultâneas; e ii) o conteúdo ainda não tinha sido abordado na aula teórica (em conformidade com o que foi relatado pela Estudante 4). A primeira justificativa é compreensível, pois o quarto EM foi feito no final do semestre, situação em que os estudantes costumam enfrentar muitas avaliações. Já a

segunda revela que os estudantes possivelmente dão mais valor às aulas teóricas, abdicando do protagonismo em seus processos de aprendizagem, delegando esse papel à professora que, de qualquer forma, faria uma revisão sobre as principais dúvidas no início da aula, como de costume.

Essas evidências mostram que a aplicação do EM não foi suficiente para, no grande grupo, dar sentido aos conhecimentos de Ótica Física, em particular a difração em redes, dispersão e resolução. A introdução do conteúdo junto com a utilização do espectrômetro e o *software* possivelmente se constituíram em sobrecargas cognitivas aos estudantes, que precisavam conciliar múltiplas relações e dependências simultaneamente. Esses resultados vão ao encontro da constatação geral de que “*estudantes têm dificuldade em lidar com o modelo ondulatório da luz, e portanto com a Ótica Física*” (AMBROSE et al., 1999).

De maneira geral, concluímos que as evidências coletadas não indicam que os EM foram suficientes para defrontar os estudantes com situações que pudessem agregar sentido a conhecimentos relacionados com a natureza ondulatória da luz.

5.1.3 Compreensões sobre tipos de fonte de luz e sobre características da luz emitida

Nessa subseção, apresentamos resultados sobre os EM que dizem respeito a crenças sobre o tipo de fonte e as características da luz emitida por elas. No laboratório, os estudantes dispunham basicamente das seguintes fontes de luz: *lasers* (gás ou diodo), lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) e velas.

Sobre as características da fonte emissora, e da própria luz, podemos destacar que uma dificuldade típica é a concepção de que “*luz emitida por uma fonte mais potente se propaga por uma distância maior do que luz emitida por uma fonte menos potente*” (YALCIN et al., 2009). No primeiro EM, enfatizava-se que a distância percorrida pela luz no meio, chamada no EM de distância de atenuação D , depende do meio material e do comprimento de onda da luz. Todas as atividades envolviam o cálculo dessa grandeza, mas solicitava-se que os estudantes expressassem seus resultados em termos do coeficiente de atenuação linear μ , por ser o parâmetro mais utilizado para descrever a propagação da luz pela matéria (a distância de atenuação da luz é calculada como o inverso do coeficiente de atenuação linear do meio, que está associado ao comprimento de onda da luz que o percorre, isto é, $D(\lambda) = 1/\mu(\lambda)$).

Temos evidências de que esse EM foi frutífero para auxiliar os estudantes a abrandarem essa dificuldade. Durante as discussões finais os estudantes puderam comparar seus resultados com os de outros grupos, que realizaram a investigação em diferentes meios. Por exemplo, nesse EM foi possível constatar que $D_{ar} > D_{\acute{a}gua} > D_{vidro}$, independentemente da fonte, ou, equivalentemente,

$\mu_{ar} < \mu_{\acute{a}gua} < \mu_{vidro}$. A Figura 12 mostra o quadro branco μ usado pelos estudantes 1 e 2 para expor

sua investigação durante a Discussão Final. Nele é possível ver que os estudantes associam o coeficiente de atenuação da luz tanto ao meio material (vidro, nesse caso) quanto ao comprimento de onda da luz (*laser* de 650 nm).

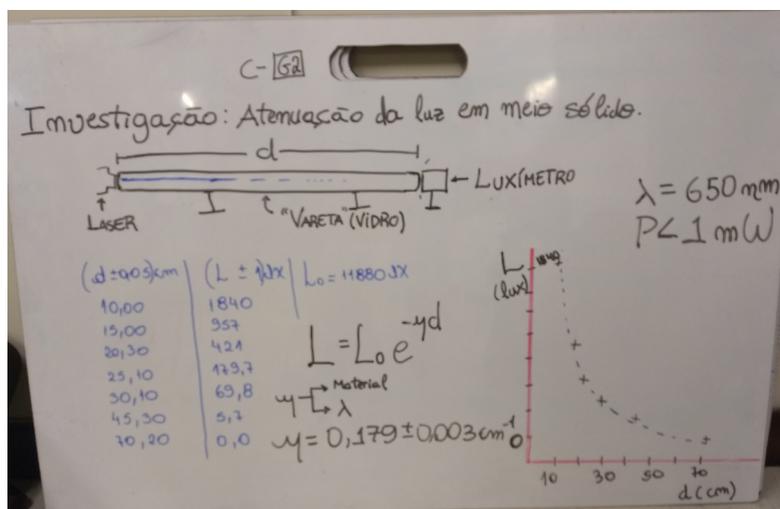


Figura 12 - Quadro branco contendo o resumo da investigação feita pelo grupo que os estudantes 1 e 2 pertenciam. A foto foi tirada após a Discussão Final.

Outros estudantes que fizeram essa mesma investigação também associaram o material e o comprimento de onda da luz à distância de propagação da radiação pela matéria. Por exemplo, em seu relatório, o Estudante 5 afirma que “o coeficiente de atenuação é uma grandeza que depende da composição e outras características do material [...] e do comprimento de onda da luz incidente”; o Estudante 7 relata que: “Essa constante [o coeficiente de atenuação] depende das características moleculares do meio bem como, possivelmente, do comprimento de onda da luz propagante”; o Estudante 3 escreve em seu relatório que o coeficiente de atenuação “dependente do material pelo qual a luz passa”, porém não menciona que também depende do comprimento de onda da radiação. Dois estudantes (4 e 6) não mencionaram explicitamente em seu relatório os fatores dos quais o coeficiente de atenuação linear depende, apesar de não terem discordado dos fatores mencionados pelos colegas durante a Discussão Final. Assim, consideramos que os estudantes construíram o entendimento de que a distância percorrida pela luz na matéria não depende da potência da fonte.

Outra dificuldade comum entre os estudantes é a crença de que “lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos” (POMPEA et al., 2007). Na verdade, considerar a luz emitida pelo *laser* como colimada se trata de uma idealização. Essa idealização pode ser ou não adequada dependendo dos objetivos pretendidos. Notando esse aspecto, o grupo dos estudantes 3, 4, 5 e 7 optou por colimar ainda mais a luz emitida por um *laser*, colocando um diafragma com abertura regulável na frente do *laser*, para realizar seu experimento, conforme mostrado na Figura 13, extraída do relatório do Estudante 3. Os estudantes 3, 4 e 5 escreveram em seus relatórios, ao se referirem às montagens experimentais, respectivamente: “o laser é parcialmente tapado pelo diafragma [...], para assim permitir que o feixe fique mais concentrado, tendo diâmetro menor que o diâmetro dos tubos de

vidro”, “[...] aliado ao controle da abertura do laser feito pelo diafragma, que muda o ângulo sólido da radiação” e “notando que o laser dispersa muito, utilizou-se um diafragma para focalizar o feixe”.

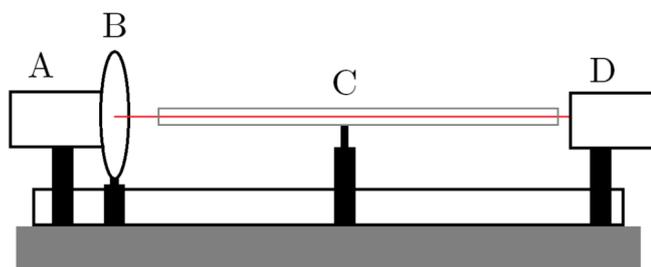


Figura 13 - Esquema de montagem de um experimento realizado pelos estudantes 3, 4, 5 e 7. Em A, o laser; em B, o diafragma; em C, uma vareta de vidro; e em D, o sensor do luxímetro.

A preocupação com a abertura do feixe de *laser* foi tal que o Estudante 7 dedicou um parágrafo de seu relatório para falar especificamente sobre isso:

No feixe de um laser ideal, toda a intensidade luminosa é distribuída em uma única direção, i.e., independentemente da distância x que se está do laser, a intensidade luminosa deve ser a mesma [...]. Para um laser real, não se tem um feixe perfeitamente focalizado, de forma que haverá um afastamento entre os raios de luz supostamente paralelos; logo, a iluminância medida a grandes distâncias do laser pode ser menor do que aquela medida nas suas proximidades.

Os estudantes 1 e 2 realizaram a mesma investigação com as varetas de vidro (Figura 13), mas não usaram um diafragma para colimar a luz, nem mesmo mencionaram nos relatórios que o *laser* usado pode emitir raios de luz que divergem levemente. Após a apresentação, o pesquisador perguntou ao grupo porque eles não colimaram mais ainda a luz do *laser*. De acordo com o Estudante 2, nas pequenas distâncias em que o experimento é feito, não seria necessário colimar a luz do *laser* porque a abertura do feixe é desprezível (o Estudante 1 concordava com essas afirmações). De fato, isso é verdade, como foi constatado com o experimento feito por um outro grupo de estudantes que não integra o caso desta pesquisa. Assim, pode-se dizer que todos os estudantes tinham ciência de que um *laser* emite raios de luz que não são paralelos.

Yalcin *et al.* (2008) também apontam que é comum a crença equivocada de que “*diferentes fontes luminosas não podem emitir o mesmo tipo de luz*”. O quarto EM fomentou situações que puderam ser úteis para que os estudantes confrontassem essa crença. Isso porque os estudantes montavam um espectrômetro que permitia a análise do espectro emitido/absorvido por uma ampla gama de amostras, permitindo inclusive a avaliação da intensidade relativa de cada componente espectral. Por meio do espectrômetro, era possível identificar que algumas fontes luminosas podiam emitir componentes espectrais idênticas à de outras fontes. Por exemplo, podia-se comparar o espectro de duas lâmpadas fluorescentes diferentes, inclusive quando à sua potência, e verificar que tinham o mesmo espectro; podia-se verificar que o espectro de emissão de uma lâmpada

incandescente é semelhante ao do Sol; ou seja, o EM permitia explorar os “tipos de luz” emitidas por diferentes fontes luminosas, comparando-as. Exemplos de fontes luminosas estudadas no EM foram: luz proveniente diretamente do Sol, lâmpadas, *lasers*, gases nobres e telas LED/LCD. Também foi analisada luz branca que atravessava filtros coloridos. Também foi estudado o espectro de absorção da clorofila por meio de diferentes vegetais (azeite de oliva, ervas, folhas de árvores, etc).

Foi dado particular enfoque para as fontes de luz com espectro contínuo (luz branca). Isso porque esse tipo de luz era necessário para gerar espectros de absorção. Nesse EM, os estudantes 3, 4, 5 e 6 mediram os espectros de absorção da clorofila. A Figura 14 ilustra o esquema de montagem usado pelo grupo.

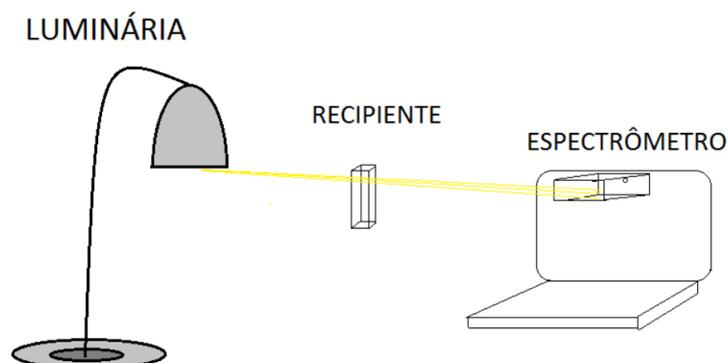


Figura 14 - Imagem extraída do relatório do Estudante 5. A luz de fundo da luminária atravessa um recipiente contendo azeite de oliva antes de chegar no espectrômetro, acoplado a um computador.

Nos seus relatórios, fica evidente a preocupação com o fato de que a luz de fundo usada por eles não ser totalmente contínua. Referindo-se ao espectro supostamente contínuo de uma lâmpada de luz branca usada, a Estudante 4 escreve: “Pela figura, notamos que há picos nas cores verde (500 a 565nm) e no vermelho (625 a 740nm) já o azul (440 a 485nm) quase não aparece. Como a luz branca deve ter um espectro contínuo [...], podemos concluir que a luminária não tem luz branca”, e o Estudante 5 justifica: “Mesmo usando um espectro de fundo não contínuo [...] os resultados concordam com o da literatura”. Nesse caso, o Estudante 5 interpretou de forma parcialmente correta os resultados. Isso porque a lâmpada utilizada emitia pouca luz em uma região já muito absorvida pela clorofila (correspondente à cor azul). Quando questionados, os estudantes disseram que queriam ter usado lâmpada incandescente, que emite um espectro contínuo. Ocorre que, por conta de dificuldades com o uso do *software* do espectrômetro, o grupo teve que realizar a investigação em casa, onde não dispunham de uma lâmpada desse tipo. Assim, os estudantes 4 e 5 têm a percepção de que o espectro contínuo pode ser obtido por diferentes fontes. Por outro lado, os estudantes 3 e 6 demonstraram não ter tido uma boa compreensão sobre a atividade realizada. Seus relatórios mostram que ambos não compreenderam como a calibração do espectrômetro foi feita nem a

necessidade de se utilizar o espectro de luz contínua, como a do Sol, para realizar medições do espectro de absorção.

Outro aspecto do EM que favorece a amenização da crença equivocada de que “diferentes fontes não podem emitir o mesmo tipo de luz” é a própria calibração do espectrômetro, que pode ser feita com o espectro do vapor de mercúrio, diretamente, ou com uma simples lâmpada fluorescente, que contém mercúrio. Na Figura 15, o Estudante 7 explicita o espectro de emissão da lâmpada usada para calibrar seu espectrômetro.

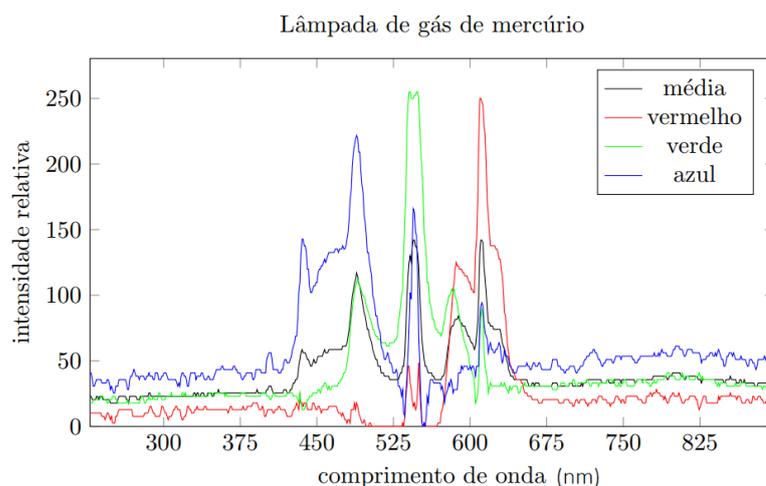


Figura 15 - Espectro de emissão de uma lâmpada de mercúrio usada para calibrar o espectrômetro construído pelo Estudante 7.

Um fato curioso ocorreu com o grupo dos estudantes 1 e 2. Na investigação realizada, buscava-se medir o espectro de emissão de um *laser* de He-Ne do laboratório. Como resultado, o grupo obteve o espectro indicado na Figura 16, retirada do relatório do Estudante 1.

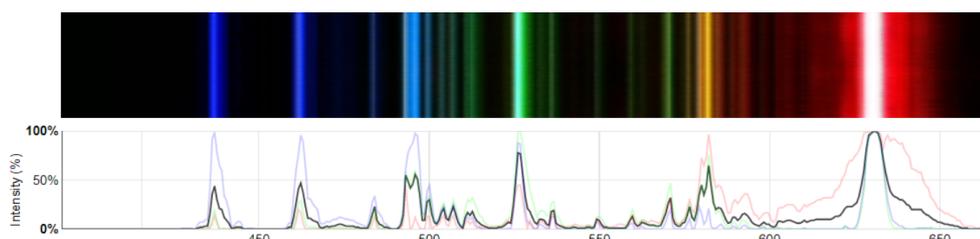


Figura 16 - Espectro de emissão de um laser de He-Ne do laboratório. As linhas fora do pico de emissão do laser (632,8nm) foram uma surpresa para os estudantes e para o pesquisador.

O *laser* de He-Ne tem um pico de emissão em torno de 632,8nm, como indicado na Figura 16. Porém, foi possível identificar várias outras linhas. Essa situação poderia possivelmente desmotivar os estudantes, incentivando-os a escolher outro *laser* ou abandonar a investigação. Em vez disso, mantiveram-se firmes às evidências e buscaram explicar o fenômeno. O Estudante 1 explica em seu relatório que:

Essas linhas podem estar associadas a linhas atômicas de transições na descarga elétrica da mistura de Hélio e Neônio. Para isso, foram utilizados os dados do He I e Ne I obtidos no site NIST¹². Comparando os dados do espectro e os valores obtidos pelo NIST, vemos que há algumas linhas que podem estar associadas ao Hélio e ao Neônio. As linhas em 437,1nm, 462,3nm, 484,0nm e 495,9nm estão associadas ao Ne I. A linha em 582,1nm está associada ao He I. Há algumas linhas que não foi possível identificar a que elemento estão associadas, como as linhas em 526,7nm e 570,9nm.

O Estudante 2 chega à mesma conclusão do Estudante 1, levantando hipóteses adicionais:

Uma possível explicação para isso seria o fato de a transição eletrônica associada a um fóton de 632,8 nm não ser a única que ocorre no interior dos átomos que compõem o sistema He-Ne. Outra explicação seria o surgimento de linhas adicionais devido a algum processo que ocorre na superfície dos polarizadores [usados para diminuir a intensidade do laser, evitando a saturação do sensor CCD da câmera]; se os átomos do material de que é feito o polarizador tivessem seus elétrons excitados a um nível suficientemente alto, haveria a possibilidade de transições atômicas adicionais, correspondentes à emissão de fótons em vários comprimentos de onda distintos.

Os trechos evidenciam que os estudantes associam a luz observada a fontes diferentes da original (gás He-Ne). De fato, confirmamos a possibilidade do fenômeno observado pelos estudantes 1 e 2 com um pesquisador do grupo de *laser* do IF-UFRGS. A explicação para ele é como formulada pelo Estudante 1.

Assim concluímos que, com base nas evidências, o quarto EM foi propício para defrontar os estudantes com situações que evidenciam que diferentes fontes luminosas *podem* emitir o mesmo “tipo” de luz, entendendo-se “tipo” como os comprimentos de onda da radiação.

5.1.4 Compreensões sobre fatores que influenciam a propagação da luz pela matéria

Nesta pesquisa, os EM que envolviam o estudo de fatores que influenciam a propagação da luz pela matéria foram o primeiro (atenuação da luz) e o segundo (reflexão total da luz). No primeiro, o principal fator investigado foi o coeficiente de atenuação da luz; no segundo, foi o índice de refração. Não encontramos na literatura dificuldades relacionadas ao conceito de coeficiente de atenuação da luz. No entanto, identificamos que nenhum estudante interpretou o significado do coeficiente de atenuação da luz de forma completa. Por exemplo, não foi debatido se o material em que a atenuação da luz ocorre pode ser descrito de forma adequada pelo modelo de absorção e espalhamento usado. A interpretação genérica sobre o parâmetro μ foi de que se trata de uma mera “constante de atenuação”. Mais investigações seriam necessárias, entretanto, para averiguar

12 NIST Atomic Spectra Database Lines Form, disponível em: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html, último acesso: 31/03/2021.

quais as concepções dos estudantes sobre esse assunto. A seguir, nos debruçamos sobre as dificuldades relacionadas ao índice de refração do meio.

Segundo Djanette & Fouad (2014), entre os estudantes é comum a concepção de que “a velocidade da luz não tem relação com o índice de refração do meio”. Nas investigações do segundo EM, os estudantes deveriam avaliar a dependência do índice de refração tanto com o comprimento de onda da luz, quanto com outras variáveis físicas do meio, como densidade, temperatura e tipo de material. Percebemos já no questionário sobre a tarefa de leitura que todos os estudantes tinham uma boa compreensão sobre o conceito de refração da luz. Por exemplo, em uma questão em que se pedia para que explicassem conceitualmente a lei de Snell, o Estudante 1 respondeu: “A refração da luz é a mudança de direção que a onda eletromagnética sofre quando passa de um meio para outro. Essa mudança de direção é relacionada a mudança da velocidade da onda ao entrar nesse meio”.

Nesse EM, esperávamos que os estudantes percebessem o impacto de variações do índice de refração no ângulo de reflexão total da luz nos materiais, mas todos acabaram mencionaram explicitamente o impacto na velocidade de propagação da luz no meio. Isso ficou evidente, por exemplo, nos relatórios dos estudantes 3, 4, 5 e 6, que investigaram a dependência do índice de refração da água com a concentração de sal. Segundo o Estudante 3:

A medida que a salinidade da água cresce, o seu índice de refração também [...]. Isso indica que a luz se movimentaria mais lentamente pelo meio com mais sal, o que faz perfeito sentido teórico, já que a luz iria se encontrar com mais partículas, havendo um número maior de choques e colisões, levando a uma maior demora na propagação na água, o que caracteriza menor velocidade de propagação. Assim, sendo [apresenta a fórmula para o cálculo do índice de refração], com c sendo a velocidade da luz no vácuo e v sendo a velocidade no meio, com uma menor velocidade no meio, o índice de refração aumenta.

Os seguintes trechos, retirados, respectivamente, dos relatórios dos estudantes 4, 5 e 6, demonstram que esses estudantes concordam com o Estudante 3: “A adição de soluto aumenta a densidade da água, dificultando a passagem da luz. Isso faz com que a velocidade da luz diminua e o índice de refração aumente, pois os dois são inversamente proporcionais”, “o índice de refração de um meio diz respeito a fração da velocidade da luz no vácuo pela velocidade da luz no meio”, “Como a adição de sal faz a luz demorar mais para se deslocar, o valor do índice deveria crescer”.

Os estudantes 1 e 2 fizeram uma investigação que explorava a dependência do índice de refração com o comprimento de onda da luz e, em seus relatórios, também encontramos referências explícitas ao fato de que a velocidade da luz tem relação com o índice de refração, tendo ambos usado a definição deste parâmetro em termos da razão entre a velocidade da luz no vácuo e no meio material. Nesse EM, aconteceu um fato interessante com o Estudante 7 que será discutido com mais detalhes na Subseção 5.2.3. O grupo desse estudante realizou uma investigação cujo objetivo era determinar a variação do índice de refração do vidro com a temperatura. Na Discussão Final do EM, durante a apresentação dos resultados de seu grupo, o Estudante 7 (visivelmente desapontado) relata ter ficado surpreso que o índice de refração do vidro diminuía com a temperatura. Após a apresentação, o pesquisador perguntou o porquê de sua surpresa. O estudante respondeu que

esperava que o índice de refração aumentasse com a temperatura, já que, segundo ele, a agitação térmica das “moléculas” seria maior, dificultando a passagem da luz, diminuindo sua velocidade de propagação no meio. Essa explicação parece ter raízes na eletrodinâmica, onde tipicamente se argumenta que o aumento da resistência elétrica com a temperatura se deve à agitação térmica dos átomos que compõem a resistência. No entanto, apesar da explicação dada pelo Estudante 7 ser lógica, ela é equivocada, pois existem vidros cujo índice de refração aumenta com a temperatura e vidros que diminuem esse valor. Mesmo considerando a situação ocorrida com o Estudante 7, as evidências mostram que o EM foi frutífero para expor todos os estudantes participantes da pesquisa a situações que refutam a concepção de que “a velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio”, já que as explicações dos estudantes se basearam fundamentalmente no índice de refração do meio.

Encerramos analisando uma dificuldade comum relatada por Perales, Nieves & Cervantes (1989), segundo a qual “estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz”. No segundo EM, os estudantes podiam avaliar a dispersão da luz branca em um prisma, calculando o índice de refração como função do comprimento de onda (relação de dispersão). Dentre os participantes da pesquisa, apenas os estudantes 1 e 2 realizaram essa investigação, então nossos resultados são limitados. O experimento está representado na Figura 17, extraída do relatório do Estudante 1.

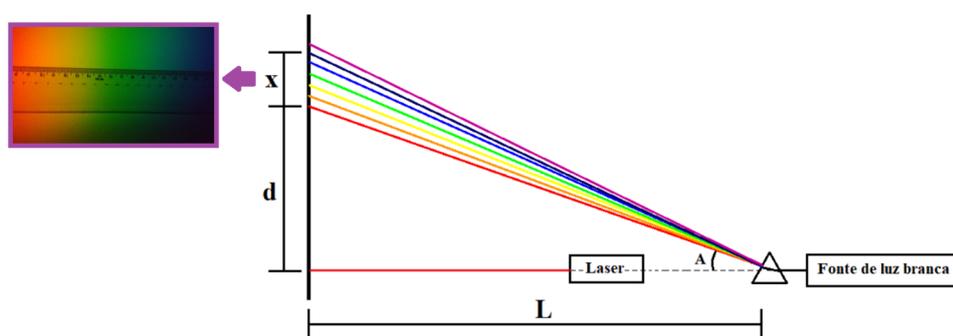


Figura 17 - Esquema usado pelo Estudante 1 para obter uma relação de dispersão para o material do qual o prisma é feito. A posição aproximada de cada cor era medida com uma régua.

No experimento, os estudantes 1 e 2 associaram o grau de deflexão da luz ao atravessar o prisma com o seu comprimento de onda, dando sentido ao conceito de dispersão. De fato, o Estudante 2 escreve em seu relatório: “Neste experimento, a determinação do índice de refração n de um prisma para diferentes comprimentos de onda ocorrerá pela medição do ângulo de desvio para cada uma das cores do arco-íris: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta”. Através das relações provenientes do modelo do prisma, foi possível associar diretamente o índice de refração de cada comprimento de onda, como se mostra na Figura 18, também extraída do relatório do Estudante 2.

Interface	λ (nm)	n
Início do vermelho	740	1,6155
Laser de 670 nm	670	1,6269
Vermelho/Laranja	620	1,6226
Laranja/Amarelo	590	1,6261
Amarelo/Verde	570	1,6312
Verde/Azul	500	1,6362
Azul/Anil	440	1,6405
Anil/Violeta	420	1,6436
Fim do violeta	380	1,6538

Figura 18: Tabela mostrando a relação de dispersão obtida como resultado experimental em uma das investigações no segundo EM.

Para interpretar seus dados, ambos os estudantes realizaram ajustes com base em modelos empíricos sugeridos no EM. O Estudante 1 escreve em seu relatório: “Por fim, será utilizada a equação de Cauchy para observar a relação entre o comprimento de onda e o índice de refração. Essa equação foi determinada por Augustin-Louis Cauchy em 1836 de forma empírica”. A Figura 19 mostra o quadro apresentado pelo grupo desses estudantes durante a Discussão Final.

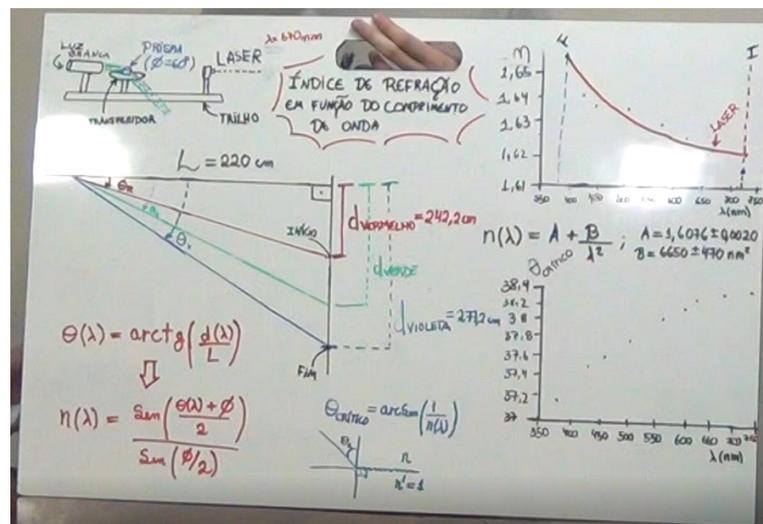


Figura 19 - Apresentação da investigação realizada pelos estudantes 1 e 2 sobre a dispersão da luz em prismas. No quadro é explicitada a relação de dispersão usada para ajustar os dados.

Apesar das evidências indicarem que os dois estudantes deram sentido ao conceito de dispersão, não podemos generalizar essa conclusão para o resto dos estudantes, que fizeram outras investigações não relacionadas de forma específica a essa dificuldade.

5.1.5 Resposta à primeira questão de pesquisa

Nas últimas subseções, nos concentramos em apresentar as situações presentes nos EM que demandavam a mobilização de conceitos que são, conforme a literatura, de difícil apreensão por parte dos estudantes. Analisamos em que medida os EM foram frutíferos, em cada situação, para auxiliar os estudantes a mitigar essas dificuldades. O Quadro 10 resume concepções equivocadas mais comuns dos estudantes e as situações que os auxiliaram a amenizá-las. Pelas evidências apresentadas nas subseções anteriores, os EM contribuíram para que todos os participantes da pesquisa amenizassem dificuldades relacionadas com as seguintes concepções equivocadas: "um objeto é visível porque luz o ilumina" , "a velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio", "luz emitida por uma fonte mais potente viaja uma distância maior do que luz emitida por uma fonte menos potente".

Quadro 10 - Situações fomentadas pelos EM que contribuem para a amenização de dificuldades típicas do campo conceitual da Ótica.

EM	Situações fomentadas nos EM	Concepções relacionadas com dificuldades típicas sobre Ótica
1	Para compreender os efeitos nocivos da poluição nos oceanos, investigar os processos que podem ser responsáveis por atenuar a luz nos diferentes meios materiais, levando em consideração a geometria da fonte luminosa.	<i>"Luz emitida por uma fonte mais potente se propaga por uma distância maior do que luz emitida por uma fonte menos potente"</i> .
		<i>"Lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos"</i> .
		<i>"Luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas"</i> .
2	Para entender como ocorre a propagação da luz em cabos de fibra ótica, investigar a influência de fatores físicos (p. ex., temperatura e comprimento de onda da radiação) no índice de refração de diferentes materiais, por meio de diferentes métodos (p. ex., desvio da luz em prismas e reflexão total da luz).	<i>"A velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio"</i> .
		<i>"Estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz"</i> .
3	Para determinar a condição de visibilidade de objetos submersos na água, estudar os fatores que influenciam os processos de transferência da energia da luz polarizada e não-polarizada na interface entre dois meios, em diferentes materiais.	<i>"Os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes"</i> .
		<i>"Luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas"</i> .
4	Para entender o funcionamento das telas de computadores e celulares, estudar o processo de formação das cores e o espectro de emissão e absorção de diferentes amostras por meio de um espectrômetro.	<i>"Um objeto é visível porque luz o ilumina"</i> .
		<i>"Cor é uma propriedade dos objetos"</i> .
		<i>"Diferentes fontes luminosas não podem emitir o mesmo tipo de luz"</i> .

Dentre os sete participantes, seis não demonstraram evidências de que compartilham os seguintes equívocos comuns: “*lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos*”, “os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes”, “luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas”.

Ainda, cinco participantes construíram concepções adequadas referente à crença equivocada de que “diferentes fontes luminosas não podem emitir o mesmo tipo de luz”. Sobre a dificuldade dos estudantes em “compreender o conceito de dispersão da luz”, podemos dizer que, entre os sete participantes, apenas dois estudantes optaram por realizar a investigação que demandava o conceito de dispersão, mas as evidências mostram que ambos atribuíram significado adequado do ponto de vista científico ao conceito de dispersão.

No entanto, algumas concepções e crenças não foram confrontadas de forma significativa nos EM. Por exemplo, as evidências mostraram que apenas dois estudantes compreenderam e conseguiram operacionalizar o conceito de vetor de Poynting, o que possivelmente se deve ao fato de que “estudantes têm dificuldade em entender as representações didáticas das ondas eletromagnéticas nos livros didáticos” e que “estudantes não se dão conta de que os campos elétrico e magnético em uma onda eletromagnética são interdependentes”, já que essa grandeza deriva da representação ondulatória da luz. Ainda, a constatação de que “estudantes têm dificuldades em utilizar as condições de contorno da teoria eletromagnética nos contextos em que ela se aplica” foi confirmada pelas evidências, já que cinco estudantes possivelmente permaneceram sem compreender as condições de contorno após a realização do terceiro EM.

Assim, com base nas evidências apresentadas, podemos concluir que, de forma geral, exceto para as interpretações ondulatórias da luz, os EM foram uma metodologia de ensino que auxiliou os estudantes a darem sentido a conceitos que são, tipicamente, de difícil apreensão. Por conta disso, consideramos que a primeira proposição teórica foi parcialmente corroborada.

5.2 QUESTÃO DE PESQUISA 2: COMO OS **EM** PODEM CONTRIBUIR PARA QUE OS ESTUDANTES DEEM SENTIDO A CONCEITOS DA MDC+, EM PARTICULAR AOS DE MODELO CIENTÍFICO, CONTROLE DE VARIÁVEIS E EVIDÊNCIA EXPERIMENTAL?

Proposição Teórica 2: Durante o desenvolvimento de um EM, os estudantes enfrentam situações que possibilitam que eles: i) deem sentido a conceitos da MDC+; e ii) *avancem gradualmente em seus domínios do campo conceitual da MDC+*.

Cada EM demandava a mobilização de diferentes modelos teóricos de referência, ou seja, **modelos científicos (MC)**, construídos por meio de idealizações. Para realizar uma investigação empírica, esperava-se que o estudante adotasse um MC e realizasse procedimentos de **controle de**

variáveis (CV) que refletissem as idealizações assumidas no seu processo de construção. **Evidências experimentais (EE)** eram então construídas a partir de dados coletados em experimentos, sendo preparadas para serem contrastadas com predições apoiadas no modelo de referência da investigação. O quarto EM, cujo conceito privilegiado é o de “medição”, foi o único em que os estudantes não compararam predições de modelos com evidências, já que a atividade era centrada na obtenção do espectro de amostras.

Nas próximas subseções evidenciamos as situações, propostas nas atividades com os EM, que contribuiriam para que os estudantes dessem sentido aos conceitos de MC, CV e EE. Para facilitar a avaliação da proposição teórica formulada, apresentaremos os resultados separados por conceito da MDC+ investigado, descrevendo, em cada EM, como ele foi mobilizado pelos estudantes.

5.2.1 O papel dos modelos científicos nas investigações empíricas

Para entender como os estudantes mobilizaram conhecimentos relacionados ao conceito de MC em suas investigações, buscamos responder às seguintes questões sobre as ações dos estudantes nos EM: a) a investigação realizada foi pautada por algum modelo de referência?; b) foram explicitados os pressupostos teóricos e domínio de validade do modelo? Entendemos que as situações fomentadas por um EM dão sentido ao conceito de MC quando o estudante adota, de forma consciente e intencional, um modelo teórico de referência para guiar o processo investigativo, desde o planejamento, execução e análise dos dados. Por isso, esperamos observar referências explícitas aos modelos subjacentes à investigação. Isso ocorre, por exemplo, quando o estudante justifica a escolha de um modelo com base nos referentes do problema investigado; quando ajusta uma equação do modelo teórico aos dados experimentais. A seguir, apresentamos os resultados para cada EM.

No primeiro EM, o fenômeno da atenuação da luz pela matéria foi investigado. Para isso, expandiu-se o modelo de propagação da luz no vácuo por meio da lei de Beer-Lambert. A partir daqui, passamos a chamar a Lei de Beer-Lambert como o MC de referência da investigação. Para expandir o modelo, admitiu-se os seguintes pressupostos teóricos:

- 1) A reemissão de luz por parte do meio material não contribui para o feixe original;
- 2) A luz espalhada pelo meio não volta a contribuir com o feixe original;
- 3) O meio material é homogêneo;
- 4) A fonte emissora de luz é pontual ou colimada.

Assim, esperava-se que os estudantes utilizassem a Lei de Beer-Lambert para avaliar a atenuação da luz pela matéria. Para isso, os estudantes incidiam luz em um meio material e mediam a iluminância a diferentes distâncias da fonte emissora de luz.

Neste EM, todos os estudantes, exceto o 6, utilizaram a Lei de Beer-Lambert como modelo teórico de referência para apoiar suas investigações, apresentando explicitamente a equação que representa o modelo. O Estudante 6 fez uma investigação em que buscava analisar a atenuação da luz na água com sal como uma função da concentração. Possivelmente, no entanto, o estudante confundiu o significado do coeficiente de atenuação, como fica evidente pela sua argumentação no relatório:

Para tratarmos do embasamento teórico do atual experimento, faz-se necessária a introdução da fórmula de Beer-Lambert: $I = I_0 e^{-\mu x}$ (Eq. 1). Uma vez que esta representa a atenuação da luz com o decaimento exponencial da luminosidade (I) em função do meio (μ) e da distância percorrida pela luz (x) nesse meio. Particular deste experimento, considerou-se que μ é constante e variou-se a concentração (C), ajustando-se então a equação (1) nos moldes do experimento, temos: $I = I_0 e^{-kc}$ (Eq. 2). Sendo k a constante do meio e c a variação da concentração, [...].

Uma vez que a concentração de sal na água varia, não é concebível que o coeficiente de atenuação permaneça constante, como ele supõe ao admitir que k e c sejam constantes. Além disso, não fica definido o que é a “constante do meio”. A equação (2) do relatório do estudante foi usada para ajustar uma curva aos dados na investigação, conforme mostra a Figura 20.

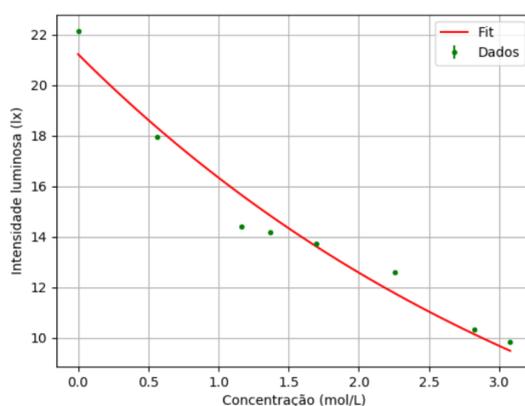


Figura 20 - Ajuste da equação (2) sendo c o parâmetro de ajuste. Gráfico retirado do relatório do Estudante 6.

O estudante não foi capaz de interpretar o significado físico da constante k , utilizando inclusive unidades incompatíveis. Quando perguntado sobre os resultados, o Estudante 6 disse que se confundiu e acabou trocando de grupo de trabalho após esse EM.

Como dito anteriormente, o restante dos participantes da pesquisa utilizaram a Lei de Beer-Lambert, sendo que os estudantes 1, 2, 3 e 5 deduziram o modelo em seus relatórios. Em todos os casos, os alunos utilizaram o modelo que representava a atenuação de um feixe colimado. Porém, mesmo que a maioria dos estudantes tenha operacionalizado a Lei de Beer-Lambert, ajustando seus parâmetros aos dados e calculando o coeficiente de atenuação dos materiais investigados, nenhum deles explicitou seu domínio de validade, as hipóteses subjacentes à sua construção ou, se o fizeram,

apenas de forma incompleta. Por exemplo, o Estudante 1 não menciona o fenômeno do espalhamento da luz pela matéria, restringindo-se à absorção, como expresso em seu relatório: “Conforme os fótons passam pelo meio, alguns deles são absorvidos, portanto, diminuindo a intensidade, causando a atenuação da luz”. Os Estudantes 3 e 7 também dão a entender reiteradamente em sua escrita que o coeficiente de atenuação descreve apenas a absorção, como fica evidente nos seguintes trechos de seus relatórios, respectivamente: “Mais especificamente, a atenuação causada pelo meio, possibilitada pela absorção dos fótons incidentes nos átomos do material [...]”, “[...] μ é o coeficiente de absorção que depende das características do meio”. De fato, o Estudante 3 responde no questionário sobre a Tarefa Prévia que os mecanismos responsáveis pela atenuação da luz seriam a “reflexão e a absorção”, ignorando o fenômeno do espalhamento.

O Estudante 7 também responde de forma equivocada ao questionário, afirmando que o coeficiente de atenuação representa a fração de energia absorvida por unidade de comprimento. Os estudantes 2, 4, 5 e 6 não fizeram nenhuma menção aos pressupostos teóricos ou domínio de validade dos modelos em seus relatórios. Entretanto, no questionário da Tarefa Prévia, os estudantes 4 e 6 revelam algumas de suas compreensões sobre o coeficiente de atenuação. A Estudante 4 dá a entender que o coeficiente de atenuação é uma grandeza que pode ser obtida unicamente a partir de dados experimentais quando afirma que “o coeficiente de atenuação é obtido pelo ajuste linear da dependência do logaritmo da intensidade com a espessura do material absorvedor”. Já o Estudante 6, de forma compatível com seu baixo aproveitamento da atividade, responde que a “transferência de calor” seria um mecanismo responsável pela atenuação da luz.

Assim, concluímos que, nesse EM, o Estudante 6 teve significativas dificuldades para utilizar um modelo que guiasse o processo investigativo. Isso ficou claro porque o estudante não foi capaz de operacionalizar o MC de referência na sua investigação e porque não foram explicitados os pressupostos teóricos do modelo utilizado. O restante dos estudantes, apesar de terem adotado um modelo compatível com as necessidades das investigações realizadas, tendo conseguido operacionalizar as representações para fins investigativos, também não explicitaram conhecimentos relacionados ao conceito de MC, já que os pressupostos teóricos que fundamentaram a construção do modelo utilizado não foram enunciados. Por conta disso, não foi possível concluir se algum estudante compreendeu o caráter representacional da Lei de Beer-Lambert, bem como seu domínio de validade. Assim, entendemos que o primeiro EM teve baixa contribuição para que os estudantes explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+.

No segundo EM, investigou-se a dependência do índice de refração dos materiais com diferentes parâmetros físicos, como a concentração de soluto do meio, temperatura e comprimento de onda da luz. Para isso, esperava-se que os estudantes utilizassem como MC de referência a conhecida Lei de Snell ou um modelo que descreve a deflexão da luz por prismas. Para construção de tais modelos, assume-se algumas idealizações, como:

- 1) O meio é dielétrico, isotrópico e linear;
- 2) A luz é monocromática;

3) A superfície dos materiais em que se incide a luz é perfeitamente plana.

Assim, os estudantes podiam escolher um dentre esses dois MC para delinear experimentos que pudessem responder às questões de pesquisa formuladas.

Nesse EM, todos os estudantes foram capazes de operacionalizar o MC de referência, medindo e calculando grandezas e parâmetros úteis para conduzir seus experimentos. Os estudantes 1 e 2 usaram o modelo do prisma para investigar a relação de dispersão da luz branca, conforme explícito na Figura 21.

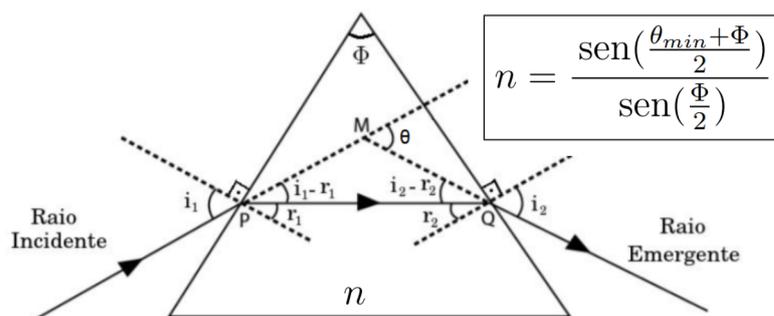


Figura 21 - Objeto-modelo representando o desvio da luz no prisma e a equação que relaciona os ângulos de incidência e de refração no prisma construída no modelo. Para calcular o índice de refração, é preciso que o ângulo de desvio formado pelo “Raio Emergente” seja mínimo, isto é, $i_2 = \theta_{min}$. A imagem, proveniente do material suplementar, foi usada pelo Estudante 2 em seu relatório.

Já os estudantes 3, 4, 5 e 6 utilizaram a lei de Snell para estimar a mudança no índice de refração da água em função da contração de sal. O Estudante 7 e seu grupo também usaram o modelo do prisma, mas para avaliar a variação no índice de refração com a temperatura.

Entretanto, como no primeiro EM, poucos estudantes explicitaram as hipóteses e as simplificações da realidade admitidas na construção dos modelos utilizados, ou seu domínio de validade. Destacaram-se nesse aspecto os estudantes 4, 6 e 7. A Estudante 4 justifica seu modelo pelo Princípio de Fermat:

A Lei de Snell é tida como um caso limite e é generalizada para caracterizar a trajetória de um raio monocromático que atravessa meios transparentes de índice de refração diferentes. A dedução para chegar nessa generalização segue o Princípio de Fermat [...]. O Princípio de Fermat nos ensina que a luz percorre o caminho que proporciona o menor tempo entre dois pontos.

No material suplementar disponibilizado aos estudantes (vide Apêndice), a dedução da lei de Snell é feita de forma diferente, assumindo os pressupostos acima elencados e usando a Teoria Eletromagnética. Porém, mesmo seguindo um caminho diferente, a Estudante 4 se preocupou em justificar os princípios que sustentam seu modelo. O Estudante 7 também se preocupa com esses aspectos, como é possível constatar no seguinte trecho de seu relatório:

Algumas considerações quanto ao modelo teórico [...] devem ser feitas: a equação (1) [referente ao modelo do prisma] vale para uma superfície perfeitamente plana e homogênea, dielétrica, sujeita a um estresse mecânico constante, e para um feixe de luz monocromática; assim, imperfeições na superfície causam espalhamentos da luz em direções variadas, bem como uma luz policromática acaba sofrendo dispersão [...].

O Estudante 6 também mencionou as idealizações necessárias para construir o modelo usado em sua investigação: *“Para simplificar os cálculos, são adotadas algumas hipóteses como: superfícies perfeitamente planas e dielétricas, temperatura e stress mecânico constantes. Quanto a hipótese da luz monocromática e do material homogêneo [...]”*. Pelo trecho, é possível constatar que o Estudante 6 entende que o papel das idealizações na construção de um modelo é o de “simplificar os cálculos”, o que não é inteiramente verdade. Por exemplo, considerar o meio dielétrico facilita os cálculos; porém, considerá-lo não-homogêneo torna praticamente impossível tratar o problema, pois teríamos que conhecer particularidades referentes à estrutura molecular do material (nesse caso, acrílico). A preocupação do Estudante 6 de destacar as simplificações consideradas, no entanto, provavelmente é decorrente dos diversos comentários da professora e do pesquisador dirigidos ao seu primeiro relatório, alertando-o para os problemas de não se compreender com clareza as idealizações assumidas na construção do MC.

No seguinte excerto, o Estudante 2 explica um domínio de validade da Lei de Snell: *“em uma interface entre dois materiais com índice de refração distintos, um raio incidente sofre refração, alterando sua trajetória”*, ou seja, só há refração nas situações em que os meios possuem índices de refração diferentes. Porém, o estudante não explicita as idealizações feitas sobre os meios onde a refração ocorre. O fato de que a refração da luz ocorre apenas em meios com índice de refração distintos é uma consequência de tais pressupostos assumidos na construção do modelo. De forma semelhante, o Estudante 3 afirma que: *“o valor limite que o ângulo refratado assume é de 90°”*. Os estudantes 1 e 5, por outro lado, não mencionaram quaisquer desses aspectos; apenas utilizaram o(s) modelo(s) sem maiores preocupações em defini-los. Talvez por um deslize de escrita, o Estudante 5 tenha se equivocado ao dar a entender que a refração ocorre *sempre* que a luz atravessa dois meios: *“Quando um Raio de Luz atravessa a interface plana de fronteira entre dois meios distintos, uma parte é Refratada [...]”*; conforme o Estudante 2 menciona, isso só ocorre se os meios tiverem diferentes índices de refração. Quando perguntados sobre essa Lei no questionário da Tarefa Prévia, nenhum desses estudantes (1, 2, 3 e 5) explicou as idealizações assumidas, ou seu domínio de validade.

Concluimos, portanto, os estudantes 4, 6 e 7 mobilizaram explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de MC, de forma que esse EM auxiliou esses estudantes a avançarem no domínio do conceito de MC. Esses estudantes adotaram um MC compatível com as investigações realizadas e explicitaram, mesmo que de forma precária, alguns dos pressupostos que fundamentam sua construção (no caso da Estudante 4, esse pressuposto se tratava de um “princípio”). Já os estudantes 2 e 3, apesar de terem utilizado modelos para guiar suas investigações, não explicitaram as simplificações da realidade assumidas no processo de construção dos modelos, limitando-se a

explicar as situações em que o modelo se aplica, isto é, seu domínio de validade. Por conta disso, entendemos que esse EM contribuiu em parte para auxiliar esses estudantes explicitassem conhecimentos relacionados com o conceito de MC. Por fim, as evidências mostram que o EM teve pouca contribuição para auxiliar os estudantes 1 e 5 a explicitarem conhecimentos relacionados ao conceito de MC. Esses estudantes utilizaram as representações matemáticas dos modelos de referência sem refletir sobre as idealizações e o domínio de validade de tais modelos.

No terceiro EM, foi investigada a reflexão e transmissão da luz polarizada na interface entre dois meios. Para isso, foram utilizados como MC de referência a conhecida Lei de Malus ou um modelo de reflexão e transmissão da luz baseado nas equações de Fresnel. Para construir tais modelos, foi preciso assumir alguns pressupostos teóricos, como:

- 1) A luz incidente na interface é linearmente polarizada;
- 2) Os meios são dielétricos, isotrópicos e lineares;
- 3) O polarizador é ideal.

Nesse EM, todos os estudantes adotaram MC compatíveis com os objetivos de sua investigação, não tendo sido observado dificuldades com relação aos aspectos operacionais. Por exemplo, todos os estudantes, exceto o 7, realizaram investigações para avaliar a intensidade da luz polarizada transmitida por polarizadores, utilizando a lei de Malus como MC de referência. Curiosamente, somente os estudantes 1 e 2 calcularam o coeficiente de transmissão pela relação sugerida ($T = \cos^2 \theta$); os outros estudantes expressaram os resultados em termos da iluminância ($E_V = E_{V_0} \cos^2 \theta$). O Estudante 7 investigou a intensidade da luz polarizada refletida pelo acrílico como uma função do ângulo de incidência, utilizando o modelo de reflexão da luz baseado nas equações de Fresnel.

Os estudantes 3 e 4 não mencionam as idealizações ou o domínio de validade do modelo usado e utilizaram as seguintes palavras, respectivamente: “os polarizadores não deixavam a iluminância na metade do seu valor inicial, o que gerou grande ceticismo perante a instrumentação” e “o valor da intensidade a 90° [isto é, dois polarizadores com eixos de transmissão cruzados] deveria ser zero”. Esses excertos são evidências de que existe certa dificuldade em perceber que a Lei de Malus se pronuncia sobre uma entidade idealizada. Essa entidade é o objeto-modelo “polarizador ideal”, isto é, um polarizador que absorve completamente a componente do campo elétrico na direção perpendicular à direção de polarização, algo que, na realidade, não existe. O Estudante 6 possui dificuldades semelhantes aos estudantes 3 e 4, como fica evidente pelo excerto retirado de seu relatório: “Outro ponto importantíssimo que precisa ser idealizado são os polarizadores, pois ambos precisam ser ideais e perfeitos”. Percebe-se ainda, pelo trecho “Para a adequação correta do uso da Lei de Malus, se faz necessária a idealização da luz em uma forma monocromática”, que o Estudante 6 não se apropriou da Lei de Malus corretamente, porque a hipótese de luz monocromática não é feita no processo de construção desse modelo.

Os estudantes 1, 2 e 5 explicitaram a natureza ideal do polarizador e analisaram esse aspecto criticamente em seus relatórios. Isso pode ser constatado nos seguintes excertos retirados

de seus relatórios, respectivamente: “*Também é de suma importância o fato de que o polarizador não é perfeito [...]*”, “*Entretanto, o polarizador real não corresponde ao idealizado, pois também há o fenômeno da reflexão da radiação incidente*”, “*Possivelmente esta luz adicional deve-se ao fato de o polarizador não ser ideal, i.e, não polariza totalmente a luz e não a lineariza perfeitamente, pode ter uma reflexão interna [...], entre outros*”. O Estudante 7, além de operacionalizar o modelo de reflexão da luz polarizada, mostra conhecer as idealizações assumidas em sua construção, bem como que as situações em que o modelo se aplica, como ele explica em seu relatório:

Quando as constantes ϵ e μ [permissividade elétrica e permeabilidade magnética] de um meio dielétrico não apresentam variações em função da direção, i.e., movendo-se dentro do meio, não é possível saber a direção do movimento apenas analisando as variações dos valores de ϵ e μ , diz-se que tal meio é isotrópico; no desenvolvimento a seguir, supor-se-á que os meios são homogêneos e isotrópicos. Além disso, considerar-se-á que o meio tratado é linear, i.e., os vetores de polarização e magnetização dependem linearmente dos campos \mathbf{E} e \mathbf{B} , respectivamente.

Portanto, as evidências indicam que esse EM contribuiu para que os estudantes 1, 2, 5 e 7 dessem sentido ao conceito de MC, já que esses estudantes, além de utilizarem modelos compatíveis com suas investigações, o fazem explicitando as simplificações da realidade subjacentes ao seu processo de construção. Já os estudantes 3, 4 tiveram dificuldades nesse aspecto, pois, por mais que tenham operacionalizado a equação que representa o MC de referência, inclusive citando as idealizações (p. ex., polarizador ideal) e previsões do modelo (a intensidade da luz não polarizada deveria cair à metade ao passar por um polarizador), eles mostram entender que o polarizador real do laboratório deveria ser igual ao polarizador idealizado na construção do MC. Por conta disso, entendemos que o terceiro EM contribuiu timidamente para que esses estudantes mobilizassem explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de MC. Já o Estudante 6, além de não entender o papel representativo da Lei de Malus (como os estudantes 3 e 4), mostra que não se apropriou corretamente das idealizações assumidas em seu processo de construção. Por isso, não se tem indícios de que esse EM contribuiu para que esse estudante avançasse no domínio do conceito de MC.

No último EM, os estudantes estudavam o espectro de emissão e absorção de amostras por meio da utilização de um espectrômetro caseiro. Na investigação, o MC principal para entender o funcionamento do espectrômetro era o modelo das redes de difração. Para que esse modelo seja válido, faz-se necessário assumir as seguintes hipóteses:

- 1) Número de fendas por unidade de comprimento uniforme;
- 2) Anteparo distante;
- 3) Ocorre interferência construtiva sobre o CCD da câmera (1º máximo de difração).

Conforme explicado na Subseção 4.1.4, o último EM dá enfoque ao conceito de “Medição”. As medidas realizadas por meio do espectrômetro eram automatizadas, de forma que o aparelho funcionava como uma “caixa preta”, do tipo *input/output*, na qual entra informação de um lado (luz

proveniente da amostra analisada) e sai pelo outro (intensidade relativa em cada comprimento de onda que compõe o espectro da radiação, em uma planilha). Esperava-se que os estudantes entendessem os mecanismos responsáveis pelo processo de medição e explicitassem isso no seu relatório. No EM 4, em particular, possivelmente demos pouca ênfase a esses aspectos durante a Discussão Final. Por se tratar de um instrumento cuja utilização requer alguma prática, gastamos uma quantidade considerável de tempo das etapas que precediam a investigação familiarizando os estudantes com aspectos operacionais do espectrômetro. Assim, a discussão sobre os modelos científicos que fundamentam seu funcionamento ficou em segundo plano, e, possivelmente, não foi suficientemente desenvolvida, como discutiremos no próximo parágrafo. Entendemos que, em uma reaplicação desse EM, seria desejável, já na Discussão Inicial, chamar a atenção dos estudantes sobre o papel crucial dos modelos subjacentes aos processos de medição.

Apenas dois estudantes explicitaram como a medida pelo espectrômetro era feita, encadeando logicamente a propagação da luz pelo aparelho, desde a fenda até a *webcam*. A análise de suas apresentações durante a Discussão Final mostra que o restante dos estudantes se concentraram em desenvolver aspectos mais operacionais do espectrômetro, como obtenção de sua calibração e a utilização dos dados coletados em planilhas eletrônicas. O Estudante 2 explica como esse processo ocorre:

Nesse espectrômetro, a luz de interesse entrará por uma fenda fina em uma caixa de papel, toda preta, e sofrerá difração ao atravessar o pedaço de DVD, colocado na saída da caixa. A difração ocorre porque o DVD possui muitas ranhuras minúsculas pelas quais a luz atravessa, sendo, portanto, uma rede de difração. Após ocorrer a difração e a dispersão da luz em um espectro, será utilizada uma webcam para medir o comprimento de onda de cada componente da luz difratada.

A Estudante 4 também mostra domínio sobre o processo de medição e sobre os modelos que permitem que ele ocorra:

O uso da parte plástica transparente do DVD forma uma rede de difração de aproximadamente 1351 ranhuras/mm. Isso nos possibilita um maior valor para o ângulo de difração, o que aumenta a resolução ótica que afasta os comprimentos de onda deixando sua medição mais clara. Assim temos um espectrômetro cuja câmera da webcam pega apenas um dos máximos de difração da luz que entra na fenda e sofre difração no DVD.

Por outro lado, o Estudante 1 menciona que um DVD funciona como rede de difração no espectrômetro, mas não entra em detalhes sobre como isso pode ser usado para medir comprimentos de onda. No entanto, em seu relatório é visível que o estudante tem domínio sobre aspectos práticos da utilização do aparelho, bem como da utilização do *software*. Possivelmente, os estudantes 3, 5 e 6 tiveram uma baixa compreensão sobre os princípios que fundamentam o funcionamento do espectrômetro, como evidencia os seguintes trechos tirados de seus relatórios, respectivamente: “*foi de suma importância deixar a fresta pela qual os raios de luz entram bem fina para que o efeito de obter o espectro fosse possível*”, “*Idealizou-se [...] também que o tamanho da*

fenda do espectrômetro é de ordem menor que o comprimento de onda emitido pela luz” e “Idealizando também que o tamanho da fenda do espectrômetro é menor que o comprimento de onda emitido pela luz utilizada [...]”. Uma das propriedades de uma rede de difração ideal é que a distância entre as fendas seja maior que o comprimento de onda da radiação incidente. No entanto, na fala dos estudantes é feita referência à fenda do espectrômetro, que deve ser estreita apenas para que a intensidade da luz que entra no espectrômetro não sature o CCD da *webcam*, não tendo nenhuma relação com o comprimento de onda da radiação. Os estudantes 5 e 6 mencionam que se constitui em uma idealização o fato de que a fenda do espectrômetro é estreita. Na verdade, ter em conta a abertura da fenda é um procedimento de CV, evidenciando uma baixa compreensão sobre o conceito de idealização. Não foi possível avaliar o domínio do Estudante 7 sobre nenhum desses aspectos, já que ele, assim como o Estudante 3, sequer mencionou que havia um DVD, ou que o que se observava era um padrão de difração na *webcam*.

Concluimos, portanto, que o quarto EM foi frutífero para que os estudantes 2 e 4 explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de MC, pois esses estudantes demonstraram domínio sobre as teorias que fundamentam o funcionamento do espectrômetro. O Estudante 1, por mais que tenha operacionalizado bem o aparelho, e mencionado que o DVD funcionava como rede de difração, não explicou explicitamente que o que se observava na *webcam* era um dos máximos do padrão de difração formado, ou o papel da fenda no espectrômetro. Por conta disso, entendemos que o quarto EM teve modesta contribuição no avanço da compreensão desse estudante sobre o conceito de MC. As evidências sugerem ainda que o EM não foi frutífero para que os estudantes 3, 5, 6 e 7 mobilizassem explicitamente os conhecimentos relacionados ao conceito de MC da forma esperada para enfrentar a situação. Não foi possível constatar se esses estudantes compreenderam os modelos que fundamentam o funcionamento do espectrômetro, nem a forma como os dados eram coletados, em nenhuma evidência coletada nesta pesquisa.

Para resumir e proporcionar uma visão mais global sobre os resultados expostos nesta subseção, confeccionamos o gráfico de barras exposto na Figura 22, que dá uma ideia da contribuição dos EM, para que os estudantes avançassem em seus domínios do conceito de MC. Em outras palavras, avaliamos se os EM auxiliaram os estudantes a mobilizar explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de MC nas situações em que ele é demandado. Assim, a menor barra indica que o EM possivelmente não contribuiu para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+, denotada por (x); a barra intermediária indica que o EM possivelmente teve alguma contribuição para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+, denotada por (sem símbolo); e a maior barra indica que o EM possivelmente contribuiu para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+, denotada por (\checkmark).

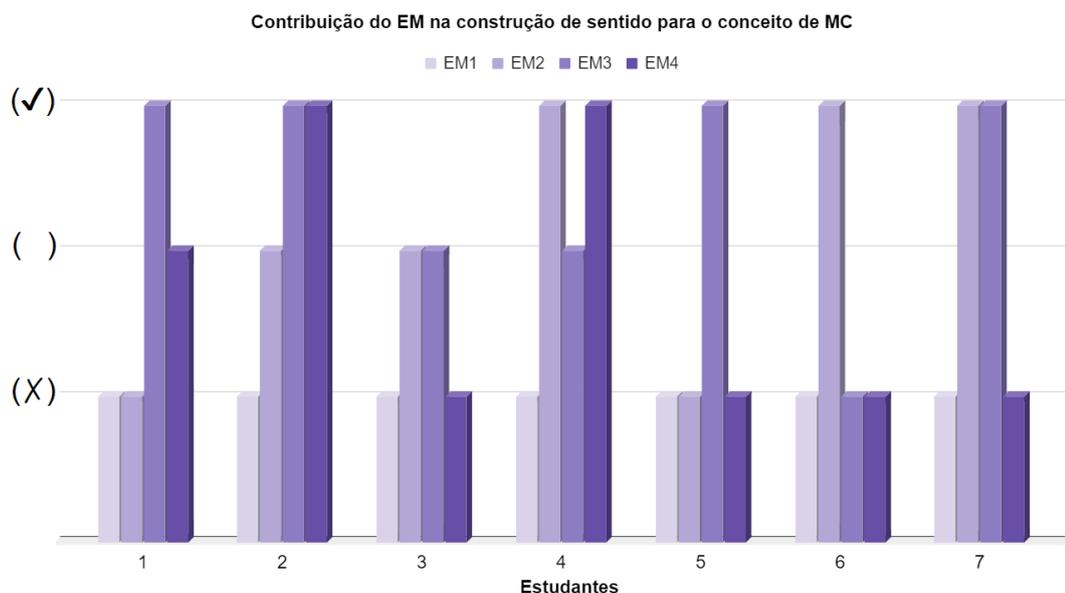


Figura 22 - Resumo dos resultados apresentados na subseção.

Entende-se pelo gráfico da Figura 22 que a apreensão, pelos estudantes, do campo conceitual da MDC+ é marcado por avanços e retrocessos, conforme a teoria dos campos conceituais de Vergnaud. Por exemplo, há indícios que os EM 1 e 2 não auxiliaram suficientemente o Estudante 1 a mobilizar explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de MC nas situações fomentadas (investigação sobre a atenuação da luz e a variação do índice de refração). Já o terceiro EM possivelmente auxiliou o estudante a dar sentido a esse conceito, representando um avanço no domínio do campo conceitual da MDC+. A situação fomentada nesse EM envolvia investigações sobre a reflexão e transmissão da luz polarizada por polarizadores. Porém, possivelmente o último EM teve uma contribuição mais tímida no avanço desse estudante sobre o conceito de MC, já que se observou retrocesso no que diz respeito a manifestações explícitas de conhecimentos relacionados a esse conceito em relação ao EM anterior.

Por meio do gráfico, podemos identificar que o Estudante 3 foi o que mais teve percalços, ao longo dos quatro EM, no processo de apreensão do conceito de MC. Já os estudantes 2 e 4 demonstraram ter um maior domínio sobre esse conceito, tendo mobilizando conhecimentos relacionados a ele em mais situações. Ao final das próximas duas seções, apresentamos um gráfico semelhante ao da Figura 22, resumindo os resultados encontrados em relação aos conceitos de CV e EE.

5.2.2 Relações entre modelos científicos e procedimentos de controle de variáveis em experimentos

Para avaliar como os estudantes mobilizaram conhecimentos relacionados ao conceito de CV nos EM, buscamos identificar se suas investigações foram conduzidas tendo em vista as simplificações da realidade assumidas na construção do modelo teórico de referência adotado. Portanto, consideramos que conhecimentos relacionados ao conceito de CV foram mobilizados pelo estudante quando ele realiza procedimentos para controlar os eventos investigados para que efeitos desprezados nos modelos científicos adotados sejam minimizados e/ou para garantir que as grandezas (variáveis e parâmetros) medidas reflitam as estabelecidas nesses modelos. Como mencionado na Subseção 4.2.2 percebemos que, muitas vezes, os estudantes executam procedimentos de controle de variáveis sem manifestar de forma explícita, uma evidência de que os estudantes tinham domínio operatório sobre esse conceito. Por isso, além das situações explícitas, foi levado em consideração as situações em que conhecimentos relacionados a esse conceito foram manifestados de forma implícita. Durante a apresentação dos resultados, na Discussão Final, também se observou que os estudantes se concentravam em descrever o que foi feito sem estabelecer relações entre o delineamento experimental e o MC utilizado, tendo esse aspecto sido manifestado de forma predominantemente implícita nessas situações.

No primeiro EM, sobre a atenuação da luz, os estudantes precisavam realizar diversos procedimentos de CV. Dentre eles, podemos citar os seguintes:

- 1) Realizar a medida da iluminância em local escurecido, evitando a influência da luz proveniente de outras fontes que não a utilizada na investigação;
- 2) Medir a iluminância inicial da fonte, sem atenuação pelo meio material;
- 3) Colimar a fonte luminosa, se for o caso;
- 4) Considerar a sensibilidade espectral do luxímetro na realização das medidas;
- 5) Posicionar o sensor luxímetro normalmente à luz incidente.

A análise das investigações realizadas pelos participantes da pesquisa evidenciou que todos os estudantes fizeram investigações envolvendo fontes que emitiam luz no espectro visível, tendo utilizado sensores com sensibilidade nessa faixa espectral. Ainda, todos usaram *lasers*, de forma que a fonte já era naturalmente colimada. O Estudante 1 demonstrou em seu relatório ter realizado todos os procedimentos de controle de variáveis previstos, exceto o controle da radiação de fundo da sala, algo que poderia ser descontado das medidas. São evidências dessa constatação os seguintes excertos do seu relatório: “Os bastões [de vidro] eram trocados para cada medida, de maneira que estivesse o mais próximo possível do laser e do luxímetro, para avaliar somente o efeito do bastão na atenuação da luz, desconsiderando o ar” e “[...] foi posto o luxímetro diretamente na frente do laser (distância $x = 0$), para determinar a iluminância inicial do laser”. Já os estudantes 2 e 7 realizaram todos os procedimentos de controle de variáveis previstos. Por exemplo, o Estudante 2 ressalta que “a luz da sala foi desligada para não influenciar no experimento”; o Estudante 7 ressalta que “[...] a iluminância [proveniente da sala] que o luxímetro recebia com o laser desligado era de $1,0 \pm 0,1 \text{ lx}$ ”. Ambos os estudantes evidenciam que o alinhamento do sensor do luxímetro com o feixe colimado do *laser* foi um fator importante em seus experimentos, pois se o feixe de luz não incidia normalmente no sensor, o valor medido era sempre menor que o valor na situação em que o sensor está bem

alinhado com o *laser*. As imagens na Figura 23, mostram a incidência normal da luz proveniente do *laser* no sensor luxímetro.

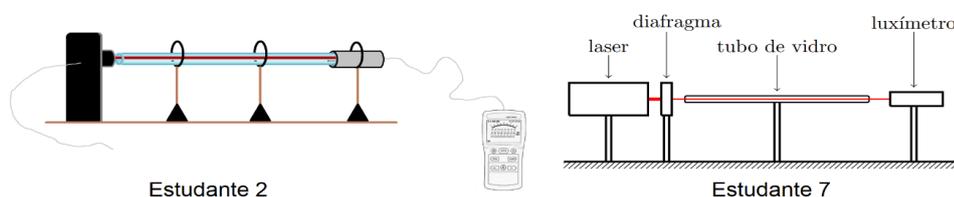


Figura 23 - Esquema de montagem da investigação feita pelos estudantes 2 e 7. As figuras indicam que o sensor do luxímetro foi posicionado normalmente ao feixe de luz incidente nos dois casos.

O Estudante 3 também realizou todos os procedimentos de controle de variáveis corretamente. Por exemplo, em seu relatório ele escreveu: “*Além disso, como dito anteriormente, o valor a distância nula (luxímetro encostado no laser) foi de $E_{V_0} = 7300 \pm 1 \text{ lx}$. Enquanto que o valor de ruído proveniente da sala semi-escura foi de 1 lx ”*. Assim, como o Estudante 1, o Estudante 3 relata ter se preocupado em posicionar o sensor rente ao bastão de vidro, evitando atenuar a luz pelo ar. Já a Estudante 4, mostrando se preocupar com o grau de abertura do feixe de *laser*, escreveu: “[...] aliado ao controle da abertura do laser feito pelo diafragma, que muda o ângulo sólido da radiação”. A Estudante 4 chegou a medir a radiação de fundo da sala, porém argumentou no relatório que “a iluminância da sala semiescura (1 lx) foi considerada irrelevante para fins de cálculos”, apesar de que seus dados mostraram que essa radiação de fundo não foi desprezível. O menor valor de iluminância medida (com o batão de vidro mais longo disponível) foi de $5,9 \pm 0,1 \text{ lx}$, de forma que 1 lx representou cerca de 17% do valor medido (dez vezes maior que a incerteza do instrumento usado). Também não encontramos em seu relatório menção ao alinhamento do sensor com o feixe de luz. Os estudantes 5 e 6 foram os que menos explicitaram procedimentos de controle de variáveis. Em nenhum dos relatórios desses estudantes se encontra referência ao fato de que a luz da sala pode influenciar nas medidas, nem que a iluminância inicial do *laser* foi mensurada. O único procedimento de CV mencionado pelo Estudante 5 foi demonstrado no seguinte excerto: “notando que o laser dispersa muito, utilizou-se um diafragma para focalizar o feixe”. No relatório do Estudante 6, não se encontra qualquer menção a procedimentos de CV.

Portanto, concluímos que o primeiro EM foi frutífero para auxiliar os estudantes 2, 3 e 7 a manifestarem explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de CV de forma coerente com as relações propostas na MDC+, pois esses estudantes mostraram que o experimento foi feito de forma controlada, buscando minimizar aspectos que não são levados em consideração no modelo teórico de referência. Já os estudantes 1 e 4 apesar de terem apresentado explicitamente algum procedimento de CV em seus relatórios, ou o fizeram de forma apenas parcial, ou não os implementaram. Por isso, consideramos que o EM 1 os auxiliou apenas parcialmente a explicitar conhecimentos relacionados ao conceito de CV. Concluímos ainda que o primeiro EM não contribuiu

para auxiliar os estudantes 5 e 6 a manifestar explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de CV, pelos motivos apontados no final do último parágrafo.

No segundo EM, os estudantes usavam a Lei de Snell ou o modelo de deflexão da luz em prismas para calcular o índice de refração de diferentes materiais. Para isso, precisavam evocar conhecimentos relacionados ao conceito de CV, tais como:

- 1) Usar luz monocromática ou policromática, dependendo do objetivo da investigação;
- 2) Incidir luz em um ângulo de incidência que provoca o menor desvio da luz que emerge do prisma;
- 3) Controlar a temperatura do material, mantendo-a constante ou uniforme;
- 4) Incidir luz no ângulo crítico para haver reflexão total.

Os estudantes 1 e 2 utilizaram um prisma para obter a relação de dispersão do prisma. Ambos mostraram ter realizados procedimentos de CV adequados na construção de seu experimento. Por exemplo, o Estudante 1 explicou em seu relatório que “*a montagem do experimento foi feita para obter o ângulo mínimo [de desvio] para cada comprimento de onda, conforme o esquema a seguir [...]*”, o que evidencia que o ângulo de incidência da luz branca utilizada foi controlado de forma intencional, conforme o modelo que descreve o desvio da luz pelo prisma. O Estudante 2 enfatiza a necessidade de usar a luz branca (policromática):

O primeiro passo do experimento foi montar, em cima da mesa, o trilho com o canhão de luz branca [...] o índice de refração foi medido para os comprimentos de onda na região visível do espectro eletromagnético, através da decomposição visual, por um prisma, dessa luz.

Em suas investigações, os estudantes estimaram o índice de refração associado a cada cor do espectro com base na sua posição no anteparo, medida com uma régua, como mostra a Figura 24.

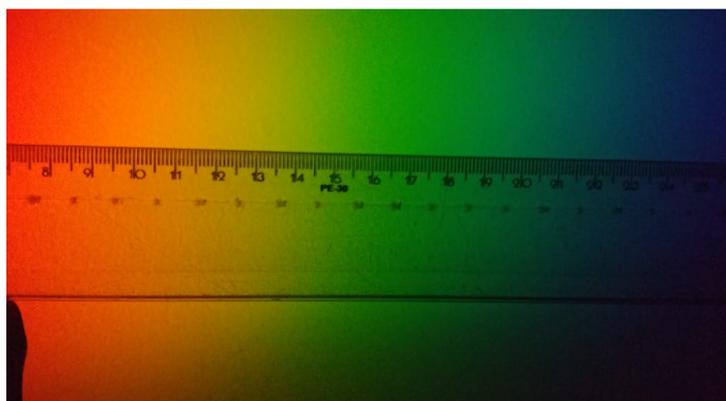


Figura 24 - Projeção da luz que sofreu dispersão por um prisma. A posição aproximada de cada cor foi estimada com uma régua. A olho nu, a fronteira entre as cores é mais clara do que a capturada pela câmera. Imagem extraída do relatório do Estudante 1.

Um aspecto importante relativo ao CV na situação representada na Figura 24 é o processo de medição da posição da cor, que acaba sendo determinada com certo grau de subjetividade. O Estudante 2 explica o raciocínio utilizado por ele e seu colega na Discussão Final. O seguinte trecho é uma transcrição de sua fala:

Nós decidimos, no final, usar a interface entre as cores, porque é mais fácil do que determinar, por exemplo: ah, esse é o comprimento central do verde; esse é o comprimento central do vermelho.. porque eles têm um certo espaçamento. Então a gente fez a medida na interface entre o vermelho, laranja, verde, azul, violeta... ai cada ponto corresponde ao comprimento de onda de uma interface.

Assim, os estudantes mostraram que aspectos fundamentais do experimento foram controlados. O Estudante 7 também fez investigações com o prisma, porém avaliando a variação do índice de refração com a temperatura. A Figura 25 ilustra o experimento realizado por ele.

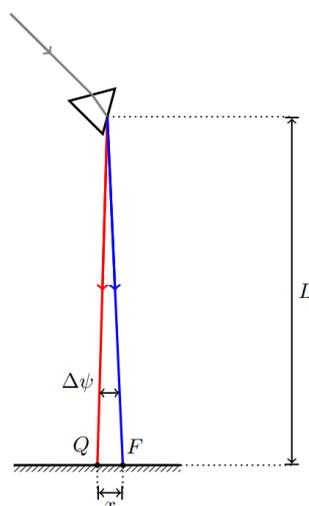


Figura 25 - Em vermelho, o raio de luz atravessando o prisma aquecido. Em azul, o mesmo raio de luz, porém com o prisma frio. A luz projetada se moveu de Q para F nessa situação, à medida que o prisma esfriava.

O Estudante 7 justifica a escolha do ângulo de incidência da luz no prisma com base no modelo que descreve a deflexão da luz monocromática. Em suas palavras:

Note-se que [...] a maior variação do ângulo de desvio ocorre quando o ângulo de incidência é próximo de 30° . Portanto, para medidas significativas de variações do índice de refração de um prisma de [abertura] 60° , deve-se incidir a luz nesse ângulo [30°], [...].

Ou seja, a variável “ângulo de incidência” é controlada para que o desvio provocado pelo aumento de temperatura seja máximo, e, portanto, observável em um anteparo distante. De fato, o Estudante 7 se mostrou bastante preocupado com o CV nesse experimento, chegando a mencionar

que “limpou-se a superfície do prisma antes de se fazer as medidas, a fim de diminuir a influência da sujeira na refração”.

Já os estudantes 3, 4, 5 e 6 fizeram o mesmo experimento, buscando determinar variações no índice de refração da água com o aumento da concentração de sal. O experimento feito pelos estudantes está esquematizado na Figura 26, extraída do relatório da Estudante 4.

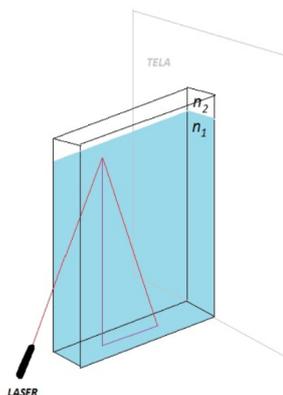


Figura 26 - Esquema do experimento realizado pelos estudantes 3, 4, 5 e 6. O ângulo de incidência do laser era modificado, até que o feixe refratado e projetado no anteparo desaparecesse. A partir da geometria formada pelos raios de luz incidente e refletido era possível determinar o ângulo crítico para haver reflexão total.

Para estudar as variações no índice de refração, eles optaram por usar a reflexão total da luz como técnica experimental, de forma que o ângulo crítico precisava ser controlado a cada nova medida. Outro aspecto que precisava ser controlado era a concentração de sal e a homogeneidade da água. Além disso, era necessário usar luz monocromática. Todos os estudantes mediram o ângulo crítico controlando variáveis relevantes para aplicar relações trigonométricas úteis para esse fim, porém esse experimento teve um problema relacionado com a altura da coluna de líquido que será discutido mais adiante. O Estudante 3 chama a atenção sobre a concentração de sal e a homogeneidade do meio no seguinte trecho:

É feita a primeira medida [...] com a salinidade de zero (nota-se que a água mineral já a apresenta uma salinidade intrínseca, mas a mesma foi desconsiderada). Então, é feito um incremento de 20 g de sal para cada medida [...]. Para cada adição de sal na água, as substâncias são misturadas, e então aguarda-se até a água parar de se mexer. Então o laser é movimentado e reposicionado para que o raio refratado incida no anteparo na interface entre os meios, tal como na primeira medida.

A importância de controlar a concentração de sal também foi ressaltada pelos estudantes 4 e 6. No relatório do Estudante 6, a importância de controlar esse aspecto fica clara: “*Nota-se também que os últimos 3 pontos não tem variação no índice de refração, isto provavelmente se dá pela saturação da solução aquosa, que já apresentava corpo de fundo precipitado*”. O Estudante 5 não descreve como foi controlada a concentração de sal. Por fim, nota-se pelos relatórios que apenas os estudantes 4 e 6 pareceram ter entendido que o controle da luz (devia ser monocromática) utilizada

para fazer o experimento era importante do ponto de vista do MC representado pela Lei de Snell. Na verdade, os estudantes 3 e 5 mencionam que a luz do *laser* utilizado é monocromática, porém o fazem de forma mecânica. Por exemplo, a Estudante 4 menciona esse aspecto quando lista os materiais utilizados: “*Laser monocromático de hélio-neônio com potência de 0,5 mW e comprimento de onda 632,8 nm*”; e o Estudante 5 simplesmente explica na seção sobre o delineamento experimental que “*montou-se o experimento com um laser monocromático*”, porém não ficou claro se ele entendeu porque a luz precisava ser monocromática, já que o estudante não construiu o modelo teórico representado pela lei de Snell.

Portanto, concluímos que o segundo EM foi frutífero para que os estudantes 1, 2, 4, 6 e 7 avançassem em seus domínios sobre o conceito de CV. Esses estudantes aplicaram explicitamente procedimentos empíricos explícitos com o objetivo de realizar sua investigação dentro do domínio de validade e das simplificações da realidade assumidas na construção do MC de referência do experimento. Nesse quesito, o EM auxiliou modestamente o Estudante 3, já que alguns procedimentos importantes de CV não foram mencionados (nesse caso, a importância da luz monocromática no experimento). Por fim, podemos dizer que esse EM possivelmente não auxiliou o Estudante 5 a manifestar conhecimentos explícitos sobre o conceito de CV porque esse estudante descreveu o delineamento experimental sem explicitar como os procedimentos têm relação com o MC subjacente a sua investigação.

No terceiro EM, os estudantes investigavam a reflexão e transmissão da luz polarizada por polarizadores e superfícies. Possivelmente, esse EM era o que mais exigia dos estudantes a execução de procedimentos de CV. Para realizar os experimentos, eles tinham que, por exemplo:

- 1) Realizar a medida da iluminância em local escurecido, evitando a influência da luz de outra procedência que não a da fonte usada na investigação;
- 2) Polarizar a luz antes de incidir no meio;
- 3) Controlar a direção de polarização da luz ou do polarizador;
- 4) Medir o ângulo de incidência da luz com alguma precisão;
- 5) Medir a intensidade da luz do feixe incidente na superfície;
- 6) Posicionar o luxímetro normalmente à luz cuja iluminância se pretende medir.

Todos os participantes da pesquisa, exceto o 7, realizaram o experimento que envolvia a Lei de Malus. Os estudantes 1 e 2, pertencentes ao mesmo grupo, fizeram uma montagem conforme a explicitada na Figura 27.

A Lei de Malus descreve a intensidade da luz polarizada por absorção quando o feixe é colimado, porém a fonte utilizada pelos estudantes emite um feixe de luz divergente. O pesquisador questionou os estudantes sobre esse aspecto durante a Discussão Final, constatando que esse foi, de fato, um descuido de ambos. Mesmo tendo sido alertados sobre esse problema, em nenhum dos relatórios foi mencionado que a fonte utilizada não foi colimada. O Estudante 1 também não menciona que/se a sala foi escurecida para realizar o experimento.

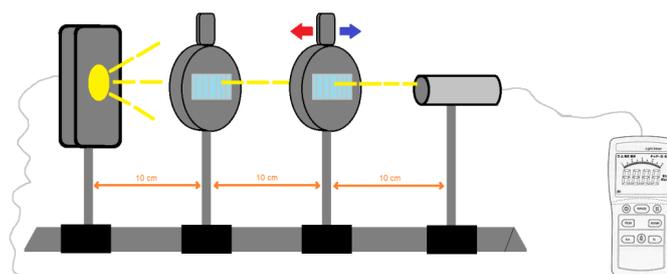


Figura 27 - Esquema de montagem do experimento dos estudantes 1 e 2. A figura, retirada do relatório do Estudante 2, mostra que foi utilizada uma fonte não colimada.

Fora esses dois aspectos, no entanto, o estudante explicita todos os outros procedimentos de CV. Por exemplo, o estudante relata como foi controlada a intensidade da luz que incide nos polarizadores:

Foram realizadas as medidas de I , a intensidade da luz sem cruzar nenhum polarizador, colocando o luxímetro na posição do primeiro polarizador. A medida de I_0 , a intensidade da luz após cruzar o primeiro polarizador, colocando o luxímetro na posição do segundo polarizador [...]. Foram obtidos $I=102,9\pm 0,1\text{ lx}$ e $I_0=34,6\pm 0,1\text{ lx}$.

Exceto pela questão da fonte, o Estudante 2 apontou em seu relatório todos os outros procedimentos de CV esperados. Um trecho que mostra isso é o seguinte: “A fonte e o luxímetro foram então ligados, e a luz da sala em que foi feito o experimento foi desligada, bem como as portas e janelas foram fechadas e cobertas, respectivamente”.

Os estudantes 3, 4, 5 e 6 foram integrantes de um mesmo grupo. As evidências mostram que os estudantes 3 e 4 realizam todos os procedimentos de CV corretamente. Em seu relatório, o Estudante 3 explicita o procedimento usado para medir o ângulo entre a direção de transmissão do polarizador e do analisador: “Esses polarizadores estão acoplados a um suporte que conta com um transferidor: assim é possível rotacionar os polarizadores e medir o ângulo diretamente nos suportes, assegurando maior precisão [...]”. A Estudante 4 utiliza representações esquemáticas para mostrar como a direção de polarização da luz era controlada. Nesse caso, a luz em questão passava primeiro por um polarizador, e, em seguida, por um segundo (analisador). Conforme o estudante explica em seu relatório, “variou-se o ângulo do filtro analisador para poder estudar a lei de Malus”. Já o Estudante 5 menciona todos os procedimentos de CV previstos, exceto se a luz de fundo da sala foi ou não medida. Esse aspecto seria relevante em sua investigação porque o menor valor de iluminância medido por ele foi de 7,5 lx e a luz de fundo é da ordem de 1 lx. O Estudante 6, além de não mencionar que/se a luz da sala foi apagada, entra em contradição ao afirmar em seu relatório que “a Lei de Malus descreve o comportamento de um feixe de luz monocromático”. Isso é uma contradição com os procedimentos realizados porque o estudante usa luz branca para fazer a

investigação. Conforme mencionado na seção anterior, a Lei de Malus não se restringe à luz monocromática.

O Estudante 7 investigou a intensidade da luz polarizada refletida pelas superfícies. Para isso, realizou, inicialmente, testes com espelhos. Porém, percebeu que não poderia analisar os dados experimentais já que “*espelhos violam uma das hipóteses sobre a validade do embasamento teórico, a saber, que os meios devem ser dielétricos* [espelhos possuem uma camada metálica que contribui fortemente para a reflexão]”. Depois de perceber isso, o estudante fez a investigação com o acrílico. Entretanto, sua investigação teve problemas relativos ao CV. A Figura 28 foi retirada de seu relatório.

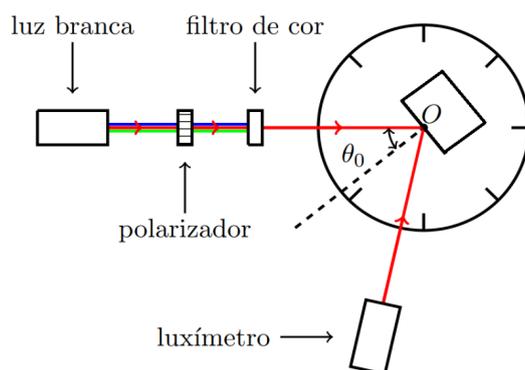


Figura 28 - Esquema de montagem do experimento realizado pelo Estudante 7. A luz branca é primeiramente polarizada, depois passa pelo filtro de cor.

O estudante representa a luz branca pelas três cores (vermelha, verde e azul). Ao passar pelo polarizador, a luz branca continua branca, porém se torna polarizada. Ao atravessar o filtro, a luz assume alguma cor (a cor do filtro, que é vermelha na Figura 28) porém, possivelmente, perde a direção de polarização. O esquema de montagem da Figura 28 falha em dois aspectos: 1) o polarizador deveria vir depois do filtro, não antes; e 2) o filtro deixa passar um intervalo de comprimento bastante largo do espectro. Assim, a luz utilizada pelo estudante não foi nem polarizada nem monocromática (pressupostos do modelo de Fresnel). Com relação ao primeiro aspecto, o Estudante 7 reconhece: “*Entretanto, não se percebeu que isso poderia alterar a [direção de] polarização da luz, [...]. De fato, isso só foi percebido depois da coleta dos dados*”. Porém, apesar das discussões sobre essas questões durante a Discussão Final, o estudante parece não ter se dado conta de que a luz do filtro não era monocromática, já que esse problema não foi mencionado em seu relatório.

Portanto, concluímos que o terceiro EM foi frutífero para auxiliar os estudantes 3 e 4 a dar sentido ao conceito de CV. Esses estudantes delinearam procedimentos explícitos para controlar aspectos relacionados ao MC de referência da investigação. O EM possivelmente contribuiu de forma modesta para que os estudantes 2, 5 e 7 explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de CV. Isso porque esses estudantes, por mais que tenham explicitado alguns procedimentos de controle de variáveis, ignoraram um aspecto importante do seu experimento: o Estudante 2, apesar

de alertado na Discussão Final, não faz menção sobre os problemas de usar a Lei de Malus para descrever a polarização de uma fonte não colimada; o Estudante 5 não considera a intensidade da radiação de fundo em suas medidas, mesmo que esse parâmetro seja numericamente maior que a incerteza do instrumento utilizado; já o Estudante 7, apesar de ter sido alertado durante a Discussão Final que a luz do filtro possivelmente não era monocromática, considerou-a como tal na análise de seus dados. Os estudantes 1 e 6 tiveram mais dificuldades em manifestar conhecimentos explícitos relacionados ao conceito de CV de forma coerente com as relações propostas na MDC+. O Estudante 1 ignora que a fonte usada não foi colimada e que a luz de fundo pode influenciar nas medidas; o Estudante 6, além de não mencionar procedimentos importantes de CV, realizou procedimentos empíricos que contradizem diretamente suas afirmações no relatório.

No último EM, os estudantes utilizavam um espectrômetro caseiro para medir espectros de emissão ou absorção de amostras. Para isso, precisavam estabelecer procedimentos de CV que garantiam a correta utilização do espectrômetro. Dentre eles, podemos citar, por exemplo:

- 1) Realizar a medida em local escurecido, evitando que luz não proveniente da amostra analisada chegue no espectrômetro;
- 2) Incidir luz de espectro contínuo na amostra que se deseja medir o espectro de absorção;
- 3) Calibrar o espectrômetro usando algum espectro conhecido;
- 4) Controlar a intensidade da luz que entra no espectrômetro, evitando superexposição do CCD da câmera.

Os estudantes 1 e 2 realizaram a mesma investigação, em um estudo do espectro de emissão de filtros e *lasers* do laboratório. O Estudante 1 não menciona em seu relatório que foi tomado cuidado para evitar que a radiação de fundo da sala interferisse nas medidas; tampouco mencionou que foram tomadas precauções para evitar a superexposição do CCD da *webcam*. Entretanto, tais providências foram tomadas, como se constata pela sua descrição do experimento durante a Discussão Final. Por conta disso, entendemos que a falta de menção sobre tais procedimentos de CV se constituíram em um lapso do Estudante 1 na escrita de seu relatório. Destaca-se como ponto positivo em seu relatório, do ponto de vista do CV, a utilização de uma calibração adequada: “*Como o espectro do vapor de mercúrio é bem definido, ele foi utilizado para fazer a calibração [do espectrômetro]*”. Já o Estudante 2 explicita de forma minuciosa no relatório todo o delineamento experimental, explicando, por exemplo, que para estudar o espectro dos filtros, “*foi utilizado o canhão de luz branca a uma distância suficientemente grande para que não houvesse superexposição excessiva do espectrômetro à luz [...] e então foi colocado um dos três filtros [...] para observar o que o espectrômetro registrava*”; sobre a investigação do espectro do *laser*, o estudante explica ainda que “*Devido à alta iluminância do laser utilizado (resultado da colimação dos raios de luz), foram colocados dois polarizadores entre o dispositivo e o espectrômetro, para atenuar uma parte da luz*”.

Os estudantes 3, 4, 5 e 6 fizeram o mesmo experimento, com o objetivo de determinar o espectro de absorção de pigmentos vegetais. Para isso, fez-se necessário iluminar uma amostra contendo material vegetal com luz branca, de espectro contínuo. Um ponto negativo com relação ao

CV, foi o fato de que nenhum estudante mencionou que outras fontes luminosas foram eliminadas da análise (radiação de fundo). Outro ponto negativo foi que o grupo utilizou luz não-contínua para fazer as medidas, como já mencionamos na seção anterior. Esse equívoco ocorreu, possivelmente, porque os estudantes imaginaram que o fato da luz usada ser branca aos olhos implica necessariamente que seu espectro é contínuo. No entanto, o espectrômetro permitia verificar que esse não era o caso para a luz utilizada. Mesmo assim, as investigações foram feitas apesar disso. Também ficou claro que os estudantes 3 e 6 não entenderam como se dava a calibração do espectrômetro. Por exemplo, o Estudante 6 afirmou: “o *site* [no qual o *software* do espectrômetro é executado] *pede uma calibração com uma luz incandescente*”, enquanto o Estudante 3 parece conceber que a calibração poderia ser feita com a luz solar: “[...], *notamos um espectro diferente do que seria obtido caso a calibração fosse feita diretamente com a luz branca do Sol*”. Já o Estudante 5 sequer menciona que o espectrômetro fora calibrado. Pela análise do relatório da Estudante 4, fica evidente o que foi feito pelo grupo: os estudantes calibraram o espectrômetro com uma lâmpada branca fluorescente (o que é correto), porém se equivocaram ao usar a mesma lâmpada como espectro contínuo de fundo, possivelmente porque ela era branca – tendo assim, supostamente, espectro contínuo. Nas palavras da Estudante 4: “*Com o sistema pronto fizemos a calibração do espectro da luminária que era o de uma luz fluorescente que servirá de base para as medições futuras*”. Podemos destacar como ponto positivo, o fato dos estudantes 3 e 4 terem mencionado explicitamente em seus relatórios que a superexposição do CCD da *webcam* foi controlada com a utilização de polarizadores. Porém, entendemos que nenhum dos estudantes do grupo manifestou ter dominado aspectos operacionais básicos do espectrômetro, de forma que os procedimentos de CV foram bastante insatisfatórios.

O Estudante 7 estudou o espectro de emissão de gases. Em seu relatório, verifica-se que os procedimentos de CV realizados foram adequados, exceto pela falta de menção em seu relatório de que a luz da sala foi apagada para a realização do experimento. No entanto, sabemos que isso foi realizado e o estudante menciona isso na Discussão Final. O experimento realizado está indicado na Figura 29, retirada de seu relatório. O estudante fez a calibração do espectrômetro com uma lâmpada fluorescente comum, cujo espectro pode ser visto na Figura 15 da seção anterior.

Portanto, concluímos que o quarto EM contribuiu para que os estudantes 1, 2 e 7 dessem sentido ao conceito de CV porque esses estudantes mostraram ter realizado procedimentos empíricos que garantiam o funcionamento do espectrômetro tendo em vista os modelos que sustentam seu funcionamento.

Apesar de os estudantes 1 e 7 não terem explicitado alguns procedimentos de CV em seus relatórios, concluímos, com base nas evidências fornecidas na Discussão Final, que isso foi um lapso de ambos os estudantes. As evidências também mostram que o EM possivelmente não contribuiu para que os estudantes 3, 4, 5 e 6 explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de CV da forma coerente com as relações propostas na MDC+.

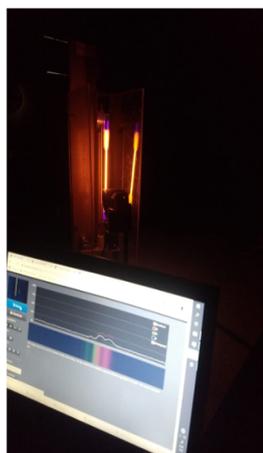


Figura 29 - Arranjo experimental construído para determinar o espectro de emissão do gás Argônio.

Na Figura 30, apresentamos o resumo dos avanços e retrocessos dos estudantes com respeito ao domínio do conceito de CV.

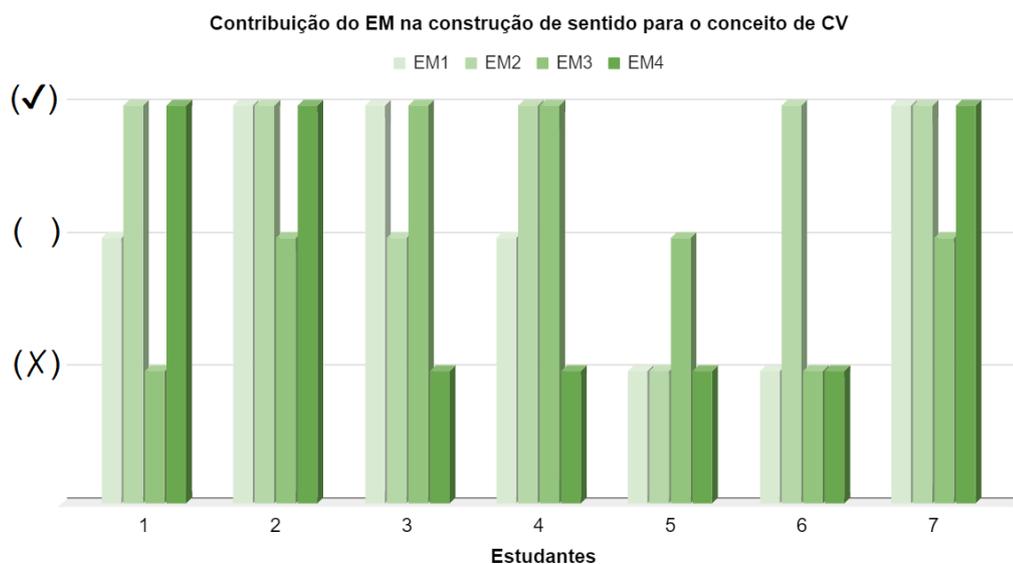


Figura 30 - Resumo dos resultados apresentados na seção.

A Figura 30 indica que os estudantes 5 e 6 foram os que mais tiveram dificuldades com a apreensão do conceito de CV ao longo da disciplina. Já os estudantes 2 e 7 demonstraram ter mobilizado explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de CV em três dos quatro EM realizados, mostrando que, para esses estudantes, os EM possivelmente contribuíram para ampliar seus domínios sobre esse conceito.

5.2.3 O papel das evidências experimentais na construção de conclusões

Entendemos que os EM auxiliaram os estudantes a darem sentido ao conceito de EE quando eles: i) realizam medições considerando conjuntos de dados experimentais, utilizando-se de incertezas envolvidas nesse processo; ii) fundamentam suas conclusões em evidências; e iii) analisam as implicações das teorias auxiliares no processo de medição. Essas considerações repousam no fato de que, apesar de os dados experimentais serem a manifestação mais próxima da realidade que dispomos, medidas sempre envolvem incertezas associadas. É comum, ainda, que estudantes não considerem as evidências para a formação de conclusões, fornecendo explicações alternativas que não podem ser corroboradas empiricamente. Também se faz necessário analisar o papel das teorias auxiliares porque todo processo de medição envolve a utilização de instrumentos que se baseiam em hipóteses que tipicamente não são colocadas à prova. Passamos a apresentar os resultados para cada EM.

No primeiro EM, a atenuação da luz ao se propagar pelos diferentes materiais foi investigada. Para isso, os estudantes tinham que obter EE por meio de operações empíricas. Tais procedimentos envolviam, por exemplo:

- 1) Obter a iluminância em diferentes pontos do meio material como uma função da distância à fonte;
- 2) Ajustar a lei de Beer-Lambert aos dados coletados, usando o coeficiente de atenuação e a iluminância inicial como parâmetros de ajuste.

No primeiro EM, todos os estudantes realizaram medidas de iluminância para diferentes distâncias percorridas pela luz no interior do material. Por exemplo, referindo-se à incerteza na variável “distância”, o Estudante 1 escreve: “os valores de x [distância] foram medidos com uma régua milimetrada, portanto a incerteza é de $0,05\text{cm}$ [...]”. Mais adiante, o estudante explica: “Com o Software SciDavis, foi realizado um ajuste utilizando a equação [lei de Beer-Lambert], determinando o coeficiente de atenuação da luz no vidro [...]”. Esse exemplo mostra que a determinação do coeficiente de atenuação da luz se deu pelo ajuste de uma curva teórica aos dados experimentais, tendo sido esse o método preferido dos estudantes. Os estudantes 2 e 5 também utilizam o SciDavis para fazer seus cálculos. Por exemplo, o Estudante 2, ao contrário dos estudantes 1 e 5, interpreta o resultado à luz do coeficiente de determinação: “[...] foi obtido o coeficiente de extinção $\mu = 0,1793 \pm 0,0040 \text{ cm}^{-1}$. O coeficiente de determinação obtido pela regressão linear feita pelo ajuste foi de $R^2 = 0,979981$, indicando forte correlação das variáveis”. Outra maneira de obter o coeficiente de atenuação era pelo cálculo direto usando métodos de propagação de incerteza, como feito pelo Estudante 7, que explicita em detalhes seus cálculos. Referindo-se à incerteza na variável “iluminância”, o Estudante 7 explica que, “como o luxímetro é um aparelho digital, a incerteza da sua medida é igual ao menor valor não nulo que pode ser apresentado na tela, o que nesse experimento foi de 1 lx ou $0,1 \text{ lx}$ ”. A diferença nas incertezas advém do fato de que a escala do aparelho digital se

modifica dependendo da intensidade, podendo assumir os valores de 0,1 lx, 1 lx ou 0,1 klx. Por fim, o Estudante 3, explicando que “foi utilizada a biblioteca *scipy* da linguagem *Python* para realizar o ajuste do modelo [...]”, construiu o gráfico representado na Figura 31.

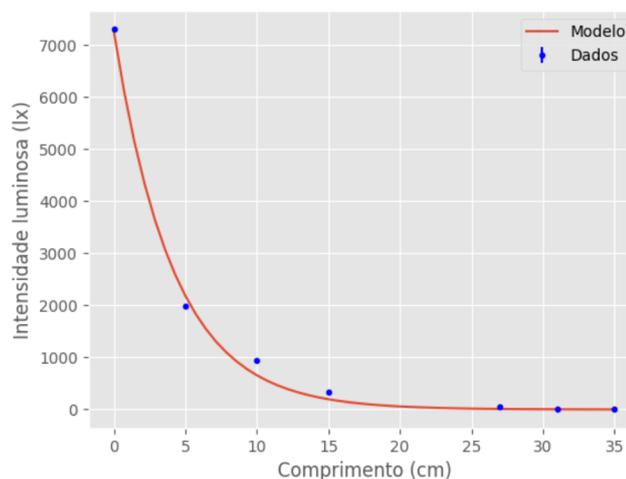


Figura 31 - Atenuação da luz ao se propagar pelo vidro. A linha vermelha é um ajuste da Lei de Beer-Lambert aos dados experimentais coletados pelo Estudante 3.

Por fim, verificou-se que os estudantes 4 e 6 não levaram em consideração as incertezas nessas variáveis para calcular o coeficiente de atenuação da luz, tendo apresentado os resultados como se o valor calculado fosse exato.

Passamos a analisar as conclusões dos estudantes sobre os resultados experimentais. O Estudante 1, por exemplo, afirma que “a análise dos resultados desse experimento demonstram boa precisão do sistema feito para determinar o coeficiente de atenuação da luz no vidro”, porém o estudante não analisou seus resultados por meio do coeficiente de determinação R^2 (como feito pelo Estudante 2), nem comparou o valor obtido com a literatura. Também ao se referir à “luz” de forma genérica, o estudante generaliza um resultado que, na verdade, é válido apenas para o *laser* vermelho com comprimento de onda de 650nm (fonte luminosa utilizada no experimento). Já o Estudante 2 se mostra mais cauteloso concluindo que:

O modelo de Beer-Lambert é adequado para explicar a atenuação da luz no vidro dentro dos limites testados. Tais limites incluem variações negligenciáveis na temperatura do local em que foi feito o experimento [...], bem como uma quantidade específica de luz que atravessou o material, com um comprimento de onda também específico [laser 650nm]. Para ampliar o escopo da aplicabilidade dessa lei, torna-se pertinente testá-la para outros materiais e outras situações, extrapolando os limites já descritos.

O Estudante 3 entende que “foi possível encontrar um resultado muito satisfatório para o modelo: a curva passa entre a maioria dos pontos [...]”. Entretanto, antes de apresentar esse resultado, o estudante removeu um ponto experimental porque, segundo ele, “o modelo sem esse

ponto [...] apresenta valores [parâmetros de ajuste] mais estáveis, sendo mais próximo da realidade observada”. Isso indica que o Estudante 3 tem dificuldade em entender o papel representativo da Lei de Beer-Lambert, acreditando que esse modelo descreve a realidade como ela é. Assim, por conta das diferenças entre a EE coletada e o resultado teórico proveniente do ajuste, o estudante optou por ignorar um dado experimental. Os estudantes 4, 5 e 7 fizeram o mesmo experimento do Estudante 3 e também realizaram reflexões sobre a adequação da inclusão (ou não) de dados experimentais em sua análise. Por exemplo, o Estudante 5 explica que “Fitou-se 2 ajustes distintos, um considerando o ponto sem a vareta de vidro ($x=0$) e outro considerando-a. [...] o ar atenua a luz também, mas de forma ínfima. Por isso, se usará os parâmetros do segundo ajuste para a discussão”. Assim, percebe-se que o Estudante 5 se posiciona, estando preocupado em eliminar dados que, possivelmente, representam fontes de erro no seu experimento (um argumento diferente do utilizado pelo Estudante 3). Os estudantes 4 e 7 não são tão assertivos quanto o Estudante 5. A Estudante 4 apresenta os dois ajustes, como se ambos fossem válidos e o Estudante 7 faz a análise em cima dos dois cenários, sem se comprometer em excluir ou não um ponto, como mostra o seguinte trecho de seu relatório:

Observando-se os coeficientes de correlação (R^2) dos ajustes lineares, pode-se ver que ambos são elevados; visualmente, pode-se também perceber que as curvas [...] se aproximaram bastante dos dados coletados experimentalmente. Isso indica que o modelo utilizado, i.e., a Lei de Lambert, realmente oferece um bom modelo para a descrição da atenuação da luz de um laser, mesmo com as simplificações realizadas [...].

Também destacamos que nenhum estudante analisou criticamente os dados coletados pelos luxímetros. Esses aparelhos recebem luz pelo sensor e inferem a sua iluminância pela Função Luminosidade, que considera apenas o espectro visível. Como todos utilizaram *lasers*, que operam nessa faixa do espectro, possivelmente os estudantes não acharam necessário mencionar esse aspecto, mas não podemos afirmar com certeza.

Por fim, concluímos que o primeiro EM foi frutífero para proporcionar situações que fomentaram a mobilização explícita de conhecimentos relacionados ao conceito de EE para os estudantes 2 e 5, já que ambos interpretaram os resultados de suas investigações dentro dos limites testado e exploraram intervalos de confiança por meio da utilização de incertezas experimentais. Também concluímos que o EM teve alguma contribuição para que os estudantes 1, 3 e 7 explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de EE de forma coerente com as relações propostas na MDC+. Esses estudantes, apesar de terem feito cálculos estatísticos para estabelecer intervalos de confiança para seus resultados, deixaram a desejar em alguns aspectos relativos ao conceito de EE. O Estudante 1, ao fazer afirmações que são válidas apenas para a luz de comprimento de onda igual à do *laser* utilizado, faz generalizações que não foram embasadas por sua investigação; o Estudante 3, ao excluir uma EE alegando que a mesma não estava dentro do intervalo preditivo do modelo, aparenta ter concepções ingênuas a respeito da natureza dos modelos científicos; já o Estudante 7 não exclui nem aceita a referida EE “problemática”, preferindo fazer duas análises. Por fim, concluímos que esse EM não contribuiu para que os estudantes 4 e 6 explicitassem

conhecimentos relacionados ao conceito de EE. Como problemas em comum, destacamos que ambos os estudantes não construíram respostas com um intervalo de confiança associado. A Estudante 4 acaba fazendo dois ajustes, um considerando uma EE e outro não; o Estudante 6, como comentado anteriormente, teve problemas com o MC usado no experimento, por isso as evidências coletadas por ele tem pouco significado nessa análise.

No segundo EM, os estudantes investigavam o índice de refração dos materiais com o uso da Lei de Snell e de um modelo que descreve a deflexão da luz no prisma. Assim, EE eram obtidas por meio de procedimentos que envolviam:

- 1) A medição do ângulo de incidência da luz e do ângulo de refração/ deflexão pelo prisma;
- 2) O cálculo do índice de refração.

Nesse EM, os estudantes 1 e 2 mediram a variação do índice de refração em função do comprimento de onda da luz, como mostra o gráfico na Figura 32. Em seu relatório, o Estudante 1 explica que “*não é possível afirmar que o experimento obteve sucesso, pois não podemos estimar o valor de incerteza para cada medida*”. Esse trecho, por mais que indique infortúnio, mostra que o valor da incerteza é um parâmetro determinante para um experimento bem conduzido, na concepção do Estudante 1. Infelizmente, seu relatório não apresentou nenhum tratamento estatístico sobre o conjunto de dados coletados. No entanto, seu colega de grupo, o Estudante 2, foi capaz de estimar incertezas para suas medidas, realizando inclusive métodos de propagação de incertezas. Por exemplo, ele cita que “*a incerteza da medida de L [distância do prisma à parede] foi inicialmente tomada como sendo 0,1 cm [...] A incerteza considerada para as medidas de d [cateto oposto ao ângulo de desvio mínimo] [...] foi 1 cm*”.

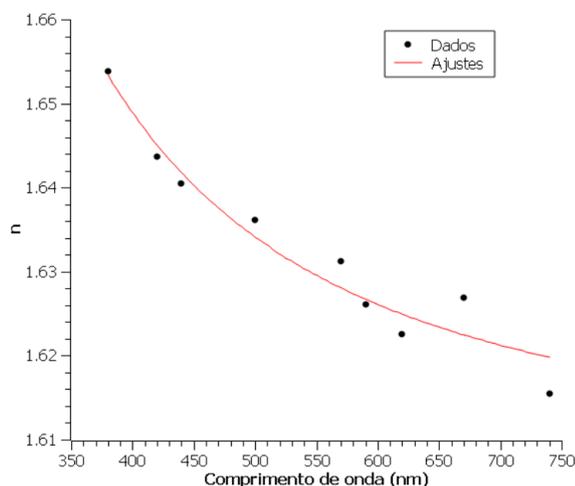


Figura 32 - Ajuste da lei de Sellmeier aos dados experimentais. Gráfico retirado do relatório do Estudante 1.

Os estudantes 3, 4, 5 e 6 mediram variações no índice de refração da água em função da concentração de sal. O experimento foi o representado na Figura 26. Todos eles, exceto o 3, calcularam o ângulo de incidência do laser na interface ar-água utilizando as incertezas das medidas envolvendo relações trigonométricas necessárias, porém nenhum utilizou esse resultado para

propagar incertezas ou mesmo estimar um intervalo de confiança para o índice de refração. O Estudante 3, bem como seus colegas, despreza a incerteza na concentração de sal da água, justificando que “*devido ao fato do sal ter sido medido em balança de precisão [...] foi desconsiderada a incerteza dessas medidas*”. Os estudantes 4, 5 e 6 usam as incertezas para calcular o ângulo de incidência, porém por meio de um método impreciso, no qual se aplica os valores máximos e mínimos assumidos por cada variável, com base nas incertezas em suas medidas. O Estudante 6 explica esse método:

Para o cálculo da incerteza no ângulo de incidência [...] calculou-se o maior valor possível que uma medição com régua poderia resultar, considerando então uma soma do valor da incerteza e depois o menor valor possível. Com estes dois valores, faz-se a média para definir o valor do ângulo de incidência e, para a incerteza da medida, fez-se a média das diferenças dos valores máximos e mínimos.

Quando perguntados sobre o porquê de não terem usado o método de propagação de incerteza por meio de derivadas, os estudantes responderam que não sabiam usar esse método, e que o método dos “máximos e mínimos” lhes foi ensinado na primeira disciplina de Física experimental (situação na qual os estudantes não dominam os fundamentos do cálculo diferencial). Ficamos surpresos com essa constatação, tendo em vista que os estudantes estavam cursando a última disciplina experimental do curso. As dificuldades com as incertezas persistiram ao longo da disciplina.

Já o Estudante 7, que investigou a variação do índice de refração com a temperatura, realizou propagação de incertezas usando métodos adequados. Suas medidas eram essencialmente a distância entre o prisma e a parede e a temperatura do prisma. Fica evidente em seu relatório a preocupação com incertezas associadas às medições. Por exemplo, ele argumenta que “*A medida da distância foi feita com uma trena (incerteza de 0,01 m), porém, devido às sucessivas medidas necessárias para cobrir todo o comprimento utilizado, a incerteza da medida será considerada 0,1 m*”. O estudante realiza estimativas corretas do valor do índice de refração, utilizando intervalos de confiança. Na Subseção 5.1.4 comentamos que o estudante 7 ficou desapontado com o resultado de sua investigação nesse EM. Após a exposição dos resultados de todos os grupos da turma, durante a Discussão Final, a professora apresentou possíveis soluções para as questões de pesquisa do EM. Nessa apresentação, comentou-se que os vidros podem apresentar coeficientes termo-ópticos¹³ positivos ou negativos (JOHN, 1991), o que, aparentemente, não convenceu o Estudante 7. Isso fez com que o estudante refizesse o experimento e apresentasse novos resultados em seu relatório, agora com um prisma (diferente do anterior) que apresentava variação positiva do índice de refração com a temperatura. Esse caso foi interessante porque nas duas situações os resultados do estudante possivelmente estavam corretos. No entanto, possivelmente, suas concepções prévias impediram-no de acreditar nas EE e levaram-no a refazer o experimento até que um resultado que lhe agradasse

13 O coeficiente termo-óptico é definido como a taxa de variação da temperatura em relação ao índice de refração.

fosse alcançado. De fato, nas investigações anteriores do pesquisador já havia sido constatado que alguns prismas do laboratório apresentavam coeficientes termo-óticos positivos e outros negativos.

Com relação às conclusões dos estudantes sobre os próprios resultados, passamos a analisar seus argumentos, avaliando se são compatíveis com as evidências encontradas. Os estudantes 1 e 2 utilizam o modelo de Sellmeier com os parâmetros ajustados ao seu conjunto de dados para criar gráficos que estimam “o ângulo crítico necessário para que haja reflexão interna total na interface entre uma fibra ótica hipotética e meios em que ela esteja imersa”, como argumenta o Estudante 1. A Figura 33 ilustra seus resultados.

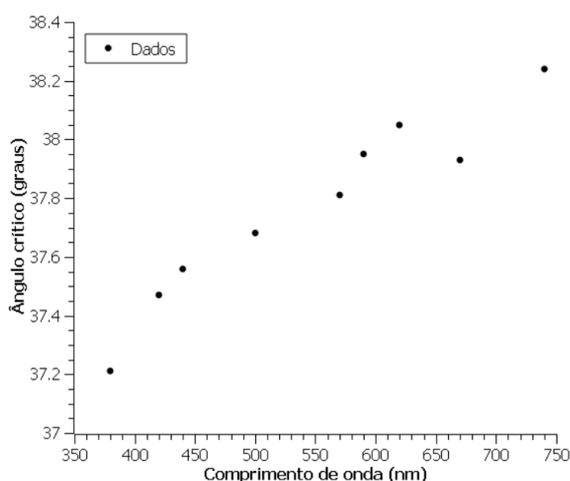


Figura 33 - Ângulo crítico para reflexão total da luz no acrílico.
Gráfico retirado do relatório do Estudante 2.

Enquanto o Estudante 1 se atém à descrição dos próprios dados, o Estudante 2 vai mais além, como indica o excerto retirado de seu relatório:

A extrapolação do modelo de Sellmeier permite responder à pergunta, ao menos parcialmente, de qual comprimento de onda é o mais adequado para transmitir a informação monocromática em fibras óticas: quanto menor for o comprimento de onda, melhor. Contudo, essa abordagem considera apenas o fenômeno base da fibra ótica, a reflexão interna total, desconsiderando outros fenômenos como a absorção atômica ou molecular de certos comprimentos de onda. Tal exploração, novamente, demandaria outros experimentos que almejassem respondê-lo, acrescentando novos elementos à discussão.

De fato, as conclusões do Estudante 2 estão corretas para o espectro visível (alvo da investigação). A cautela do estudante quanto aos próprios resultados também foi correta, já que as fibras óticas utilizam preferencialmente comprimento de onda mais elevados, na região do infravermelho.

Pela análise de seus relatórios, foi possível constatar que os estudantes 3 e 4 buscaram explicar seus dados fazendo ajustes de melhor curva, como explícito nos seguintes trechos: “*vendo o formato dos pontos, foi feita uma tentativa de fit linear ($f(x) = ax + b$) [...] Notando-se que a curva não passa tanto pelos pontos [...], foi tentado outro formato de curva. Com isso, chega-se no fit com uma*

equação do segundo grau ($f(x) = ax^2 + bx + c$)”, no relatório do Estudante 3 e “Para ajudar na análise dos dados os resultados obtidos foram colocados num gráfico de segunda ordem [...]”, no relatório da Estudante 4. Ambos os estudantes despendem certo esforço descrevendo os coeficientes ajustados, porém, como não se pode atribuir significado físico a tais grandezas, não faz sentido ajustar curvas¹⁴. O equívoco epistemológico por trás dessa concepção dá força para a crença de que uma lei pode ser obtida unicamente dos dados. Se as previsões dessa equação forem levadas a cabo, o estudante pode fazer asserções que não têm respaldo empírico. Esses aspectos foram explicados aos estudantes pelo pesquisador e pela professora. Os estudantes 5 e 6, apesar de fazerem parte do mesmo grupo dos estudantes 3 e 4 não cometeram esse equívoco. O Estudante 5 argumenta que: “Percebe-se também uma correlação positiva entre o n [índice de refração] e a concentração, entretanto, não se encontrou um modelo teórico que descreva este comportamento”, enquanto o Estudante 6, na mesma linha de raciocínio, argumenta:

Como não se tem conhecimento de alguma teoria precisa para os resultados calculados, preferiu-se não fitar nenhum tipo de função aos dados experimentais, uma vez que não tem sentido a aproximação à alguma função sem um teoria de embasamento.

Por fim, o Estudante 7 demonstra o mesmo nível de interpretação dos estudantes 5 e 6, argumentando que: “um gráfico do índice de refração em função da temperatura seria injustificado, uma vez que não se sabe a relação entre essas grandezas”. O estudante se limita a explorar as consequências de sua investigação: “vê-se que o índice de refração do vidro varia muito pouco (na ordem de $10^{-5} K^{-1}$). Isso é desejável, significando que não é necessário se preocupar tanto com as temperaturas do ambiente para o uso de fibras óticas”.

Por fim, exploramos se as teorias auxiliares envolvidas nos experimentos foram levadas em consideração. Os estudantes 1 e 2 utilizaram um método engenhoso, no qual a medida do ângulo de desvio mínimo do prisma era obtida por meio de relações trigonométricas. Como a medida era feita com base em um feixe projetado na parede distante, emergem várias questões relativas ao alinhamento, perpendicularidade, etc. Esses pontos foram levantados pelos estudantes, que buscaram compensar essas possíveis fontes de erro pelo aumento nas incertezas das variáveis associadas. Os estudantes 3, 4, 5 e 6, também usam um esquema envolvendo triângulos para medir ângulos. Um problema com o seu experimento foi a hipótese de que a coluna d’água contida na cuba não aumentava com a adição de sal. Os estudantes assumiram essa hipótese, como fica evidente pelo trecho do relatório do Estudante 6: “calculou-se com a ajuda de réguas, a distância entre o início da cuba e o fim do triângulo, pois como a altura da água é constante [...]”. Não tendo se dado conta desse aspecto, suas medidas angulares possivelmente foram comprometidas com a adição de sal na água, porém não foi possível avaliar a influência desse fator porque os estudantes simplesmente assumiram que a altura da água permanecia constante, tendo feito apenas uma medida. Já o

¹⁴ De fato, é possível encontrar um polinômio que passa por qualquer conjunto finito de pontos experimentais.

Estudante 7 faz várias análises sobre as teorias que dão suporte ao seu experimento. Ele argumenta que o prisma pode ser considerado um “ponto” já que a distância entre ele e o anteparo é muito grande (~25m), de forma que uma estimativa do desvio angular pode ser feita medindo o arco formado no anteparo; também critica a hipótese de que o prisma não sofre dilatação com o aumento da temperatura (algo que poderia explicar porque houve desvio do feixe também na direção vertical, quando supostamente deveria haver desvio apenas na horizontal).

Assim, podemos concluir que o segundo EM auxiliou os estudantes 2 e 7 a darem sentido ao conceito de EE. Esses estudantes explicitaram conhecimentos relacionados a esse conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+, já que construíram intervalos de confiança para suas predições, tiraram conclusões unicamente com base na investigação realizada e avaliaram as teorias auxiliares subjacente as medições feitas. Ainda, com base nas evidências, pode-se dizer que esse EM contribuiu em parte para que os estudantes 1, 5 e 6 mobilizassem explicitamente o conceito de EE. Isso porque o Estudante 1 não levou em consideração incertezas em suas medidas; os estudantes 5 e 6, apesar de terem feito algum tratamento estatístico e analisado seus dados à luz unicamente das evidências, não propagaram incertezas até o índice de refração, a grandeza que se queria determinar. Esses dois estudantes também não se deram conta de que a adição de sal no recipiente com água utilizado aumentava a altura da coluna de líquido, prejudicando as medidas. Por outro lado, as evidências mostram que o EM não contribuiu para auxiliar os estudantes 3 e 4 a explicitarem conhecimentos relacionados ao conceito de EE. Pesou negativamente, principalmente, o fato de que esses estudantes fizeram ajustes de melhor curva, criando parâmetros sem significado físico para descrever seus dados.

No terceiro EM, os estudantes investigavam a reflexão e transmissão da luz polarizada por meio de polarizadores e superfícies. Para isso, precisavam obter EE por meio de operações que envolviam:

- 1) Medir a intensidade da luz refletida/ transmitida na/ pela superfície como uma função do ângulo de incidência;
- 2) Calcular o coeficiente de reflexão da luz pela razão das intensidades da luz refletida e incidente;
- 3) Ajustar o modelo que descreve a reflexão da luz, usando o índice de refração como parâmetro de ajuste.

Nesse EM, todos os estudantes, exceto o 7, realizaram investigações sobre a transmissão da luz polarizada por polarizadores, tendo medido valores de iluminância em função do ângulo de transmissão dos polarizadores. Todos os estudantes que fizeram essa investigação apresentaram as incertezas corretas associadas a essas variáveis, porém apenas os estudantes 1 e 2 calcularam efetivamente o coeficiente de transmissão. Mesmo assim, não propagaram as incertezas até essa variável, nem estimaram intervalos de confiança. Estranhamente, o Estudante 2 explica que “*ainda que não tenha sido feita uma análise de incertezas para esses coeficientes, isso seria facilmente factível*”. Os estudantes 3, 4, 5 e 6 não fazem nenhuma análise estatística ou tratamento dos dados coletados, limitando-se a apresentar os resultados brutos em gráficos. O Estudante 7 avaliou a

reflexão da luz polarizada pelo acrílico, tendo utilizado as incertezas associadas às variáveis relevantes para fazer a propagação até o coeficiente de reflexão.

Todos os estudantes que fizeram a investigação usando polarizadores perceberam que certa quantidade de luz passava por eles, mesmo quando eram postos dois polarizadores justapostos cruzados, formando um ângulo de 90° entre si (pela Lei de Malus, polarizadores ideais não deixam passar luz nessa situação). Os estudantes 1, 2 e 5 lidaram com essa evidência de forma satisfatória e expandiram a Lei de Malus acrescentando uma constante que descreve essa quantidade de energia que passa independentemente da orientação dos polarizadores, como indica a Figura 34.

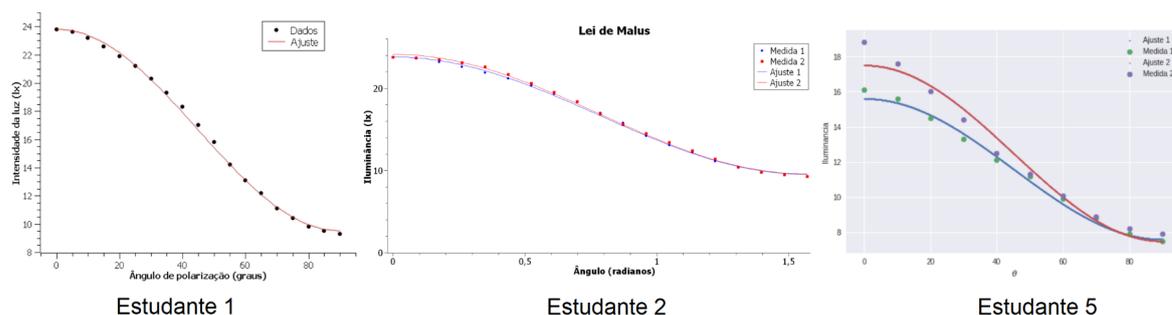


Figura 34 - Gráficos ajustando a Lei de Malus expandida. Imagens retirados dos relatórios dos estudantes 1, 2 e 5.

O Estudante 1 explica porque as evidências levaram-no a incluir a constante na Lei de Malus: “Como o polarizador não é perfeito, há uma quantidade de luz que nunca é absorvida. Portanto, foi utilizado um ajuste da forma $a + b \cdot \cos^2(x)$, onde a é um coeficiente relacionado a essa quantidade de luz, b é a intensidade de luz inicial e x é o ângulo de polarização”. Por um raciocínio semelhante, os estudantes 2 e 5 fizeram o mesmo procedimento. Já os estudantes 3 e 4, apesar de terem notado que sempre passava luz pelos polarizadores, independentemente da sua orientação, optaram por não introduzir qualquer modificação. Segundo o Estudante 3, “por meio da adição de uma constante à Lei de Malus teórica, é possível ajustar as curvas para passar pelos pontos medidos. Contudo, essa constante não apresenta sentido físico, visto que a teoria não prevê algo do gênero”. A Estudante 4 apresenta argumentação semelhante. Nos seus relatórios, fica implícito que os estudantes entendem que a diferença entre a predição da lei de Malus e as EE se devem unicamente a “erros experimentais”, como se os polarizadores do laboratório pudessem ser ideais. Concluímos que essa postura dos estudantes 3 e 4 teve origem do EM anterior, no qual os estudantes foram avisados que não se justifica realizar ajuste de melhor curva, e que as investigações deveriam sempre ser pautadas por modelos. Porém, incluir a constante na Lei de Malus não se trata de um ajuste de curva, e sim de incluir um referente ao modelo - a quantidade de energia constante que atravessava os polarizadores -, expandindo-o para ampliar seu domínio de validade. Apesar da introdução da constante na Lei de Malus ser uma modificação *ad hoc* no modelo, ela possui significado físico. Ocorre que não se conhece os mecanismos que permitem a passagem da luz pelos polarizadores, de forma que não se tem como justificá-la de modo mais profundo. A validade desse modelo expandido pode inclusive ser explorada pelo processo de contrastação empírica, como faz o Estudante 2 em seu relatório: “a

proximidade entre os valores de R^2 [coeficiente de determinação] a 1 indica a adequação [...] da lei de Malus para explicar os conjuntos de medidas”. O Estudante 6 teve problemas mais fundamentais com respeito à fundamentação teórica da Lei de Malus, conforme relatado anteriormente. O estudante cogita inserir uma constante na Lei de Malus para explicar os dados, porém prefere atribuir as diferenças observadas aos diversos “erros experimentais”. Assim, como os estudantes 3 e 4, o Estudante 6 tem dificuldade em conceber as diferenças entre as previsões e EE em termos das idealizações assumidas pelo modelo teórico de referência, dificultando sua interpretação dos resultados.

O Estudante 7, que avaliou a reflexão da luz polarizada pelo acrílico, compara as EE obtidas com as previsões do modelo teórico de referência da investigação, dando enfoque para o conceito de ângulo de Brewster, indicados pelas linhas pontilhadas na Figura 35.

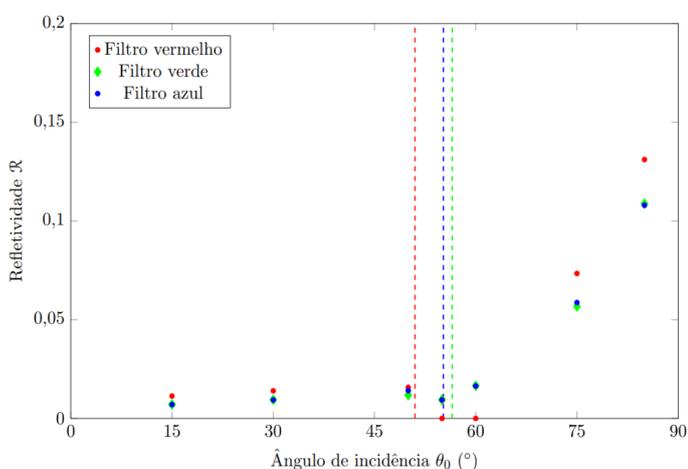


Figura 35 - Coeficiente de reflexão do acrílico em função do ângulo de incidência para luz polarizada na direção paralela ao ângulo de incidência. Gráfico retirado do relatório do Estudante 7.

Mesmo que o estudante não tenha percebido que a luz utilizada não é monocromática, a Figura 35 evidencia que os resultados obtidos foram comparados com o modelo teórico que descreve a reflexão da luz no acrílico para diferentes comprimentos de onda da luz incidente. O estudante representa no mesmo gráfico qual seria o ângulo de Brewster associado a cada cor (supostamente monocromática), porque nesse ângulo o modelo prevê que a intensidade da luz deveria ser zero, como explicado por ele: “*pode-se ver que as medidas de zeros na refletividade e o ângulo de Brewster estão próximos*”.

Portanto, concluímos que esse EM contribuiu para que o Estudante 7 ampliasse seu domínio sobre o conceito de EE. Esse estudante explicitou conhecimentos relacionados a esse conceito pois construiu intervalos de confiança para as previsões realizadas, fundamentou conclusões com base nas evidências coletadas e contrastou tais evidências com previsões teóricas. Nesse sentido, a contribuição do terceiro EM foi mais tímida para os estudantes 1, 2 e 5, tendo em vista que, apesar desses estudantes terem atribuído significado físico para as EE coletadas - inclusive expandindo a Lei de Malus - nenhum deles analisou o conjunto de dados à luz de alguma teoria estatística. As

evidências também sugerem que o EM possivelmente não contribuiu para que os estudantes 3, 4 e 6 explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de EE.

No último EM, os estudantes estudavam o espectro de emissão e absorção de amostras por meio de um espectrômetro. As EE obtidas eram, por exemplo:

- 1) A intensidade relativa, para cada comprimento de onda, da luz proveniente de diferentes amostras;
- 2) O espectro de emissão dos elementos que compõem um pixel da tela.

Nesse EM, os estudantes coletavam medidas automatizadas do espectro de emissão/absorção de amostras por meio de um aparato que consistia em um espectrômetro caseiro feito com papel, fita adesiva e um DVD, uma *webcam* e um *software*. A incerteza da medida era de 5nm, conforme especificação técnica do aparato (esse valor foi confirmado por nossas medidas e pelas dos estudantes). Porém, apenas os estudantes 1 e 4 se ativeram a esse aspecto. Por exemplo, explicando seus resultados sobre o espectro do *laser*, o Estudante 1 explica: “[...] há um pico bem definido em 631,1nm. Esse valor está de acordo com o que o fabricante do laser determina como sendo o comprimento de onda para este equipamento, 632,8nm, considerando o valor da incerteza de 5nm do espectrômetro utilizado”. Já a Estudante 4 explica que “o software utilizado nos proporciona uma precisão de medida de 5nm”, porém não volta a mencionar esse aspecto na discussão dos resultados. O restante dos estudantes, mesmo aqueles que nos últimos EM mostraram maior preocupação com o tratamento de dados, não mencionaram que as EE coletadas possuíam incertezas. As discussões sobre a diferença entre os espectros medidos e o que é reportado na literatura concentraram-se nos “erros experimentais”.

Os estudantes 1 e 2 fizeram experimentos com o *laser* e com os filtros coloridos, além da medida do espectro dos pixels. Sobre a investigação com os pixels, o Estudante 1 mostra se amparar nas EE coletadas para formular a seguinte conclusão:

[...] para a formação dessas cores [amarelo, roxo, ciano e fúchsia] é necessária a presença de mais de um pico intensidade [...] pois mais de uma cor no pixel é ligada. Por exemplo, na cor amarela é ligado a parte vermelha (em maior intensidade) e a parte verde do pixel, deixando a parte azul desligada.

O Estudante 2 também fundamenta suas conclusões nas EE coletadas. Referindo-se às mesmas cores do Estudante 1, ele explica:

Fica evidente que essas cores são o resultado da combinação das três cores primárias, inclusive de quais e em qual proporção. A diferença entre os espectros do roxo e do magenta revela a ideia de que duas cores podem ser distintas pela proporção com que as componentes primárias se misturam (no caso, o azul e o vermelho).

Conforme relatado nas seções anteriores, os estudantes 3, 4, 5 e 6 tiveram problemas para lidar com o *software* e não conseguiram completar suas medições no laboratório, tendo que realizar a

investigação em casa. Esses estudantes não realizaram a investigação sobre os pixels, apenas sobre o espectro de absorção de pigmentos vegetais. Conforme já discutido, os estudantes 3 e 6 tiveram significativa dificuldade na atividade porque mostraram não ter compreendido os princípios que fundamentam o funcionamento do espectrômetro, tendo problemas inclusive com a calibração do aparelho. Como suas compreensões sobre as medições estavam comprometidas, preferimos não analisar esse aspecto em seus relatórios. Sobre seus resultados, a Estudante 4 explica que “a luminária utilizada não nos deixa analisar completamente a absorção ocorrida na clorofila, pois, como exposto, ela não tem um espectro contínuo”. Esse excerto demonstra que, aparentemente, o estudante não estava disposto a formular conclusões sem o embasamento empírico de EE. Entretanto, mais adiante em seu relatório o estudante conclui sua investigação fazendo uma afirmação imprecisa e incorreta: “Os comprimentos de onda utilizados pelos pigmentos da clorofila para fazer a fotossíntese são todas as cores menos o verde [...]. Essa conclusão segue a lógica esperada, pois com nossos olhos podemos notar as cores das folhas e concluir que ela reflete verde”. A afirmação é imprecisa por que o estudante trata “comprimentos de onda” como “cores”. Também é incorreta porque, rigorosamente, a investigação foi feita com pedaços triturados de vegetais, não com um extrato puro de pigmentos fotossintéticos. A absorção das plantas em comprimentos de onda que nossos olhos interpretam como a cor verde não é nula, como mostrado no gráfico da Figura 36, retirada do relatório produzido pela Estudante 4.

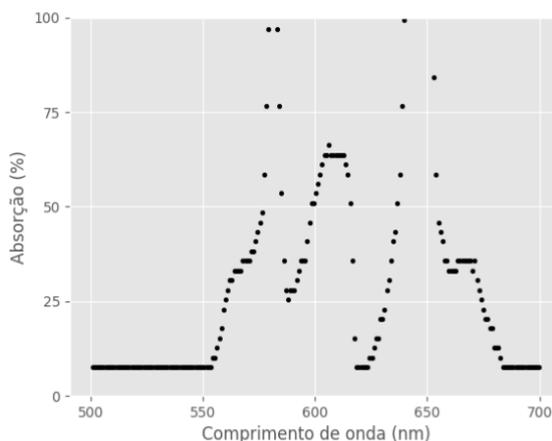


Figura 36 - Espectro de absorção da solução contendo pigmentos vegetais utilizada pela Estudante 4.

O Estudante 5 utilizou o mesmo gráfico da Figura 36 em seu relatório. Mesmo fazendo afirmações mais compatíveis com as EE obtidas, o Estudante 5 conclui sua investigação desconsiderando o fato de que a luz de fundo utilizada não podia ser considerada um espectro contínuo. O Estudante usa um pedaço do espectro obtido para validar seus resultados, como mostra o excerto: “podemos concluir a partir de uma análise gráfica, que o intervalo de absorção da clorofila possui picos na faixa dos 640-690nm, valores dentro do encontrado na literatura”, porém decide ignorar o restante dos intervalos, como a região correspondente à cor azul (comprimento de onda menor que 500 nm). Já o Estudante 7 mostra ter compreendido o processo de formação das cores

com base nas EE coletadas em sua investigação. Por exemplo, o estudante escreve que “*Note-se que a cor ciano possui um pico de intensidade de luz azul em torno dos 450 nm, e uma alta emissão de verde no intervalo de 525-550 nm*”. Essas afirmações são corroboradas pelas evidências obtidas pelo estudante sobre o espectro de emissão de uma tela mostrando a cor ciano, conforme indica a Figura 37.

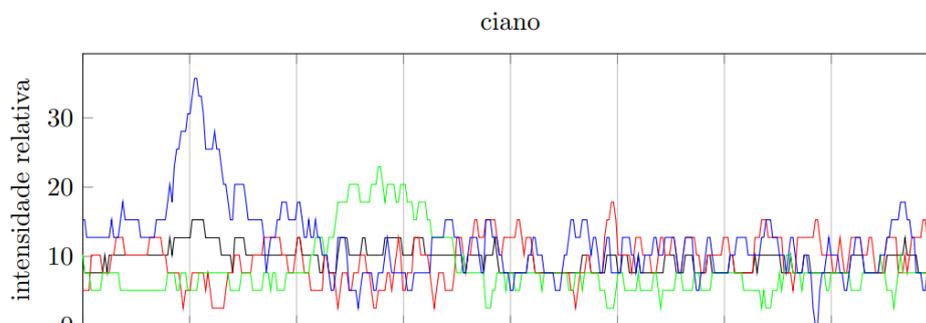


Figura 37 - Espectro de emissão dos pixels de uma tela ligada mostrando a cor ciano. Apesar do ruído, é possível ver que picos de intensidade em comprimentos de onda associados às cores azul e verde predominam, na proporção de intensidade 3:2, formando a cor ciano observada. Gráfico retirado do relatório do Estudante 7.

Sobre sua investigação do espectro de emissão dos gases, o estudante descreve em detalhes os picos de intensidade de cada amostra observada. Isso pode ser evidenciado pelo seguinte excerto: “*Para a lâmpada de hélio, existe um claro pico no comprimento de onda de 585,3 nm, bastante próximo ao valor previsto, que é aproximadamente 587,6 nm*”.

Por fim, podemos concluir que o quarto EM foi frutífero para auxiliar o Estudante 1 a dar sentido ao conceito de EE. Esse estudante manifesta explicitamente entender que, apesar do processo de medição ser automatizado, as medidas feitas possuem incerteza associada. Além disso, suas conclusões se limitam ao que foi observado, não extrapolando as EE obtidas. Ainda, o EM possivelmente teve alguma contribuição para auxiliar os estudantes 2, 4 e 7 a explicitarem conhecimentos relacionados ao conceito de EE. Os estudantes 2 e 7, por mais que fundamentem suas conclusões apenas nas evidências coletadas, não atribuem qualquer incerteza às medidas, interpretando essas grandezas como valores “exatos”. Já a Estudante 4, apesar de não cometer esse equívoco, extrapola as observações feitas, chegando a conclusões que não têm suporte empírico na investigação feita. As evidências também indicam que o EM possivelmente não contribuiu para auxiliar os estudantes 3, 5 e 6 a explicitarem conhecimentos sobre o conceito de EE. O Estudante 5 não mobiliza nenhum conhecimento relacionado a esse conceito, enquanto os estudantes 3 e 6, possivelmente por não terem compreendido o funcionamento do espectrômetro, não conseguiram interpretar os dados conforme se esperava.

Na Figura 38, apresentamos o gráfico que resume os avanços e retrocessos dos estudantes com respeito ao conceito de EE.

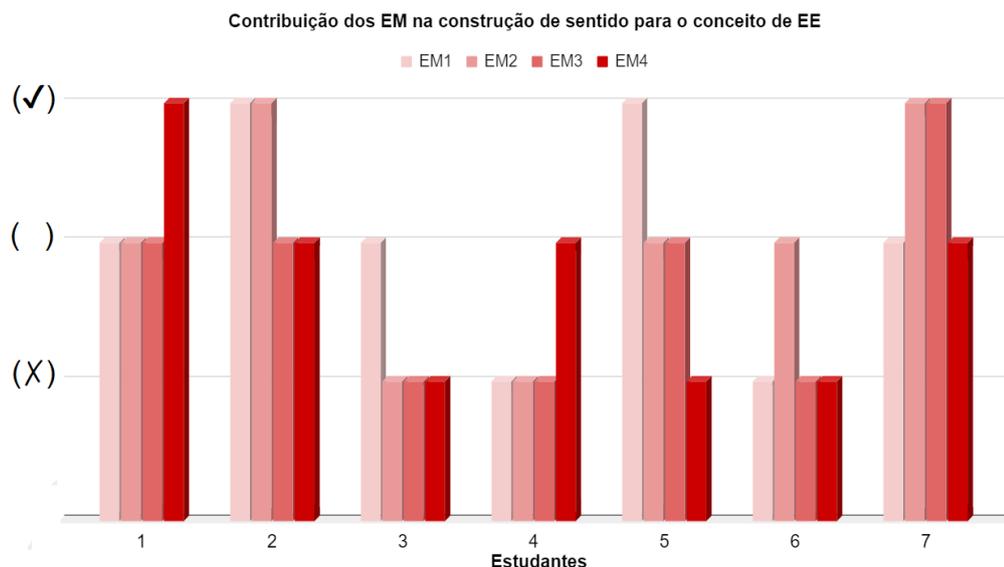


Figura 38 - Resumo dos resultados apresentados na seção.

Analisando a Figura 38, podemos observar, por exemplo, que os estudantes 3, 4 e 6 tiveram os maiores percalços para avançarem suas compreensões sobre o conceito de EE ao longo da disciplina. Já os estudantes 1, 2 e 7 foram os que tiveram maior facilidade na apreensão de tal conceito.

5.2.4 Resposta à segunda questão de pesquisa

As últimas subseções se destinaram a avaliar as potencialidades dos EM para auxiliar os estudantes a ampliarem seus domínios sobre os conceitos de MC, CV e EE. As situações analisadas foram aquelas que demandam a mobilização de conhecimentos relacionados a tais conceitos. Foi observado que, em acordo com o referencial teórico adotado, a operacionalização desses conceitos pelos estudantes nas diversas situações enfrentadas se deu por meio de um processo que corrobora as ideias de Vergnaud, que argumenta que o domínio de um campo conceitual não é linear, tendo avanços e retrocessos.

Até aqui nos concentramos em analisar detalhadamente as ações de cada estudante. Nesse processo, fomos rigorosos ao considerarmos as situações em que um EM contribuía para que o estudante manifestasse explicitamente os principais conhecimentos associados ao referido conceito da MDC+ quando realizava a investigação experimental. Nas situações em que o estudante deixava de explicitar algum conhecimento fundamental associado a esse conceito, concluímos que o EM auxiliou o estudante apenas em parte. Quando o estudante não evocava, ou o fazia apenas

minimamente, concluímos que o EM não contribuiu para que o estudante manifestasse explicitamente conhecimentos relacionado àquele conceito.

A partir de agora, para poder responder à segunda questão de pesquisa, buscaremos sintetizar as informações, fornecendo uma visão global sobre os resultados. O Quadro 11 resume tais resultados de forma categórica, para cada estudante, em cada EM, para cada conceito investigado. As cores verde (✓), amarela (sem símbolo) e vermelha (x) se referem às situações em que o EM “contribuiu”, “contribuiu timidamente” e “não contribuiu” para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados a algum conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+, respectivamente. A partir daqui, nos referimos a cada célula do Quadro 11 relativas à categorização da compreensão dos estudantes sobre os conceitos da MDC+ como uma “ocorrência”. Por exemplo, a célula na segunda coluna e terceira linha registra a ocorrência, isto é, o fato ocorrido, de que o EM 1 “não contribuiu” para que o Estudante 1 atribuisse sentido ao conceito de MC. No quadro, aparecem 84 ocorrências, 28 para cada conceito.

Quadro 11 - Resumo sobre os avanços e retrocessos dos estudantes na apreensão dos conceitos investigados na pesquisa, em cada EM.

Estudante	Modelo Científico				Controle de Variáveis				Evidência Experimental			
	EM1	EM2	EM3	EM4	EM1	EM2	EM3	EM4	EM1	EM2	EM3	EM4
1	x	x	✓			✓	x	✓				✓
2	x		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
3	x			x	✓		✓	x		x	x	x
4	x	✓		✓		✓	✓	x	x	x	x	
5	x	x	✓	x	x	x		x	✓			x
6	x	✓	x	x	x	✓	x	x	x		x	x
7	x	✓	✓	x	✓	✓		✓		✓	✓	

A análise do Quadro 11 permite identificar que, em cerca de 60% das ocorrências (51 de um total de 84), os EM contribuíram, mesmo que parcialmente, para que os estudantes ampliassem seus domínios sobre conceitos do campo conceitual da MDC+. Também podemos afirmar que, nas atividades enfrentadas pelos estudantes, houve pelo menos um EM que contribuiu, mesmo que de forma tímida, para que eles avançassem em cada um dos conceitos investigados.

Com relação ao conceito de MC, o Quadro 11 indica que em 14 das 28 ocorrências os EM contribuíram, mesmo que de forma tímida, para que os estudantes avançassem no domínio desse conceito. Dos quatro EM realizados, o primeiro foi o que os estudantes menos explicitaram conhecimentos relacionados a esse conceito. Entendemos que isso ocorreu porque, tendo esse sido o primeiro EM realizado pelos estudantes, muitos deles não tinham clareza sobre o papel dos modelos nas investigações experimentais, tendo em vista a longa tradição de realização de atividades fechadas, por meio de roteiros, que não fomentam a reflexão sobre os pressupostos teóricos subjacentes ao processo de construção dos modelos científicos. Também por não estarem

habituaados com a autonomia concedida nos EM, alguns estudantes possivelmente não se sentiam confortáveis, inicialmente, para planejar seus experimentos, algo comum em atividades de cunho mais aberto, como relatado na Seção 2.2. Verifica-se que três EM auxiliaram os estudantes 2 e 4 a avançarem no domínio do conceito de MC. Dois dos quatro EM auxiliaram os estudantes 1, 3 e 7 nesse mesmo aspecto. Os estudantes 5 e 6 avançaram em um dos EM propostos, apenas. Conforme discutido nas seções anteriores, em geral os alunos eram capazes de operacionalizar o MC de referência da investigação, medindo e calculando grandezas e parâmetros úteis para conduzir experimentos, porém, frequentemente, não explicitavam as simplificações da realidade assumidas no seu processo de construção, nem seu domínio de validade. Verifica-se que o EM 3 foi mais frutífero para fomentar avanços sobre o conceito do MC. Pelo Quadro 11, vemos que o EM 4 auxiliou pouco os estudantes a explicitarem nesse conceito, possivelmente porque, conforme discutido, tivemos que gastar muito tempo familiarizando os estudantes com aspectos operacionais da utilização do espectrômetro, de forma que discussões sobre o conceito de MC ficaram em segundo plano.

Passamos a analisar os resultados sobre o conceito de CV. Nesse caso, em 19 das 28 ocorrências os EM fomentaram a criação de situações que foram identificadas como positivas, tendo contribuído, mesmo que de forma tímida, para que os estudantes avançassem no domínio do conceito de CV. As evidências mostram que todos os EM foram frutíferos para auxiliar os estudantes 2 e 7 a ampliarem seus domínios sobre o conceito de CV. Os estudantes 1, 3 e 4 beneficiaram-se de três EM enquanto os estudantes 5 e 6 se beneficiaram de apenas um EM para avançar nesse conceito. As evidências apresentadas na Subseção 5.2.2 indicaram que os estudantes muitas vezes não explicitavam os procedimentos de CV realizados, isto é, tinham dificuldades em expressar os procedimentos que guiaram o delineamento experimental. Verifica-se que o EM 2 foi o mais adequado para favorecer que os estudantes explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de CV, enquanto o quarto EM foi o menos adequado nesse sentido.

Com relação ao conceito de EE, a inspeção do Quadro 11 mostra que em 18 das 28 ocorrências os EM contribuíram de alguma forma para que os estudantes dessem sentido ao conceito de EE. É possível afirmar que todos os EM auxiliaram os estudantes 1, 2 e 7 a avançar no domínio desse conceito. A análise dos dados mostra que três EM auxiliaram o Estudante 5 nesse aspecto enquanto apenas um EM auxiliou os estudantes 3, 4 e 6 a ampliarem seus domínios sobre o conceito de EE. Observamos na Subseção 5.2.3 que as maiores dificuldades dos estudantes com relação ao conceito de EE têm relação com: i) a construção de intervalos de confiança para as evidências por meio do tratamento estatístico dos dados experimentais coletados; ii) afirmações sem o respaldo empírico das investigações realizadas. Os EM 1 e 2 foram o mais adequados para auxiliar os estudantes a explicitarem conhecimentos relacionados ao conceito de EE, enquanto os EM 3 e 4 foram os menos adequados nesse sentido.

Em outra dimensão de análise dos resultados, podemos sintetizar as evidências a partir de cada um dos quatro EM em termos de suas contribuições para o avanço dos estudantes no domínio do campo conceitual da MDC+. Cada EM foi avaliado com relação aos conceitos de MC, CV e EE, para cada um dos sete estudantes. Portanto, o Quadro 11 registra 21 ocorrências por EM. Podemos

evidenciar que o EM 2 foi o que mais contribuiu para proporcionar situações que permitiram que os estudantes explicitassem, mesmo que de forma parcial, conhecimentos relacionados aos conceitos da MDC+, o que ocorreu em 16 das 21 ocorrências identificadas. O conceito mais privilegiado nesse aspecto foi o conceito de CV. Depois do segundo EM, o EM 3 foi o que mais contribuiu para que os estudantes dessem sentido aos conceitos da MDC+, tendo sido adequado em 15 das 21 ocorrências identificadas. O conceito mais favorecido foi o de MC. Já os EM 1 e 4 tiveram alguma contribuição em apenas 10 das 21 ocorrências, sendo que o conceito de CV foi o mais privilegiado em ambos os EM.

Portanto, as evidências mostram que os EM, na maior parte das vezes, auxiliam os estudantes a construírem sentido aos conceitos de MC, CV e EE por meio do enfrentamento de diferentes situações que fomentam a mobilização desses conceitos. Também verificou-se que conhecimentos relacionados a esses conceitos não são explicitados em todas as situações enfrentadas nos quatro EM, de forma que a trajetória de apreensão dos conceitos pelos estudantes foi marcada por avanços e retrocessos ao longo da disciplina. Por conta disso, consideramos que a segunda proposição teórica foi corroborada.

6 Considerações finais

Nesta dissertação de mestrado, exploramos as potencialidades e limitações dos EM para auxiliar estudantes de graduação na apreensão de conceitos do campo conceitual da Ótica e do campo conceitual da MDC+, no contexto de aulas experimentais. Especificamente, respondemos às seguintes questões de pesquisa:

Questão de pesquisa 1: *Como os EM podem contribuir para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da Ótica, favorecendo a amenização de dificuldades típicas dos estudantes na aprendizagem de conceitos físicos da Ótica?*

Questões de pesquisa 2: *Como os EM podem contribuir para que os estudantes deem sentido para conceitos da MDC+, em particular aos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental?*

Para responder a essas questões, realizamos uma consulta à literatura para identificar: i) o papel dos modelos e das atividades centradas no processo de modelagem no Ensino de Ciências; ii) as potencialidades e limitações das atividades experimentais na formação dos estudantes; e iii) as principais dificuldades dos estudantes no campo conceitual da Ótica. Resumidamente, concluímos que estudantes podem se beneficiar das atividades pautadas na modelagem científica quando se enfatiza o papel dos modelos como mediadores entre teorias e realidade. Em particular, atividades centradas na modelagem podem auxiliar os estudantes a amenizar a concepção comum de que modelos são descrições fiéis da realidade. Sobre as aulas experimentais, identificamos que os estudantes podem se beneficiar de tais atividades quando já possuem conhecimento prévio sobre o assunto a ser abordado e quando são vinculadas com eventos cotidianos. Também se destaca a importância de que as aulas possuam objetivos de aprendizagem bem definidos e um grau moderado de abertura, evitando com que os estudantes se sintam perdidos ou excessivamente dirigidos. Com relação às dificuldades sobre Ótica, identificamos que elas podem ser divididas em um nível geral e um específico. As dificuldades em nível geral estão vinculadas com aspectos como a linguagem e a experiência cotidiana do estudante. As de nível específico, listadas no Quadro 1 da Subseção 2.3.2, dirigiram as análises realizadas especificamente relacionadas com a primeira questão de pesquisa.

Com base nos estudos anteriores e no referencial teórico adotado, optamos por utilizar os EM como metodologia de ensino para embasar as atividades de modelagem no contexto do laboratório didático. Tais atividades têm cunho aberto e envolvem a resolução de problemas autênticos, possibilitando a criação de situações que têm potencial para dar sentido aos conceitos da MDC+. Foram delineados quatro EM para a realização desta pesquisa. Os conceitos da MDC+ enfatizados em cada uma das atividades foram: “expansão”, “modelo teórico de referência”, “controle de variáveis” e “medição”. Tais EM foram conduzidos em uma turma do turno noturno da disciplina de Física Experimental IV dos cursos de Física da UFRGS (para licenciandos e bacharelados), durante um semestre letivo. A pesquisa se constitui em um estudo empírico de natureza qualitativa.

Realizamos um estudo de caso explanatório incorporado, tendo selecionado sete estudantes de graduação pertencentes à turma em que os EM foram aplicados como unidades de análise. A turma em questão se constituiu no caso da pesquisa. Apesar de as situações experimentais fomentadas neste estudo terem sido avaliadas em apenas quatro EM com os sete estudantes selecionados, entendemos que a validade dos seus resultados vai além do contexto da investigação, já que as disciplinas de Física Experimental e o perfil do estudante de Física são semelhantes nas Universidades brasileiras.

Para responder à primeira questão de pesquisa, avaliamos se, durante os EM, os estudantes foram defrontados com situações que têm potencial para dar sentido a conceitos do campo conceitual da Ótica. Comparamos os significados atribuídos pelos estudantes aos conceitos desse campo conceitual com os conceitos que são, tipicamente, de difícil apreensão. Consideramos que os EM auxiliaram os estudantes quando esses significados eram compatíveis com a definição científica atribuída aos conceitos. Como resultado da pesquisa, evidenciamos que os EM fomentaram a criação situações que demandaram a mobilização de diversos conceitos do campo conceitual da Ótica, sendo algumas delas tipicamente associadas com dificuldades comuns. Essas situações foram associadas aos conceitos do Quadro 10 da Subseção 5.1.5. Mesmo que as evidências indiquem que os EM contribuíram para que diversos estudantes amenizassem essas dificuldades, contribuindo para o avanço no domínio do campo conceitual da Ótica, houve dificuldades que não puderam ser amenizadas, principalmente as relacionadas com a natureza ondulatória da luz.

Para responder à segunda questão de pesquisa, avaliamos se os estudantes mobilizam conhecimentos relacionados aos conceitos da MDC+, em particular os conceitos de “modelo científico”, “controle de variáveis” e “evidência experimental”, nas situações em que eles são demandados. Admitimos que o processo de apreensão dos conceitos é um processo gradual, marcado por avanços e retrocessos. De fato, os resultados mostraram que a trajetória dos estudantes não foi linear nesse aspecto. Foi observado que, mesmo os estudantes que demonstraram dominar um conceito em uma situação, mobilizando conhecimentos pertinentes em um EM, frequentemente retrocediam em outro EM. De forma análoga, houve estudantes que demonstravam baixo domínio sobre um dado conceito em um EM, porém em outra situação mostravam avanço. As evidências mostraram que, por meio dos EM, os estudantes enfrentaram situações que foram frutíferas para proporcionar avanço gradual no domínio dos conceitos de MC, CV e EE. Assim, a maior contribuição dos EM foi a criação das situações: por meio delas, de acordo com o referencial teórico adotado, os estudantes puderam atribuir sentido aos conceitos da MDC+.

As limitações, do ponto de vista da exequibilidade dos EM, dizem respeito principalmente: i) ao tempo despendido na aplicação da metodologia, que é maior do que nas atividades tradicionais; e ii) à necessidade de materiais específicos para que os problemas propostos possam ser atacados. Do ponto de vista metodológico, a principal limitação deste estudo está no seu enfoque nas evidências de manifestações explícitas de conhecimento operatório dos estudantes. Como foi constatado em diversas situações, os estudantes manifestavam domínio operacional sobre conhecimentos da MDC+, porém, frequentemente, não justificavam ou externalizavam suas ações, uma evidência de

que conhecimentos operatórios implícitos possivelmente estavam presentes na estrutura cognitiva do estudante. Entretanto, optamos por centrar nossa análise nas situações em que o EM fomentava manifestações explícitas desses conhecimentos, sendo esse aspecto uma limitação do estudo.

Como implicações desta pesquisa em Ensino/Educação em Ciências, podemos destacar que, por meio das evidências apresentadas, conseguimos mobilizar tanto conhecimentos físicos como epistemológicos sobre a Ciência, tendo sido esse um dos principais méritos dos EM: a promoção de condições para que os alunos mobilizassem tais conhecimentos. Como conhecimentos físicos trabalhados, podemos destacar os modelos de atenuação da luz pelos meios materiais, os processos de interação da luz polarizada com a matéria, a dependência do índice de refração dos materiais com diferentes parâmetros e a difração em redes como um instrumento para medidas espectrais. Como conhecimentos epistemológicos, destacamos as contribuições dos EM na difusão de concepções mais adequadas sobre a natureza da ciência e da construção do conhecimento científico, chamando atenção, principalmente, sobre o papel representacional dos modelos científicos e sobre o processo de modelagem.

Por fim, encerramos esse estudo fazendo proposições gerais para investigações futuras. Observou-se uma dificuldade, por parte dos estudantes, em apreender o significado físico do coeficiente de atenuação da luz, embora essa não seja uma dificuldade relatada na literatura. Todos os participantes da pesquisa demonstraram entender, de forma equivocada, que a atenuação da luz se deve apenas à "absorção", ignorando o fenômeno do espalhamento embutido no coeficiente de atenuação. Mais estudos seriam necessários para investigar como essa dificuldade pode ser mitigada. As investigações realizadas também não permitem identificar como os EM podem contribuir para que os estudantes tenham uma melhor compreensão sobre conceitos de Ótica geométrica que são de difícil apreensão, já que nenhum deles envolvia a mobilização explícita desses conceitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAMS, I.; MILLAR, R. Does practical work really work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school Science. **International Journal of Science Education**, Philadelphia, v. 30, n. 14, p. 1945-1969, Nov. 2008.
- ADÚRIZ-BRAVO, A. A 'semantic' view of scientific models for science education. **Science & Education**, New York, v. 22, n. 7, p. 1593-1611, July 2013.
- AGNES, D.; KANIAWATI, I.; DANAWAN, A. Analisis Deskriptif Tes Tiga Tingkat Materi Optika Geometri dan Alat Optik [Descriptive Analysis Three-Tier Test Geometry Optics and Optical Instruments]. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains*, p. 597-600, 2015.
- ALLEN, M. *Misconceptions in primary science*. UK: McGraw-Hill Education, 2014.
- AMBROSE, B. S.; HERON, P. R.; VOKOS, S.; McDERMOTT, L. C. Student understanding of light as an electromagnetic wave: relating the formalism to physical phenomena. **American Journal of Physics**, v. 67, n. 10, p. 891-898, jan. 1999.
- ANDRÉS, M. M.; PESA, M.; MOREIRA, M. A. El trabajo de laboratorio en cursos de Física desde la Teoría de Campos Conceptuales. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 12, n. 2, p. 129-142, ago. 2006.
- BARAB, S., HAY, K.; BARNETT, M.; SQUIRE, K. Constructing virtual worlds: Tracing the historical development of learner practices. **Cognition and Instruction**, v. 19, n. 1, p. 47-94, 2001.
- BAROLLI, E.; LABURÚ, C. E.; GUIRIDI, V. M. Laboratorio didáctico de ciencias: caminos de investigación. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 9, n. 1, p. 88-110, jan. 2010.
- BLIZAK, D.; CHAFIQI, F.; KENDIL, D. Students misconceptions about light in Algeria. In: *Education and Training in Optics and Photonics*, United Kingdom, p.1-8, 2009.
- BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 3, p. 291-313, 2002.
- BOULTER, C. J.; GILBERT, J. K. Challenges and opportunities of developing models in science education. **Developing models in science education**, New York: Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 343-362.
- BRANDÃO, R. V. (2012) A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no ensino de Física. (Tese de Doutorado em Ensino de Física - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre).
- BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica de fenômenos físicos e o ensino de física. **A Física na Escola**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 10-14, maio 2008.
- _____. A modelagem científica vista como um campo conceitual. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 3, p. 507-545, dez. 2011.
- BREWE, E.; SAWTELLE, V. Modelling instruction for university physics: Examining the theory in practice. **European Journal of Physics**, v. 39, n. 5, p. 054001, june 2018.
- BUFFLER, A.; LUBBEN, F.; IBRAHIM, B. The relationship between students' views of the nature of science and their views of the nature of scientific measurement. **International Journal of Science Education, Philadelphia**, v. 31, n. 9, p. 1137-1156, June 2009.
- BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1974.
- _____. **Epistemologia: Curso de atualização**. São Paulo: Editora da USP, 1980.
- _____. **La investigación científica: Su estrategia e su filosofía**. Barcelona: Editora Ariel, 1989.

_____. **Caçando a realidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 2010.

CIE. The Basis of Physical Photometry — Technical Report, Commission Internationale de l'Eclairage, Vienna (2019).

COLL, R.; LAJIUM, D. Modeling and the future of Science learning. In: Khine, M. S.; Saleh, I. M. (Eds.). **Models and modeling: Cognitive tools for scientific enquiry**. New York: Kluwer Academic Publishers, p. 3-21, 2011.

CONSTANTINO, C.P. The Cocoa microworld as an environment for modeling physical phenomena. **International Journal of Continuing Education and Life-Long Learning**, v. 8, n. 2, p. 65–83, 1999.

COLIN, P.; VIENNOT, L. Using two models in optics: Student's difficulties and suggestion for teaching. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 7, p. 36 - 44 , oct. 2000.

DAY, C. Why didn't I became an experimental physicist. Disponível em: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.5.010313/full/>. Acesso em: 01 mar. 2020.

DEACON, C.; HAJEK, A. Student perceptions of the value of physics laboratories. **International Journal of Science Education**, Philadelphia, v. 33, n. 7, p. 943-977, May 2011.

DEVETAK, I.; VOGRINE, J.; GLAZAR, S. A. Assessing 16 year old student's understanding of aqueous solution at submicroscopic level. **Research in Science Education**, v. 39, n. 2, 157–179, 2007.

DIOGO, R.C.; GOBARA, S. T. Educação e ensino de ciências naturais/física no brasil: do brasil colônia à era vargas. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, v. 89, n.222, p. 365-383, ago. 2008.

DJANETTE, B. FOUAD, C. Determination of university students' misconceptions about light using concept maps. **Social and behavioral Sciences**, v. 152, n.1, p. 582-589, 2014.

DOUNAS-FRAZER, D. R.; LEWANDOWSKI, H. J. The Modelling Framework for Experimental Physics: Description, development, and applications. **European Journal of Physics**, v. 39, n. 6, october 2018.

FARIYANI, Q.; RUSILOWATI, A.; SUGIANTO. Four-tier diagnostic test to identify misconceptions in geometrical optics. **Unnes Science Education Journal**, v. 6, n. 3, p. 1724-1729, 2017.

FRETZ, E.; WU H.; ZHANG B.; DAVIS E.; KRAJCIK J.; SOLOWAY E. An investigation of software scaffolds supporting modeling practices. **Research in Science Education**, v. 32, n. 4, p. 567–89, 2002.

GABEL, D. The complexity of chemistry and implications for teaching. **International handbook of science education**, v. 1, n.1, p. 233-248, 1998.

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

GASPAR, A. Cinquenta anos de ensino de física: muitos equívocos, alguns acertos e a necessidade de recolocar o professor no centro do processo educacional. **Educação: revista de estudos da educação**, v.13, n. 21, p. 71-91, dez. 2004.

GILBERT, J. Models and modelling: Routes to more authentic science education. **International Journal of Science and Mathematics Education**, New York, v. 2, n. 2, p. 115-130, Jun 2004.

GUDYANGA, E.; MADAMBI, T. Pedagogics of chemical bonding in Chemistry; perspectives and potential for progress: The case of Zimbabwe secondary education. **International Journal of Secondary Education**, v. 2, n. 1, p. 11-19, 2014.

GUILLO, A.; SÉRÉ, M. The Role of Epistemological Information in open-ended Investigative Labwork. In: Psillos, D.; Niedderer, H. (Eds.). Teaching and learning in science laboratory. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002, p. 121-138.

HALLIDAY & RESNICK. Fundamentos de Física – Ótica e Física Moderna, vol. 4. (8ª ed.). São paulo: LTC, 2009.

HAMMER, D. More than misconceptions: Multiple perspectives on student knowledge and reasoning, and an appropriate role for education research. **American Journal of Physics**, v. 64, n. 10, p.1316-1325, 1996.

HAMBURGER, E.W. et al. Educação para a Ciência: Curso para Treinamento em Centros e Museus de Ciência (São Paulo, Editora Livraria da Física, 2001).

HANSEN, J.A.; BARNETT, M.; MAKINSTER, J.G.; KEATING, T. The impact of three-dimensional computational modelling on students' understanding of astronomy concepts: A qualitative analysis. **International Journal of Science Education**, v. 26, n. 11, p. 1365–78, 2004.

HECHT, E. Optics. London: Addison Wesley, 4ªEd., 2002.

HEIDEMANN, L. A. Crenças e atitudes sobre o uso de atividades experimentais e computacionais no ensino de física por parte de professores do ensino médio. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Modelagem Didático-científica: integrando atividades experimentais e o processo de modelagem científica no ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 3–32, 2016.

HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Dificuldades e avanços no domínio do Campo Conceitual da Modelagem Didático-científica: um estudo de caso em uma disciplina de Física experimental. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 23, n. 2, p. 352–382, 2018.

HENZE, I.; VAN DRIEL, J. H.; VERLOOP, N. The change of science teachers' personal knowledge about teaching models and modelling in the context of science education reform. **International Journal of Science Education, London**, v. 29, n. 15, p. 1819-1846, Dec. 2007.

HESTENES, D. Modeling games in the Newtonian World. **American Journal of Physics**, v. 60, n. 8, p. 732–48, 1992.

HESTENES, D. Modeling methodology for physics teachers. In: The changing role of physics departments in modern universities: Proceedings of International Conference on Undergraduate Physics Education, ed. E.F. Redish and J.S. Rigden, 935–57. **The American Institute of Physics**, New York, 1997.

HESTENES, D. Notes for a Modeling Theory of Science, Cognition and Instruction. In: GIREP CONFERENCE: MODELLING IN PHYSICS AND PHYSICS EDUCATION, Amsterdam, Netherlands, 2006.

HODSON, D. In search of a meaningful relationship: An exploration of some issues relating to integration in science and science education. **International Journal of Science Education**, Philadelphia, v. 14, n. 5, p. 541–562, May 1992.

HOLMES N. G.; WIEMAN C. E. Introductory physics labs: we can do better. **Physics today**, v. 71, n. 1, p.38-45, 2018.

HODSON, D. Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v.12, n.3, p. 299-313, nov.1994.

HOFSTEIN, A.; LUNETTA, V. N. The laboratory in science education: foundations for the twenty-first century. **Science Education**, New York, v. 88, n.1, 28-54, Jan. 2004.

JOHN, M. J. Thermo-optic Coefficients of Some Standard Reference Material Glasses. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 74, n. 7, p. 1689-1691, 1991.

JUSTI, R.; GILBERT, J.K. History and philosophy of science through models: The case of chemical kinetics. **Science and Education**, v. 8, n. 2, p. 287–307, May 1999.

KALTAKCI, D.; ERYILMAZ, A. Sources of Optics Misconceptions. In: ESERA Conference - Contemporary Science Education Research: Learning and Assessment, Istanbul, p. 13-16, 2009.

KALTAKCI, G. D.; ERYILMAZ, A.; MCDERMOTT, L. C. Identifying pre-service physics teachers' misconceptions and conceptual difficulties about geometrical optics. **European Journal of Physics**, v. 37, n.4, p.1-30, 2016.

- KAPRAS, S; QUEIROZ, G.; COLINVAUX, D.; FRANCO, C. Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 2, n. 3, p. 185–205, 1997.
- KASAROVA, S. N.; SULTANOVA, N. G.; NIKOLOV, I. D. Temperature dependence of refractive characteristics of optical plastics, *Journal of Physics: Conference Series* 253, 2010.
- KOPONEN, I. T. Models and modelling in Physics Education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. **Science & Education**, New York, v. 16, n. 7, pp. 751- 773, Aug. 2007.
- KOSTINSKI, A. B. On the extinction of radiation by homogeneous but spatially correlated random medium. **Optical Society of America**, v. 18. n. 8, p. 1929-1933, 2001.
- LEDERMAN, N. G. Nature of Science: Past, present, and future. In: Abell, S. K.; LEDERMAN, N. G. (Eds.). **Handbook of research on science education**. New York: Routledge, 2006, p. 831-879.
- LEHRER, R.; SCHAUBLE, L. Scientific thinking and scientific literacy: Supporting development in learning in context. In: *Handbook of Child Psychology*, 6th ed., W. Damon, R.M. Lerner, K.A. Renninger, and I.E. Sigel, Vol. 4, 153–96. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2006.
- LESH, R.; HOOVER, M. HOLE, B. KELLY, A.; POST. T. Principles for developing thought revealing activities for students and teachers. In: *The handbook of research design in mathematics and science education*, ed. A. Kelly and R. Lesh, 591–646. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 2000.
- LING, T. W. Fostering Understanding and Reducing Misconceptions about Image Formation by a Plane Mirror Using Constructivist-Based Hands-on Activities. In: *Overcoming Students' Misconceptions in Science* (pp. 203-222). Springer Singapore, 2017.
- LOUCA, L; ZACHARIA, Z. Modeling-based learning in Science education: cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions. **Educational Review**, Philadelphia, v. 64, n. 4, p. 471-492, Nov. 2012.
- LORRAIN, P. *Eletromagnetic fields and waves*. New York: W. H. Freeman and Company, 1988.
- METCALF, S.; KRAJCIK, J.; SOLOWAY, E. Model-it: A design retrospective. In *Innovations in science and mathematics education: Advanced designs for technologies in learning*, ed. M. Jacobson and R.B. Kozma, 77–116. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 2000.
- MOREIRA, M. A. Ensino de física no brasil: Retrospectivas e Perspectivas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n.1, p. 94-99, 2000.
- MOREIRA M. A. Grandes desafios para o ensino de física na educação contemporânea. **Revista do Professor de Física**, v. 1, n. 1, p.1-13, 2017.
- MONTINO, M.; PETRUCCI, D.; URE, J. E.; ALEMAN, A.; PÉREZ, S. M. Una propuesta de trabajos prácticos de laboratorio que favorece el aprendizaje de conceptos. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 17, n. 4, p. 823-833, dez. 2011.
- OH, P. S.; OH, S. J. What teachers of science need to know about models: An overview. **International Journal of Science Education**, Philadelphia, v. 33, n. 8, p. 1109-1130, May 2011.
- OLIVEIRA, V.; ARAUJO, I.; VEIT, E. Resolução de problemas abertos no ensino de física: uma revisão da literatura. **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 3, e3402, 2017.
- OTERO, M. R. Emociones, sentimientos y razonamientos en didáctica de las Ciencias. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, Tandil, v. 1, n. 1, p. 24-53, oct. 2006.
- PALACIOS, F. J.; CAZORLA, F. N.; CERVANTES, A. M. Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. **International Journal of Science Education**, v. 11, n. 3, p. 273-286, 1989.
- PAPAEVRIPIDOU, M.; CONSTANTINO, C.; ZACHARIA, C. 2009. An approach for developing teacher's curricular knowledge about modeling-based learning. Paper presented at the American Educational Research Association Conference (AERA), April, in San Diego, USA.

PARREIRA J. E.; DICKMAN A.G. Objetivos das aulas experimentais no ensino superior na visão de professores e estudantes da engenharia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 42, e20200096, 2020.

PERALES, F. J.; NIEVAS, F. C. & CERVANTES, A. M. Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. **International Journal of Science Education**, v. 11, n. 3, p. 273-286, 1989.

PEREIRA, M. V.; MOREIRA, M. C do A.. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 265-277, abr. 2017.

PINHO-ALVES, J. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 17, n. 2, p. 174-188, 2000.

PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 213–227, 1999.

POMPEA, M.; DOKTER, F.; WALKER, E.; SPARKS, T. Using misconceptions research in the design of optics instructional materials and teacher professional development programs. In: Education and Training in Optics and Photonics, Ontario, p. 338 –345 (2007).

PRIMAK, W.; POST, D. Photoelastic constants of vitreous silica and its elastic coefficient of refractive index. **Journal of Applied Physics**, v. 30, n. 5, p. 779–788, 1959.

QING X. R.; BETHANY R. W.; STEVEN J. P. Student Difficulties with boundary conditions in the context of electromagnetic waves. **Physical review physics education research**, v. 14, n. 2, p. 1-14, dez. 2018.

RAVILOLO, A.; AGUILAR, A.; RAMÍREZ, P.; LÓPEZ, E. Dos analogías en la enseñanza del concepto de modelo científico: Análisis de las observaciones de clase. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Tandil, v. 6, n. 1, p. 61-70, julio. 2011.

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

SMITH, E. M. et al. Direct Measurement of the Impact of Teaching Experimentation in Physics Labs. **Physical Review X**, v. 10, n. 1, p. 011029, 2020.

SRISAWASDI, N.; KROOTHKEAW S. Supporting students conceptual development of light refraction by simulation-based open inquiry with dual-situated learning model. **Journal of Computers & Education**, v.1, n. 1, p. 49-79, 2014.

STRATFORD, S.J.; KRAJCIK, J.; SOLOWAY, E. Secondary student's dynamic modeling processes: Analyzing, reasoning about, synthesizing, and testing models of stream ecosystems. **Journal of Science Education and Technology**, v.7, n. 3, p. 215–34, 1998.

TRUMPER, R. The physics laboratory – A historical overview and future perspectives. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 7, p. 645-670, October 2003.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. In: Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro, 1, 1993, Rio de Janeiro. p. 1-26, 1993.

_____. A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. *Revista do GEMPA*, Porto Alegre, n. 4, p. 9-19, 1996

_____. Towards a cognitive theory of practice. In: Kilpatrick, J.; Sierpiska, A. K. (Eds.). *Mathematics Education as a Research Domain: a search of identity*. New York: Kluwer Academic Publishers, p. 227-240, 1997.

_____. A comprehensive theory of representation for mathematics education. **Journal of Mathematical Behavior**, Amsterdam, v.17, n. 2, p.167-181, 1998.

_____. The theory of conceptual fields. **Human Development**, Basel, v. 52, n. 2, p. 83- 94, 2009.

_____. Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 287-304, 2012.

_____. Conceptual development and learning. **Revista Qurriculum**, San Cristóbal de La Laguna, v. 26, p. 39-59, marzo 2013a.

_____. ¿Por qué la teoría de los campos conceptuales? **Infancia y Aprendizaje**, Madrid, v. 36, n. 2, p. 131-161, 2013b.

VOLKWYN, T. S.; ALLIE, S.; BUFFLER, A.; LUBBEN, F. Impact of a conventional introductory laboratory course on the understanding of measurement. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, College Park, v. 4, n. 1, 010108 10p., July 2008.

YALCIN, M.; ALTUN, A.; TURGUT, U; AGGÜL, F. First Year Turkish Science Undergraduates' Understandings and Misconceptions of Light. **Science & Education**. v. 18, n. 8, p. 1083-1093, Jul. 2009.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. (3ª ed.). Porto Alegre: Bookman, 2005. _____. **Qualitative research from start to finish**. New York: The Guilford Press, 2011.

WAHYUNI, A. S. RUSTAMAN, N.; RUSDIANA, D.; MUSLIM. Analyze of conceptions and misconceptions on pre-service teacher about light. In: *Journal of Physics: Conference Series*, Indonesia, p.1-6, 2019.

WEBER, R.; HEIDEMANN, L. A.; VEIT, E. A. Atenuação da luz em meios materiais: uma atividade de modelagem envolvendo três experimentos didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20200229 (2020).

WEBER, R.; HEIDEMANN, L. A.; VEIT, E. A. Um experimento didático potencialmente instigante envolvendo a reflexão da luz em um caso aparentemente misterioso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Submetido.

WHITE, B. ThinkerTools: Causal models, conceptual change, and science education. **Cognition and Instruction**, v. 10, n. 1, p. 1–100, 1993.

WIDIYATMOKO, A.; SHIMIZU, K. Literature Review of Factors Contributing to Students' Misconceptions in Light and Optical Instruments. **International Journal of Enviromental & Science Education**, Los Angeles, v. 13, n. 10, p. 853-863, 2018.

WILCOX B. R.; LEWANDOWSKI H. J. Developing skills versus reinforcing concepts in physics labs: Insight from a survey of students' beliefs about experimental physics. **American Physical Society**, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2017.

WINDSCHITL, M.; THOMPSON J.; BRAATEN M. Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. **Science Education**, 92, p. 941–67, 2008.

ZU BELZEN, A. U.; KRÜGER, D.; VAN DRIEL, J. **Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education** (Vol. 2), Switzerland, Springer, 2019.

Apêndice A - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”

Modelo de Beer-Lambert

Considere uma fonte de luz que emite um feixe colimado, que incide perpendicularmente em uma seção de comprimento “ dx ” de um material, conforme a Figura 1. Ao atravessar a região de espessura dx , a luz interage com os elementos constituintes do material, representados por círculos escuros na figura. Aqui usamos a denominação genérica “elementos” para representar átomos ou moléculas.

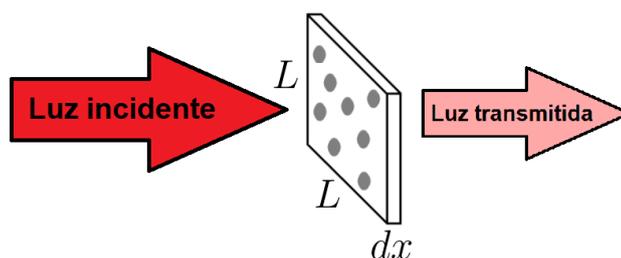


Figura 1 - Luz colimada incidindo normalmente em uma seção do material. A intensidade da luz transmitida é menor que a incidente.

A situação esquemática representada na Figura 1 poderia representar a interação da luz proveniente de um laser com a matéria, por exemplo. Consideramos que a luz pode sofrer absorção ou espalhamento pelos elementos do material e admite-se as seguintes hipóteses:

1. A reemissão de luz, decorrente da absorção, não contribui para o feixe original.
2. A luz espalhada não volta a contribuir com o feixe original.
3. Meio material é homogêneo e não é alterado pela incidência de luz.

A área da seção de material é L^2 e o número de elementos dentro da seção pode ser obtido pela expressão $nL^2 dx$, onde n é o número de elementos por unidade de volume do material ($[n]=m^{-3}$). A probabilidade dp da luz do feixe interagir com algum elemento da seção do material, sofrendo absorção ou espalhamento é igual à fração da área do material ocupada pelos mesmos, isto é:

$$dp = \frac{\sigma n L^2 dx}{L^2} = \sigma n dx, \quad \text{Eq. 1}$$

onde σ é a “área” de um elemento, isto é, sua seção de choque transversal¹⁵. Mesmo que o material fosse composto por vários elementos, cada um com diferentes áreas e densidades, ainda poderíamos escrever a Eq. 1 somando suas contribuições individuais por meio de uma seção de choque equivalente/efetiva dada por $\sigma = \sigma_1 n_1 + \sigma_2 n_2 \dots$. A mudança dE_V na iluminância (E_V) que entra na seção de espessura dx do material depende justamente de dp , tal que:

$$dE_V = -E_V dp = -E_V \sigma n dx. \quad \text{Eq. 2}$$

O sinal negativo se justifica porque a iluminância diminui quando a luz interage com a matéria. Podemos resolver a equação diferencial ordinária acima integrando em algum intervalo de comprimento $[0, x]$ de material, considerando que $E_V(x=0) = E_{V_0}$. Obtemos a seguinte expressão:

$$\int_{E_{V_0}}^{E_V} \frac{dE_V}{E_V} = -\sigma n \int_0^x dx \Rightarrow \ln(E_V) - \ln(E_{V_0}) = -\sigma n x$$

$$E_V(x) = E_{V_0} e^{-\sigma n x}. \quad \text{Eq. 3}$$

A Eq. 3 é conhecida como **Lei de Beer-Lambert**. Apesar da extinção da luz ao longo do meio material acontecer de maneira não determinística, pode-se calcular a distância média \bar{x} percorrida pela luz antes de sofrer absorção ou espalhamento através do valor esperado (ou simplesmente a média) da posição onde esses eventos ocorrem. Para realizar esse cálculo, precisamos conhecer a probabilidade dp' da luz ser absorvida ou espalhada ao longo de todo material, o que pode ser feito, de maneira análoga à Eq. 2, calculando a fração (positiva) da luz extinta $|dE_V|$ em cada ponto do material em relação à iluminância inicial E_{V_0} :

$$dp' = \frac{|dE_V|}{E_{V_0}}.$$

Derivando a Eq. 3 em relação a x e substituindo na relação acima, temos:

$$dp' = \sigma n e^{-\sigma n x} dx. \quad \text{Eq. 4}$$

A Eq. 4 indica que a probabilidade de interação da luz com a matéria (por meio de absorção ou espalhamento) diminui com a distância, pois a iluminância diminui à medida que a luz passa pelo meio. Dessa forma, considerando x uma variável aleatória que especifica a posição onde a luz é extinta e dp' a probabilidade da mesma ser extinta no intervalo

¹⁵ Deve-se ter cuidado com a expressão “do material”, já que, assim como o índice de refração “dos materiais”, a seção de choque depende do comprimento de onda incidente.

$[x, x+dx]$, podemos calcular a média de x , isto é, \bar{x} , através da definição do valor esperado de uma variável aleatória:

$$\bar{x} = \int_0^{\infty} x dp' = \sigma n \int_0^{\infty} x e^{-\sigma n x} dx = \sigma n \left(-\frac{x e^{-\sigma n x}}{\sigma n} \Big|_0^{\infty} + \frac{1}{\sigma n} \int_0^{\infty} e^{-\sigma n x} dx \right)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{\sigma n}.$$

Já que, em média, a luz é espalhada ou absorvida em torno da posição $(\sigma n)^{-1}$, convencionou-se definir essa grandeza como o **livre caminho médio**, ou **distância de atenuação** D , isto é:

$$D = \frac{1}{\sigma n}. \quad \text{Eq. 5}$$

É comum definir o **coeficiente de atenuação linear**¹⁶ μ como

$$\mu = \frac{1}{D} = \sigma n. \quad \text{Eq. 6}$$

Utilizando a Eq. 6, podemos escrever a Lei de Beer-Lambert (Eq. 3) na forma:

$$E_V(x) = E_{V_0} e^{-\mu x}. \quad \text{Eq. 7}$$

Na literatura, é comum fazer a distinção entre o coeficiente de absorção μ_A e espalhamento μ_E , de forma que o coeficiente de atenuação linear é a soma $\mu = \mu_A + \mu_E$. Existem instrumentos sofisticados capazes de medir tais grandezas isoladamente, porém, com os instrumentos didáticos disponíveis em laboratórios de ensino, comumente só conseguimos determinar a atenuação total da luz levando em consideração ambos os efeitos.

E se a fonte de luz não for colimada? Uma lâmpada de bulbo, por exemplo, não pode ser considerada uma fonte de luz que produz raios de luz com trajetórias paralelas: esse tipo de fonte de luz está mais próximo do que entendemos por *fonte pontual*, de forma que a Eq. 7 não descreve a atenuação sofrida pela luz proveniente de uma fonte desse tipo! Para tratar desta situação, considere a Figura 2, onde uma fonte pontual isotrópica está imersa em um meio atenuante, como o ar, por exemplo.

¹⁶ É comum utilizar o coeficiente de atenuação mássico (unidade igual a m^2/kg) ao invés do coeficiente linear. Para converter do coeficiente de atenuação mássico para o linear, basta multiplicá-lo pela densidade do meio.

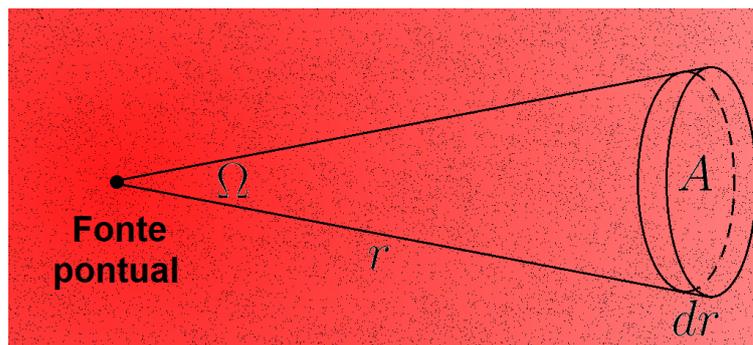


Figura 2 - Fonte pontual imersa em um meio material. A luz contida no ângulo sólido Ω atravessa a área A caso não seja absorvida ou espalhada pelo meio. A luz fora do ângulo sólido pode atravessar a área caso sofra espalhamentos múltiplos, porém esse efeito não é considerado pelo modelo

Diretamente da definição, podemos afirmar que um detector (luxímetro) com área A colocado a uma distância r de uma fonte pontual mediria uma iluminância dada por:

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} = \frac{\Phi_v}{\Omega r^2}, \quad \text{Eq. 8}$$

onde Φ_v é o fluxo luminoso que saiu da fonte pelo ângulo sólido Ω , cuja área é $A = \Omega r^2$. À medida que a luz se propaga, a iluminância diminui, tanto pela absorção e espalhamento quanto pela distribuição da radiação por uma área maior. Para descrever a mudança na iluminância, tomamos o diferencial total na Eq. 8:

$$dE_v = \frac{\partial}{\partial \Phi_v} \left(\frac{\Phi_v}{\Omega r^2} \right) d\Phi_v + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Phi_v}{\Omega r^2} \right) dr$$

$$dE_v = \frac{d\Phi_v}{\Omega r^2} - \frac{2\Phi_v dr}{\Omega r^3}. \quad \text{Eq. 9}$$

Neste ponto, podemos fazer uma dedução análoga da lei de Beer-Lambert para o caso de fonte de luz colimada. A probabilidade dp da luz ser absorvida ou espalhada ao passar pelo elemento de volume $dV = A dr$ na Figura 2 é

$$dp = \frac{\sigma n A dr}{A} = \sigma n dr = \mu dr,$$

onde o foi utilizado a Eq. 6. Analogamente ao que foi feito na Eq. 2, a variação no fluxo luminoso ao atravessar o volume dV pode ser calculada pela expressão $d\Phi_V = -\Phi_V dp = -\Phi_V \mu dr$. Utilizando esse resultado na Eq. 9, temos:

$$dE_V = \frac{-\Phi_V}{\Omega r^2} \left[\mu + \frac{2}{r} \right] dr.$$

Observe que o termo fatorado é a Iluminância no ponto onde está o detector (Eq.8), logo:

$$dE_V = -E_V \left[\mu + \frac{2}{r} \right] dr,$$

$$\int_{?}^{E_V} \frac{dE_V}{E_V} = -\mu \int_{?}^r dr - 2 \int_{?}^r \frac{dr}{r}.$$

Os limites de integração da primeira e terceira integral são um problema, já que, pela definição (Eq. 8), a iluminância a uma distância $r=0$ (na fonte) é infinita e a solução da integral diverge nesses limites. Por isso, para realizar a integração é conveniente escolher uma distância inicial r_0 tal que a atenuação da luz pelo meio seja desprezível. Nessa distância, a iluminância é E'_V , conforme a Figura 3.

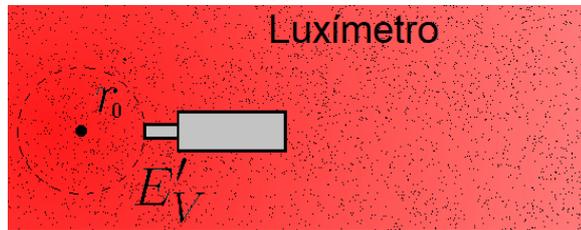


Figura 3

Assim, os limites de integração ficam:

$$\int_{E'_V}^{E_V} \frac{dE_V}{E_V} = -\mu \int_{r_0}^r dr - 2 \int_{r_0}^r \frac{dr}{r},$$

$$\ln \left(\frac{E_V}{E'_V} \right) = -\mu(r - r_0) - 2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right),$$

$$E_V = \frac{E'_V r_0^2}{r^2} e^{-\mu(r-r_0)}. \quad \text{Eq. 10}$$

A Eq. 10 pode ser escrita de forma mais elegante em termos do fluxo luminoso¹⁷ Φ_{V_0} (medido em *lumens*) emitido pela fonte pontual. Considere o limite da Eq. 10 para $r_0 \rightarrow 0$: nesse

¹⁷ As lâmpadas fluorescentes e LED vendidas atualmente trazem essa informação nas especificações técnicas.

caso, já que não existe atenuação muito próximo da fonte, a potência luminosa por unidade de área (medida pelo detector) pode ser calculada como a potência luminosa total emitida pela fonte dividida pela área de uma esfera de raio r_0 , isto é:

$$E'_v = \frac{\Phi_{V_0}}{4\pi r_0^2},$$

de forma que a Eq. 10 se torna:

$$E_v(r) = \frac{\Phi_{V_0}}{4\pi r^2} e^{-\mu r}. \quad \text{Eq. 11}$$

Portanto, se temos uma fonte luminosa colimada, podemos utilizar um luxímetro para descrever a atenuação da luz pelo meio através da equação 7. Se lidamos com uma fonte pontual podemos utilizar a equação 11.

Referências:

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_free_path (último acesso em 24/08/2019)
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/menfre.html> (último acesso em 24/08/2019)
- [3] <https://plus.maths.org/content/os/issue13/features/garbett/index> (último acesso em 24/08/2019)
- [4] Giampietro C., Roberto G. *Towards a Generalized Beer-Lambert Law. Institute of Atmospheric Science and Climate, Italian National Research Council (CNR), 00133 Rome, Italy. 31 January 2018.*
- [5] Pasquale Onorato et al 2018 *Phys. Educ.* 53 035033
- [6] Peter L. *The Lambert Law Revisited. Illinois Institute of Technology, Chicago, IL 60616.*
- [7] A. B. Kostinski, *Optical Society of America* 18, 1929 (2001).
- [8] W. Arnott, K. Hamasha, H. Moosmüller, J. Sheridan & A. Ogren, *Aerosol Science and Technology* 39, 17 (2005)

Apêndice B - Questões das Tarefas Prévias dos Episódios de Modelagem

Questões Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”

1) O vetor de Poynting nos fornece a energia por unidade de tempo por unidade de Área que atravessa uma superfície em uma determinada direção. Esta grandeza é derivada do campo elétrico e magnético da onda eletromagnética, e estas, por sua vez, oscilam no espaço e no tempo. O vetor de Poynting também oscila no espaço e no tempo? Se for este o caso, pode ele apontar em direções diferentes da direção de propagação da onda? Justifique sua resposta.

2) Uma onda plana tem sua componente de campo elétrico dada pela equação abaixo.

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

A frequência de oscilação dos campos da radiação visível é da ordem de 500 THz, daí a dificuldade para fazer medições diretas da intensidade da radiação EM na região do visível. Os dispositivos conseguem, no entanto, tomar valores médios dessas grandezas. A partir da função abaixo, você poderia explicitar em palavras os passos para mostrar que a intensidade da radiação EM depende em média do quadrado do módulo do campo elétrico máximo assumido pela onda? Como vocês calculariam a integral do $\sin^2(x)$ envolvida?

3) Quais mecanismos são responsáveis pela atenuação da luz?

4) Como foi a sua compreensão da seção 33-5? Tem algum ponto que você não entendeu ou não ficou muito claro?

Questões Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”

1) Qual condição tem que ser satisfeita para haver reflexão interna total da luz?

2) No texto da tarefa de leitura você viu que a luz sofre uma deflexão quando troca de meio material, alterando a sua direção de propagação. Se você tivesse que expressar a Lei de Snell verbalmente, em uma frase, como a enunciaria?

3) Como foi a sua compreensão da seção 33-8 e 33-9? Tem algum ponto que você não entendeu ou não ficou muito claro?

Questões Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”

1) Suponha que você coloca frente a frente três polarizadores A, B e C, respectivamente. Existe um feixe de luz não polarizada que incide no polarizador A em direção ao polarizador C, passando por B. Responda às seguintes questões: a) qual a intensidade da luz que atravessa o polarizador C se os eixos de transmissão de A e C são cruzados (90°), mas o eixo de transmissão de B está alinhado com o de A? b) qual a intensidade da luz que atravessa o polarizador C se os eixos de transmissão de A e

C são cruzados (90°), mas o eixo de transmissão de B forma um ângulo de 45° com o de A? c) qual é o efeito do polarizador B sobre a direção da polarização da luz que atravessa o polarizador A?

2) Você incide luz polarizada sobre uma superfície dielétrica transparente. Qual direção da polarização dessa luz seria mais adequada para obter a) a máxima intensidade da luz refratada e b) a mínima intensidade da radiação refletida?

3) Como foi a sua compreensão da seção 33-7 e 33-10? Tem algum ponto que você não entendeu ou não ficou muito claro?

Questões Episódio de Modelagem “Espectroscopia”

1) Explícite as vantagens e desvantagens relacionadas à observação do espectro de emissão de uma fonte luminosa em ordens superiores ($m=3,4$, etc).

2) Você tem a tarefa de analisar a) uma fonte de luz monocromática e b) uma fonte de luz branca.

Dispondo de apenas duas redes de difração, uma com alta resolução (R) e outra com alta dispersão (D), qual seria a escolha mais adequada para utilizar na análise de cada amostra?

3) Como foi a sua compreensão da seção 36-8 e 36-9? Tem algum ponto que você não entendeu ou não ficou muito claro?

ATENUAÇÃO DA LUZ

Sabemos que a radiação eletromagnética não precisa de nenhum meio para se propagar. No entanto, ao atravessar um meio material transparente como o vidro, o ar ou a água, parte da energia é absorvida pelo meio e não consegue ser transmitida integralmente. É de fundamental importância, por exemplo, que a energia luminosa proveniente do Sol atravesse a atmosfera e chegue a uma determinada profundidade na água, como é ilustrado na Figura 1, para que as algas presentes na zona fótica dos oceanos consigam realizar a fotossíntese. (Esses organismos marinhos produzem mais oxigênio que as árvores!) **Como se dá a atenuação da energia luminosa ao atravessar os meios materiais? Como a poluição dos oceanos pode influenciar a fotossíntese das algas por meio de alterações na atenuação da luz solar?**



Figura 1 (fonte disponível [aqui](#))

A potência por unidade de área de uma radiação eletromagnética é medida pelo Vetor de Poynting:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}, \quad \text{Eq. (1)}$$

onde \vec{E} e \vec{B} são os campos elétrico e magnético da onda eletromagnética. Portanto, o fluxo radiante Φ_e por uma superfície pode ser calculado pela expressão:

$$\Phi_e = \int_A \vec{S} \cdot \hat{n} dA, \quad \text{Eq. (2)}$$

onde $[\Phi_e] = W$ (Watts). Apenas uma parte de toda essa potência radiante é reconhecida por nós como luz. De fato, nossos olhos percebem radiações com comprimentos de onda entre aproximadamente 400nm e 700nm apenas. Provavelmente não é uma coincidência o fato

de nossos olhos serem sensíveis a esses comprimentos de onda: essa região é aquela em que o sol mais emite radiação. Uma medida experimental de todas as frequências que compõem uma radiação eletromagnética é extremamente complicada, pois a frequência de vibração dos campos elétricos e magnéticos é da ordem de 10^{14} Hz (radiação visível). Felizmente, no entanto, existem sensores eletrônicos capazes de fazer medidas automatizadas das componentes visíveis ao olho humano dessas radiações. Antes de começarmos a atividade, vamos entender um pouco mais sobre algumas características do olho humano.

Nosso olho percebe a luz com sensibilidade máxima para apenas um valor de comprimento de onda e para valores em torno deste valor específico, temos sensibilidade mais baixa. Em geral, em más condições de iluminação, temos uma visão chamada “Escotópica”, com pico de sensibilidade em torno de 507 nm ¹⁸, enquanto em boas condições de iluminação temos uma visão “Fotópica”, com pico de sensibilidade em torno de 555 nm ¹⁹. A chamada função luminosidade $V(\lambda)$, representada na Figura 2, descreve a sensibilidade espectral do olho humano. As funções $V_E(\lambda)$ e $V_F(\lambda)$ representam as funções Escotópicas e Fotópicas, estando normalizadas a 1 nos picos de emissão. Ao final deste texto apresentamos uma tabela com os valores das duas funções para diversos comprimentos de onda.

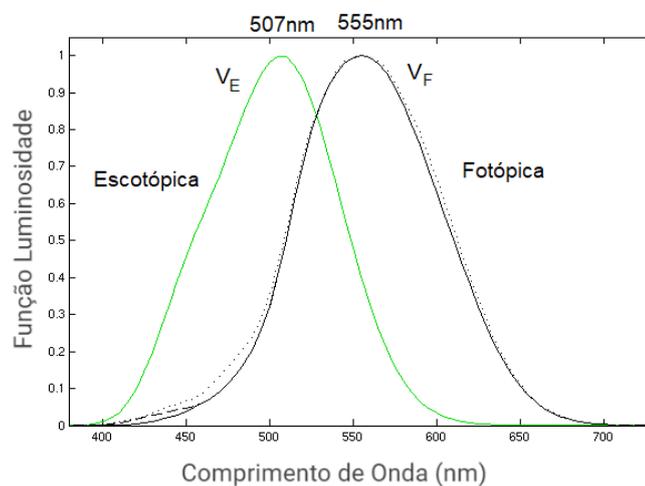


Figura 2 (fonte disponível [aqui](#))

18 As células do olho responsáveis por detectar essas radiações chamam-se *bastonetes*.

19 Nesse caso as células se chamam *cones* e são as responsáveis por dar cor às coisas.

Já vimos que o fluxo radiante Φ_e emitido por uma fonte luminosa fornece a potência total emitida pela fonte, mas nem toda a radiação emitida pela fonte é visível pelo olho humano. O fluxo luminoso Φ_v é definido levando em conta a sensibilidade do olho humano, dando diferentes pesos para cada comprimento de onda da radiação que compõe a luz

Fluxo Luminoso (lm)	Lâmpada Incandescente (W)	Lâmpada Fluorescente/LED (W)
375	25	6,2
600	40	10
900	60	15
1125	75	18,7
1500	100	25
2250	150	37,5
3000	200	50

Tabela 1

observada. Isso pode ser feito integrando as contribuições individuais de cada comprimento de onda por meio da função luminosidade $V(\lambda)$, conforme a Eq. 3.

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad \text{Eq. (3)}$$

A unidade do fluxo luminoso é o *lúmen* (lm), isto é, $[\Phi_v] = \text{lm}$ onde um lúmen é definido como o fluxo luminoso produzido por uma fonte luminosa que emite uma candela (Cd) de intensidade luminosa em

um ângulo de um esterradiano (Sr); vamos definir precisamente o que é Candela a seguir. Outra maneira de definir um lúmen é: Uma fonte luminosa emitindo uma potência de 1W em um comprimento de onda de 555 nm (pico da função luminosidade Fotópica - cor verde para o olho humano) possui um fluxo luminoso de 683 lúmens. É importante compreender que o fluxo luminoso é uma grandeza relacionada à percepção do olho humano, podendo variar levemente de indivíduo para indivíduo. Portanto, os valores de sensibilidade aqui apresentados correspondem a uma média. A Tabela 1 mostra uma comparação entre a potência de operação de lâmpadas em função do fluxo luminoso (percebido pelo olho humano), deixando explícita a baixa eficiência luminosa tanto das lâmpadas incandescentes quanto das fluorescentes ou LED: para produzir um fluxo luminoso de 600 lm ($\approx 0,878 \text{ W}$), por exemplo, as lâmpadas incandescentes consomem 40 W, e as fluorescentes ou LED, “apenas” 10W. A eficiência dessas lâmpadas está em 2,2% e 8,8%, respectivamente.

Podemos definir a iluminância E_v como o fluxo luminoso Φ_v que **entra** em uma superfície de área A pela relação:

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A}, \quad \text{Eq. (4)}$$

onde a unidade de medida no SI é o *lux* (lx), isto é, $[E_V]=lx$ onde $1lx = \frac{lm}{m^2} = \frac{cd \cdot sr}{m^2}$. Essa grandeza é aquela medida pela maioria dos sensores fotossensíveis, como aqueles usados em alarmes, detectores de movimento, detectores de proximidade, etc. O seu celular provavelmente tem um desses sensores! A iluminância é uma grandeza de extrema importância, sendo usada por exemplo, para definir o brilho (ou magnitude aparente) dos astros e planetas do céu. Repare que a iluminância, sendo uma medida do fluxo luminoso por unidade de área, pode ser comparada com o Vetor de Poynting (\vec{S}), apesar de ela **não** ser uma medida direta do mesmo.

Finalmente, podemos medir a intensidade luminosa I_V que **sai** de uma fonte de luz pontual como o fluxo luminoso Φ_V por unidade de ângulo sólido, isto é:

$$I_V = \frac{\Phi_V}{\Omega}, \quad \text{Eq. (5)}$$

onde Ω é o ângulo sólido. A unidade de medida para a intensidade luminosa é a *candela* (cd), isto é, $[I_V]=cd$ onde $1cd = \frac{lm}{sr}$ que corresponde à intensidade luminosa emitida por uma vela comum de cera. Ao concentrarmos um feixe de luz em um pequeno ângulo sólido acabamos por aumentar a intensidade luminosa desse feixe: isso é feito nos faróis dos carros, por exemplo. Esse processo de “concentração” do feixe não se deixa realizar sem perdas: os faróis de um carro usam placas refletoras que absorvem parte da radiação da lâmpada no processo de reflexão. Para resumir os três conceitos importantes nesta atividade, observe a tabela abaixo:

Nome & Simbolo	O que é medido	Como é medido	Unidade de medida
Fluxo Luminoso (Φ_V)	A energia luminosa visível por unidade de tempo que sai de uma fonte emissora de luz.	$\Phi_V = 683 \frac{lm}{W} \int_0^\infty V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$	Lúmen (lm)
Iluminância (E_V)	A luz incidente que entra em uma superfície por unidade de área.	$E_V = \frac{\Phi_V}{A}$	Lux (lx)
Intensidade Luminosa (I_V)	A energia luminosa visível por unidade de tempo sai de uma fonte de luz pontual por unidade de ângulo sólido.	$I_V = \frac{\Phi_V}{\Omega}$	Candela (Cd)

Tabela 2

Episódio de Modelagem:

A compreensão dos fatores que influenciam na nossa percepção da radiação eletromagnética é fundamental. Por isso, é importante dominar um conjunto de ferramentas de laboratório úteis para a análise dessa grandeza física. Nessa atividade você utilizará um sensor eletrônico do laboratório ou seu celular (através do App Physics Toolbox - baixar na loja de aplicativos gratuitamente) para realizar medidas quantitativas da iluminância E_V .



A iluminância a uma distância r de uma fonte pontual no vácuo que emite um fluxo luminoso Φ_V pode ser calculada pela expressão:

$$E_V = \frac{\Phi_V}{4\pi r^2}. \quad \text{Eq. (6)}$$

Nessa equação, é considerado que a energia luminosa não é atenuada pelo meio. Os fatores que podem determinar a perda de energia para o meio são os mais diversos: estado físico do meio, índice de refração, temperatura, umidade relativa, comprimento de onda da radiação etc. Sua tarefa neste Episódio de Modelagem é expandir esse modelo teórico, abarcando nele a atenuação da energia luminosa ao se propagar em algum meio material. Deseja-se que você escolha uma linha de investigação, delineie e implemente os procedimentos empíricos para investigar variáveis e parâmetros envolvidos na atenuação da radiação, decidindo sobre possíveis idealizações e simplificações no modelo teórico de referência da investigação.

Uma possibilidade para tratar essa situação é a utilização da Lei de Beer-Lambert, que se constitui em um modelo de espalhamento de primeira ordem da luz. Neste modelo, admite-se que a iluminância é proporcional a intensidade da luz que atravessa uma superfície. A medida que a luz atravessa um meio material, sofre absorção e/ou espalhamento. Cada material é caracterizado por meio de um coeficiente de atenuação linear²⁰ μ , onde $[\mu]=m^{-1}$, sendo que esse valor é proporcional à capacidade do meio em absorver ou espalhar a luz que passa através dele. Se a fonte luminosa emitir feixes colimados de luz (por exemplo, um *laser*), então a lei de Beer-Lambert pode ser escrita como:

$$E_V(x) = E_{V_0} e^{-\mu x}, \quad \text{Eq. (7)}$$

onde E_{V_0} é a iluminância medida antes de entrar no meio dissipativo. Caso a fonte emissora seja pontual, então podemos medir a iluminância a uma distância r da fonte pela equação:

$$E_V(r) = \frac{\Phi_{V_0}}{4\pi r^2} e^{-\mu r}, \quad \text{Eq. (8)}$$

onde Φ_{V_0} é o fluxo luminoso da fonte pontual. Mais informações sobre o modelo de Beer-Lambert e a dedução das equações se encontram no Moodle da disciplina. Bom trabalho!

²⁰ É comum utilizar o coeficiente de atenuação mássico [m^2/kg] ao invés do coeficiente linear. Para converter do coeficiente de atenuação mássico para o linear basta multiplicá-lo pela densidade do meio.

Atividade Experimental:

Nessa atividade você avaliará a atenuação da energia luminosa quando ela atravessa meios materiais por meio da expansão do modelo de propagação da energia luminosa no vácuo.

Investigação A

Os detectores de fumaça fotoelétricos são dispositivos essenciais na contenção de incêndios. O princípio de funcionamento deste equipamento é baseado na atenuação da luz provocada pela fumaça, que deixa de ser detectada por um sensor, disparando o alarme.



(Fonte disponível [aqui](#))

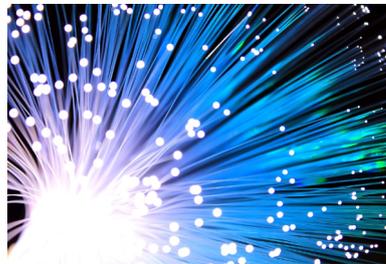
Avalie a atenuação da energia luminosa pela fumaça.

Investigação B

Um *laser* é uma fonte monocromática, isto é, uma fonte de luz que emite luz em apenas um comprimento de onda λ_L . Nesse caso, o fluxo luminoso assume a forma mais simples

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} V(\lambda_L) P,$$

onde P é a potência do *laser*.



(Fonte disponível [aqui](#))

Avalie a atenuação da energia luminosa de um *laser* em um meio sólido como o vidro ou acrílico.

Investigação C

A zona fótica dos oceanos é de importância ecológica fundamental: nessa região encontra-se a maior parte da vida marinha e nela ocorre a fotossíntese pelas algas, responsáveis por mais de 50% da produção de oxigênio global.



Avalie a atenuação da energia luminosa da luz no meio marinho.

Escolha uma das investigações sugeridas e construa experimento(s) com o objetivo de realizar inferências sobre a perda de energia luminosa ao longo de sua propagação no meio. Se for do seu interesse, você pode propor outra linha de investigação para conduzir o seu experimento.

Lembre-se: as **Questões Norteadoras para o Desenvolvimento de Experimentos** guiarão seu trabalho nessa investigação!

LEIA MAIS!

- [Lei de Beer-Lambert](#)
- [Fibras óticas e a Atenuação em dB](#)
- [Função Luminosidade](#)
- [Fotometria e Radiometria](#)

Função Luminosidade Fotópica (V_F) e Estocópica (V_E)

λ (nm)	V_F	V_E	λ (nm)	V_F	V_E
380	0,00020000	0,000589000	590	0,75700000	0,065500000
390	0,00080000	0,002209000	600	0,63100000	0,033150000
400	0,00280000	0,009290000	610	0,50300000	0,015930000
410	0,00740000	0,034840000	620	0,38100000	0,007370000
420	0,01750000	0,096600000	630	0,26500000	0,003335000
430	0,02730000	0,199800000	640	0,17500000	0,001497000
440	0,03790000	0,328100000	650	0,10700000	0,000677000
450	0,04680000	0,455000000	660	0,06100000	0,000312900
460	0,06000000	0,567000000	670	0,03200000	0,000148000
470	0,09098000	0,676000000	680	0,01700000	0,000071500
480	0,13902000	0,793000000	690	0,00821000	0,000035330
490	0,20802000	0,904000000	700	0,00410200	0,000017800
500	0,32300000	0,982000000	710	0,00209100	0,000009140
510	0,50300000	0,997000000	720	0,00104700	0,000004780

520	0,71000000	0,935000000
530	0,86200000	0,811000000
540	0,95400000	0,650000000
550	0,99495000	0,481000000
560	0,99500000	0,328800000
570	0,95200000	0,207600000
580	0,87000000	0,121200000

730	0,00052000	0,000002546
740	0,00024920	0,000001379
750	0,00012000	0,000000760
760	0,00006000	0,000000425
770	0,00003000	0,000000241
780	0,00001499	0,000000139

Fonte: CIE (Commission Internationale de l'Éclairage)

Apêndice D - Questões norteadoras para o desenvolvimento de experimentos

Caro(a) aluno(a), as seguintes questões dirigirão o seu trabalho em atividades experimentais da disciplina. Registre suas respostas no caderno de laboratório. Elas serão muito importantes para que você confeccione os seus relatórios experimentais.

Objetivo da Investigação

- 1) Qual o objetivo da sua investigação?
- 2) Que relação entre grandezas você investigará? Por que você pressupõe que essas grandezas se correlacionam?

Modelagem do Evento Investigado

- 3) Qual o modelo teórico de referência do seu experimento?
- 4) Que objetos da realidade foram considerados nesse modelo teórico?
- 5) Que simplificações da realidade são assumidas nesse modelo?
- 6) Deduza as equações do modelo teórico de referência que serão importantes no seu experimento. Nessa dedução, fundamente-se em teorias gerais da Física e destaque as implicações das simplificações da realidade consideradas.

Planejamento do Experimento

- 7) Que grandezas físicas precisam ser medidas na sua investigação?
- 8) Que instrumentos de medida você vai utilizar para medir essas grandezas?
- 9) Que fatores precisam ser controlados no seu experimento? Por quê? O que será feito para controlá-los?
- 10) Explique o experimento que você realizará destacando o arranjo experimental que será utilizado e os principais cuidados que serão tomados no seu desenvolvimento. Utilize gráficos, tabelas, figuras pictóricas, etc., (ferramentas de representação) se julgar necessário.
- 11) Como será realizada a análise dos dados coletados no seu experimento?
- 12) Que previsões são feitas pelo modelo teórico de referência do seu experimento sobre as grandezas que serão medidas na sua investigação?
- 13) Que ferramenta(s) de representação (gráfico, tabela, etc.) você utilizará para facilitar a análise dos seus dados? Esclareça quais as grandezas que serão representadas.

Obs: Após ter respondido por escrito essas treze primeiras questões, apresente seu caderno de laboratório ao professor. Somente prossiga na sua investigação quando seu planejamento for aprovado!

Execução do Experimento

14) Construa o arranjo experimental que você pretende utilizar e teste-o. Ele realmente é adequado para o desenvolvimento da sua investigação?

15) Execute o experimento que você planejou e registre os dados coletados. Expresse-os acompanhados de suas incertezas e utilize o número de algarismos significativos adequadamente.

Análise dos dados coletados

16) Expresse uma análise dos dados coletados experimentalmente. Considere as incertezas dos dados que você coletou.

17) Existiram diferenças entre os dados que foram medidos experimentalmente e as previsões derivadas do modelo teórico adotado? Se sim, por quê?

Conclusões

18) O que você concluiu do seu experimento? Avalie o modelo teórico de referência do seu experimento baseado nos seus resultados experimentais e proponha uma resposta para a questão de pesquisa da sua investigação.

19) Que recomendações você faria para um pesquisador que tivesse a intenção de reproduzir sua investigação? Que outro experimento poderia ter sido realizado para aprofundar o seu trabalho?

Apêndice E - Protocolo de avaliação de relatórios

Este protocolo de avaliação foi adaptado a partir de Heidemann (2015). Não existe uma regra única sobre como deve ser confeccionado um bom relatório experimental. No entanto, podemos definir algumas características que diferenciam relatórios melhor elaborados de relatórios superficiais. É isso que fazemos no quadro abaixo: apresentamos características que desejamos que seus relatórios experimentais tenham.

Após cada atividade desenvolvida na disciplina, você deverá entregar ao professor um relatório da investigação realizada. Para isso, você se embasará nas Diretrizes para a Elaboração de Relatórios de Física Experimental e no seu caderno de laboratório. Na correção do seu relatório, serão utilizados os critérios apresentados no quadro abaixo, que será entregue para você com a terceira coluna preenchida com os seguintes símbolos: ✓, ½, e x, conforme se considere que o item foi bem, medianamente ou mal atendido, respectivamente. Comentários do professor serão propostos na última linha do quadro.

Aspecto	Critério de Avaliação do Relatório	Avaliação do professor
Objetivo da atividade	Relaciona o objetivo da atividade com um modelo teórico.	
	Faz referência somente a grandezas, objetos, relações teóricas ou eventos físicos previamente definidos no relatório.	
Referencial Teórico	Explicita as aplicações de leis e/ou princípios de uma teoria geral na situação física investigada, construindo um modelo teórico adequado para o experimento realizado.	
	Não apresenta erros conceituais.	
	Ressalta as implicações das simplificações da realidade consideradas durante a aplicação das leis e/ou princípios de uma teoria geral à situação física investigada.	
	Explicita os objetos reais do experimento realizado que são considerados no modelo teórico adotado, não confundindo objetos com as grandezas utilizadas para representar suas propriedades.	
Procedimento experimental	Explicita as grandezas que foram medidas.	
	Explicita os instrumentos de medida utilizados.	
	Explicita o arranjo experimental utilizado.	
	Explicita o evento físico investigado.	
	Explicita procedimentos tomados para se controlar variáveis, ou seja, procedimentos realizados para que os fatores desprezados pelo modelo teórico adotado influenciem minimamente os dados experimentais.	
Apresentação e análise dos	Explicita como o modelo teórico adotado dirigiu a análise dos dados experimentais.	

Aspecto	Critério de Avaliação do Relatório	Avaliação do professor
dados experimentais	Utiliza ferramentas de representação (gráficos, tabelas, figuras pictóricas, etc.) para representar os dados coletados experimentalmente de forma adequada (e.g., explicita as grandezas representadas nos eixos dos gráficos, escolhe escalas adequadas para tais eixos, etc.).	
	Interpreta as representações apresentadas corretamente.	
	Explicita corretamente as incertezas de medida relacionadas com as imprecisões dos instrumentos de medida utilizados.	
	Calcula corretamente as incertezas propagadas das imprecisões intrínsecas dos instrumentos de medida utilizados.	
	Interpreta as incertezas de medida dos dados coletados experimentalmente, utilizando o número adequado de algarismos significativos para representá-los.	
	Ressalta as principais fontes de incerteza relacionadas com a imprecisão dos instrumentos de medida utilizados.	
	Ressalta as consequências das simplificações consideradas no modelo teórico adotado que não foram completamente respeitadas no experimento.	
Conclusões	Avalia o modelo teórico adotado no experimento.	
	Apresenta somente conclusões que contam com amparo de evidências experimentais.	
	Analisa as possíveis contribuições dos resultados experimentais para a resolução do problema que norteou a investigação realizada.	
Redação	Não apresenta erros ortográficos ou gramaticais.	
	Não apresenta frases cuja falta de clareza comprometem a sua compreensão.	
	Está estruturado em seções divididas apropriadamente.	

Apêndice F - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”

PRISMAS

Considere um prisma com um ângulo de abertura Φ , conforme a Figura 1.

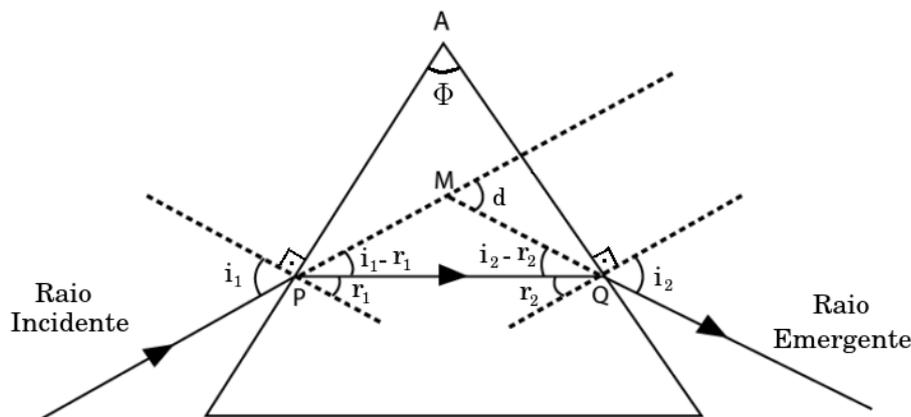


Figura 1

Um feixe de luz, representado pelo raio incidente entra no prisma pela primeira face com um ângulo de incidência i_1 , sofrendo refração ao mudar de meio, formando um ângulo de refração r_1 . Esse raio incide na segunda face com um ângulo de incidência r_2 e emerge da segunda face com um ângulo de refração i_2 . O ângulo d representa o desvio do raio emergente (desvio angular) em relação ao raio incidente. Considere que o prisma é feito de um material com índice de refração n e está imerso no ar ($n_{AR} \approx 1$). Desta forma, a Lei de Snell fornece:

$$\text{sen } i_1 = n \cdot \text{sen } r_1, \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{sen } i_2 = n \cdot \text{sen } r_2. \quad \text{Eq. 2}$$

Pelo triângulo MPQ podemos escrever:

$$(i_1 - r_1) + (i_2 - r_2) + (\pi - d) = \pi,$$

$$d = i_1 + i_2 - (r_1 + r_2). \quad \text{Eq. 3}$$

Pelo triângulo APQ obtemos a relação:

$$\Phi + \left(\frac{\pi}{2} - r_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - r_2\right) = \pi,$$

$$\Phi = r_1 + r_2. \quad \text{Eq. 4}$$

Juntando as Eqs. 3 e 4, temos:

$$d = i_1 + i_2 - \Phi. \quad \text{Eq. 5}$$

Queremos obter o ângulo de desvio d como uma função apenas do índice de refração do material (n), o ângulo de incidência (i_1) e o ângulo do prisma (Φ). Assim, isolando i_2 na Eq. 2 e usando a Eq. 4, obtemos:

$$i_2 = \text{asen}[n \cdot \text{sen} r_2] = \text{asen}[n \cdot \text{sen}(\Phi - r_1)],$$

que pela identidade trigonométrica $\text{sen}(a-b) = \text{sen} a \cdot \cos b - \cos a \cdot \text{sen} b$ pode ser escrito como:

$$i_2 = \text{asen}[n(\text{sen} \Phi \cdot \cos r_1 - \cos \Phi \cdot \text{sen} r_1)].$$

Pela relação fundamental da trigonometria $\cos r_1 = \sqrt{1 - \text{sen}^2 r_1}$, podemos obter, usando a Eq. 1:

$$i_2 = \text{asen}[\text{sen} \Phi \cdot \sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1} - \cos \Phi \text{sen} i_1]. \quad \text{Eq. 6}$$

Substituindo a Eq. 6 na Eq. 5 obtemos a relação desejada:

$$d = i_1 - \Phi + \text{asen}[\text{sen} \Phi \cdot \sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1} - \cos \Phi \text{sen} i_1]. \quad \text{Eq. 7}$$

A Figura 2 evidencia o comportamento do ângulo de desvio para prismas com diferentes aberturas angulares Φ como uma função do ângulo de incidência.

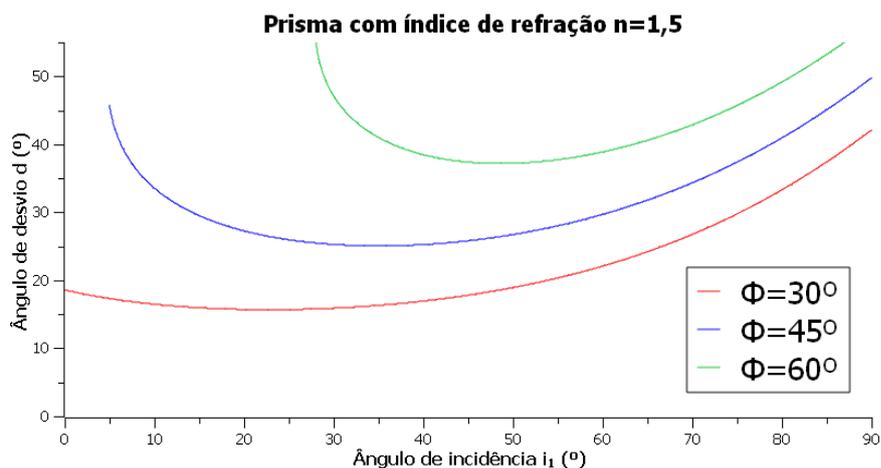


Figura 2

Pela Figura 2, verifica-se a existência de um ângulo no qual o desvio do raio de luz emergente é mínimo, denominado d_{min} . Esse ângulo de desvio mínimo ocorre quando o raio

emergente forma um ângulo com a normal igual ao do raio incidente, isto é, $i_1 = i_2 = i$ ²¹. Pelas Eqs. 1 e 2, devemos ter também $r_1 = r_2 = r$. Pelas Eqs. 4 e 5 obtemos:

$$r = \frac{\Phi}{2} \quad \text{Eq. 8}$$

$$d_{min} = 2i - \Phi, \quad \text{Eq. 9}$$

para o ângulo mínimo. Obtém-se daí uma fórmula útil para o cálculo do índice de refração de um prisma substituindo as duas equações acima na Eq. 1 ou Eq. 2:

$$n = \frac{\text{sen}\left(\frac{d_{min} + \Phi}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\Phi}{2}\right)}. \quad \text{Eq. 10}$$

O prisma é muito utilizado para calcular índices de refração pois o formato de sua dupla superfície amplifica os efeitos da deflexão da luz ao passar por ele. Um equipamento que utiliza o prisma com essa finalidade é o refratômetro, que funciona pelo princípio da deflexão da luz incidente, como indicado na Figura 3.

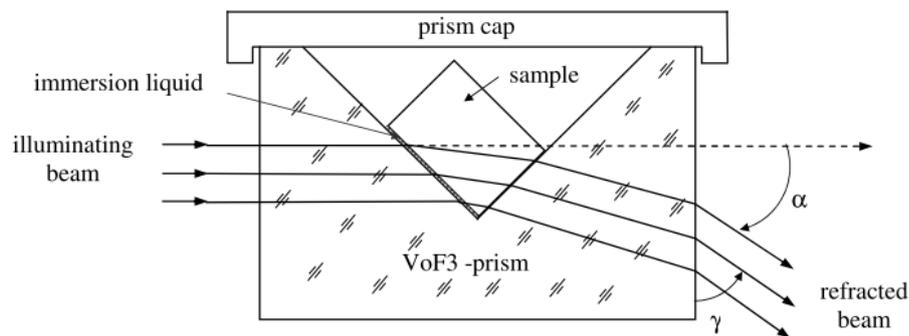


Figura 3 – Parte de um refratômetro, equipamento que mede índice de refração baseado no desvio da luz ao passar por um prisma [1].

Nesse Episódio de Modelagem vamos estudar a dependência do índice de refração de alguns materiais com o comprimento de onda da radiação e com a variação da temperatura.

Propriedades de dispersão do índice de refração

21 Esse resultado pode ser obtido derivando a Eq. 7 e igualando a zero, ou usando as seguintes considerações físicas: se existem dois ângulos de incidência, um maior e outro menor, que geram o mesmo ângulo de desvio, como não faz diferença para a Lei de Snell qual raio é o incidente e qual raio é o emergente, então deve ser verdade que, quando se inverte os raios incidente e emergente, o ângulo de desvio não se altera. Isso só pode ocorrer se os ângulos dos raios emergente e incidente são iguais.

Quando luz branca passa por um prisma, devido à diferença de índice de refração associada aos comprimentos de onda que a compõe, observa-se a separação das cores, fenômeno conhecido como dispersão da luz. Através da medida do ângulo de desvio mínimo (d_{min}), pode-se usar a Eq. 10 para determinar o índice de refração associado a cada uma das cores que compõem a luz branca! Na região visível do espectro, a relação entre o índice de refração e o comprimento de onda da radiação (relação de dispersão) pode ser feita por meio da conhecida equação de Sellmeier [2]:

$$n^2 = A + \frac{B}{1 - \frac{C}{\lambda^2}} + \frac{D}{1 - \frac{E}{\lambda^2}} \quad \text{Eq. 11}$$

Na Eq. 11, os dois primeiros termos levam em consideração o gap de alta e baixa energia da banda de absorção do elétron, respectivamente. O terceiro termo deve-se à absorção de rede e geralmente só é levado em consideração quando se deseja precisão da ordem de 10^{-5} no cálculo do índice de refração.

Assim, ao associar as cores espalhadas pelo prisma com seus respectivos comprimentos de onda, pode-se ajustar a equação de Sellmeier e obter seus coeficientes. O resultado obtido pode ser usado para avaliar a transmissão da luz por um material e os efeitos da variação no comprimento de onda.

Propriedades térmicas do índice de refração

Apesar da variação do índice de refração com a temperatura ser um efeito mais sutil do que com o comprimento de onda, o seu estudo é fundamental para aplicações em fibras óticas e sistemas de comunicação²². Estamos interessados em detectar variações no índice de refração com um prisma e avaliar as consequências dessa variação para a transmissão de dados nas fibras óticas. Supomos, apenas, que o efeito é pequeno – afinal o grau dos nossos óculos não muda em um dia quente, certo?

É conveniente observar em uma grande distância a deflexão do raio de luz que passa por um prisma que sofre uma variação de temperatura ΔT . Ao fazer isso, podemos escolher um ângulo de incidência i_1 que produza a máxima variação na deflexão Δd com

²²Também é possível conectar o índice de refração com a temperatura através da equação de Lorentz-Lorentz [1], que leva em consideração a polarizabilidade do material, mas não faremos isso.

a variação no índice de refração Δn . Para avaliar qual seria esse ângulo, diferenciamos a Eq. 7 em relação à n :

$$\frac{\partial d}{\partial n} = \frac{n \cdot \text{sen } \Phi}{\sqrt{(n^2 - \text{sen}^2 i_1) (1 - [\text{sen } \Phi \cdot \sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1} - \text{cos } \Phi \text{ sen } i_1]^2)}}. \quad \text{Eq. 12}$$

A Figura 4 evidencia quais são os melhores ângulos de incidência para um prisma com diferentes aberturas angulares. Por exemplo, para um prisma de $\Phi = 45^\circ$, uma mudança de uma unidade no índice de refração do material produziria uma deflexão angular de 6 radianos quando a luz incide em um ângulo $i_1 = 5^\circ$; para esse mesmo ângulo, a deflexão em um prisma de $\Phi = 30^\circ$ seria menor do que 1 radiano. Assim, podemos escolher de forma conveniente o ângulo de incidência para produzir uma deflexão angular significativa e portanto, mensurável no laboratório.

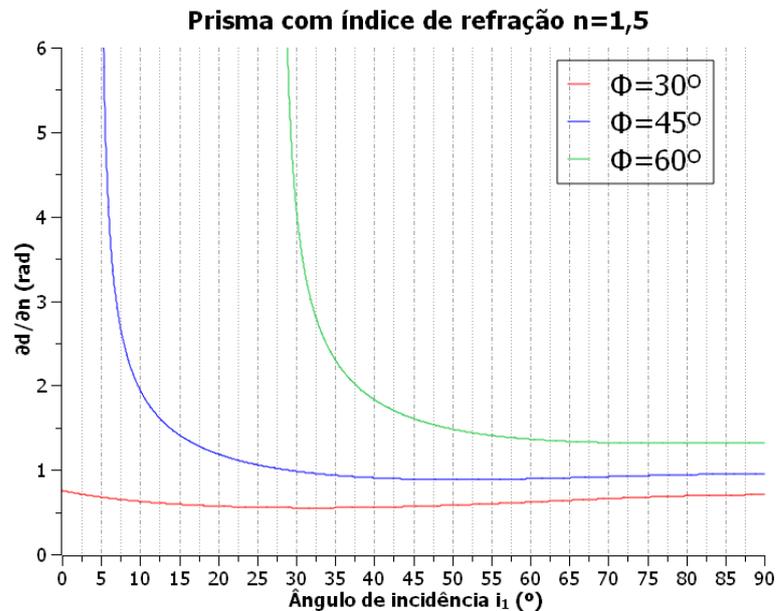


Figura 4

Colocando um anteparo a uma distância R do prisma, então ao variar a temperatura do material em ΔT , o feixe de luz sofre uma variação Δd na sua deflexão, de forma que se observa um deslocamento A da luz projetada no anteparo. Assim:

$$\Delta d = \frac{A}{R} \quad \text{Eq. 13}$$

Admitindo a relação $\frac{\partial d}{\partial n} \approx \frac{\Delta d}{\Delta n}$, obtemos a expressão para o cálculo da variação do índice de refração:

$$\Delta n = \frac{\Delta d}{\frac{\partial d}{\partial n}} \quad \text{Eq. 14}$$

Na Eq. 14, $\Delta n = n(T) - n(T_0)$. Para avaliar $\frac{\partial d}{\partial n}$ (Eq. 12), é necessário conhecer o valor típico do índice de refração em pelo menos uma das temperaturas estudadas (tipicamente conhecemos $n(T_0)$ - o índice de refração à temperatura ambiente, encontrado em tabelas de propriedades dos materiais). Com o resultado obtido, pode-se estimar se a variabilidade térmica tem potencial de provocar problemas em sistema óticos de transmissão de dados.

Referências

- [1] S. N. Kasarova, N. G. Sultanova, I. D. Nikolov, Temperature dependence of refractive characteristics of optical plastics, Journal of Physics: Conference Series 253, 2010.
- [2] G. Ghosh, Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Tellurite Glasses, Applied Optics, 36, 7, 1997.

Cálculo de incertezas:

Abaixo apresenta-se o procedimento para o cálculo da incerteza na variação do índice de refração (Δn) do prisma quando submetido a uma variação de temperatura (ΔT):

A - deslocamento do ponto do laser no anteparo.

R - distância do prisma ao anteparo.

Δn - variação no índice de refração.

Δd - variação no ângulo de desvio.

Incerteza em Δn ($\sigma_{\Delta n}$):

$$\Delta n = \frac{\Delta d}{\frac{\partial d}{\partial n}} \Rightarrow \sigma_{\Delta n} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta d}}{\frac{\partial d}{\partial n}}\right)^2 + \left(\frac{-\Delta d \sigma_{\frac{\partial d}{\partial n}}}{\left(\frac{\partial d}{\partial n}\right)^2}\right)^2}$$

Incerteza em Δd ($\sigma_{\Delta d}$):

$$\Delta d = \frac{A}{R} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\Delta d} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{R}\right)^2 + \left(\frac{-A\sigma_R}{R^2}\right)^2}$$

Incerteza em $\frac{\partial d}{\partial n}$ ($\sigma_{\frac{\partial d}{\partial n}}$): Lembramos que $\frac{\partial d}{\partial n}$, definido pela equação

$$\frac{\partial d}{\partial n} = \frac{n \cdot \text{sen } \Phi}{\sqrt{(n^2 - \text{sen}^2 i_1)(1 - [\text{sen } \Phi \cdot \sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1} - \cos \Phi \text{sen } i_1]^2)}}$$

é uma função de três variáveis: Φ, n, i_1 . Porém, admite-se que $\sigma_\Phi = \sigma_n = 0$ já que a abertura do prisma não tem incerteza especificada e que o valor da literatura para o índice de refração tem precisão pelo menos igual à precisão almejada no final do cálculo. Para fazer a

conta, escrevemos $\frac{\partial d}{\partial n}$ na forma mais conveniente:

$$\frac{\partial d}{\partial n} = \frac{n \cdot \text{sen } \Phi}{\sqrt{(n^2 - \text{sen}^2 i_1)(1 - e^2)}},$$

onde:

$$e = \text{sen } \Phi \cdot h - \cos \Phi \cdot \text{sen } i_1, \quad h = \sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1}.$$

Assim, sendo $\sigma_\Phi = \sigma_n = 0$, temos:

$$\sigma_{\frac{\partial d}{\partial n}} = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 d}{\partial i_1 \partial n} \sigma_{i_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 d}{\partial \Phi \partial n} \sigma_\Phi\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 d}{\partial n^2} \sigma_n\right)^2} = \left|\frac{\partial^2 d}{\partial i_1 \partial n} \sigma_{i_1}\right|,$$

$$\frac{\partial^2 d}{\partial i_1 \partial n} = \frac{0 - n \cdot \text{sen } \Phi \frac{\partial}{\partial i_1} (\sqrt{(n^2 - \text{sen}^2 i_1)(1 - e^2)}) - n \cdot \text{sen } \Phi \frac{\partial}{\partial i_1} (X)}{(\sqrt{(n^2 - \text{sen}^2 i_1)(1 - e^2)})^2} = \frac{-n \cdot \text{sen } \Phi \frac{\partial}{\partial i_1} (X)}{g \cdot f},$$

$$g = n^2 - \text{sen}^2 i_1, \quad f = 1 - e^2, \quad X = \sqrt{g \cdot f}.$$

Fazendo as derivadas:

$$\frac{\partial}{\partial i_1} X = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{g \cdot f}} (g \cdot f' + f \cdot g'),$$

$$g' = -2 \cdot \text{sen } i_1 \cdot \cos i_1,$$

$$f' = \frac{\partial}{\partial i_1} (1 - e^2) \Rightarrow f' = -2 \cdot e \cdot \left(\text{sen } \Phi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{-2 \cdot \text{sen } i_1 \cdot \cos i_1}{\sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1}} - \cos \Phi \cdot \cos i_1 \right),$$

$$f' = e \left(2 \cdot \cos \Phi \cdot \cos i_1 - \text{sen } \Phi \frac{g'}{h} \right),$$

$$\frac{\partial^2 d}{\partial i_1 \partial n} = \frac{-n \cdot \text{sen} \Phi \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{g \cdot f}} (g \cdot f' + f \cdot g')}{g \cdot f},$$

$$\frac{\partial^2 d}{\partial i_1 \partial n} = \frac{-n \cdot \text{sen} \Phi \cdot (g \cdot f' + f \cdot g')}{2\sqrt{(g \cdot f)^3}}.$$

Ou seja, a incerteza no cálculo de $\frac{\partial d}{\partial n}$ pode ser escrita como:

$$\sigma_{\frac{\partial d}{\partial n}} = \left| \frac{n \cdot \text{sen} \Phi \cdot (g \cdot f' + f \cdot g') \cdot \sigma_{i_1}}{2\sqrt{(g \cdot f)^3}} \right|.$$

Apêndice G - Guia da Atividade do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”

REFLEXÃO TOTAL DA LUZ

A maior parte da comunicação global se dá por satélites ou por cabeamento de fibra ótica. Para garantir a comunicação entre os países separados pelos mares, uma extensa rede de cabos marítimos está em operação, conforme ilustra a Figura 1. Um cabo de fibra ótica consegue transmitir luz porque seu interior é feito com um material transparente. À primeira vista, desde que o cabo seja retilíneo, podemos conceber que a luz se propaga de um ponto a outro sem problemas. No entanto, mesmo quando o cabo se enrola ou faz uma curva, a luz muda de direção junto com o cabo, chegando ao seu destino. **Como a luz se propaga dentro de um cabo de fibra ótica? Quais propriedades do cabo influenciam a transmissão da luz?**

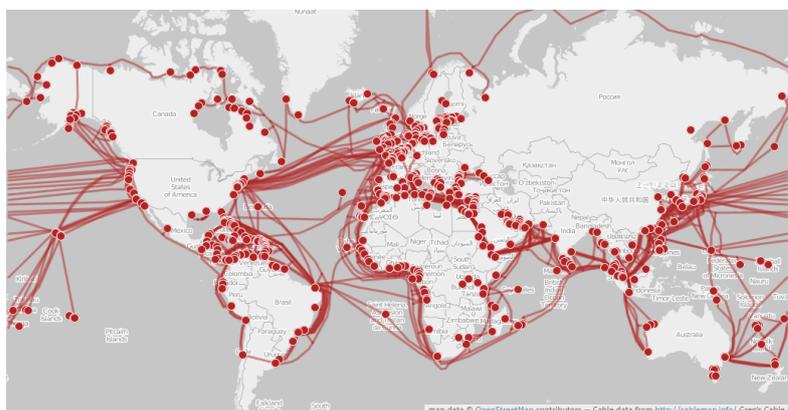


Figura 1 ([Fonte](#), último acesso em 21/09/2020)

A temperatura de um cabo que atravessa um oceano é relativamente estável, mas o que dizer de um cabo que atravessa o deserto? Nesse ambiente existe alta variabilidade de temperaturas, proporcionando registros que vão desde -5°C à noite a 55°C durante o dia. Essa variabilidade pode ter influências negativas sobre a capacidade de transmissão de dados deste cabo? A transmissão de informação pelos cabos se dá graças ao fenômeno da reflexão total da luz, que é garantida pelo elevado índice de refração do material que compõe o núcleo de vidro dos cabos em comparação com o do material que faz o seu revestimento. Conhecido o índice de refração dos materiais, o ângulo crítico para haver reflexão total pode ser obtido pela lei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad \text{Eq. (1)}$$

Uma maneira conhecida de estudar o índice de refração é através de primas. Quando luz incide em um prima, sua direção de propagação é alterada, sofrendo certo

ângulo de desvio d . Esse ângulo de desvio depende de três fatores: o índice de refração n do prisma, o ângulo de incidência i_1 da luz e a abertura angular Φ do prisma, conforme a Figura 2.

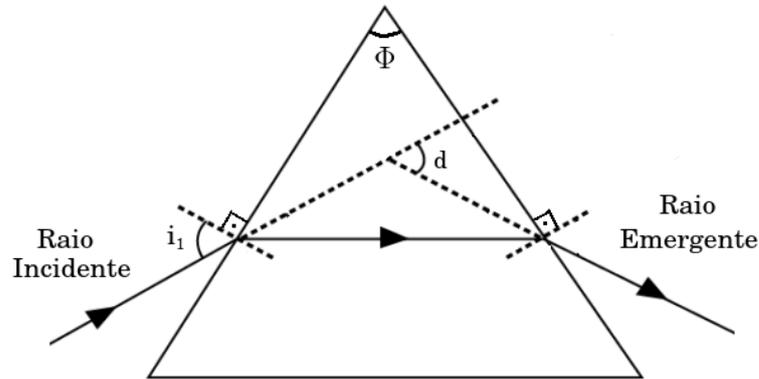


Figura 2

A relação entre essas grandezas é dada pela relação:

$$d = i_1 - \Phi + a \operatorname{sen} \left[\operatorname{sen} \Phi \cdot \sqrt{n^2 - \operatorname{sen}^2 i_1} - \cos \Phi \operatorname{sen} i_1 \right]. \quad \text{Eq. (2)}$$

Pode-se mostrar que quando a luz passa pelo prisma, existe certo ângulo de incidência para o qual o desvio da luz é mínimo. Chamando esse ângulo de d_{\min} , obtém-se uma equação conveniente para o cálculo do índice de refração do material de que o prisma é feito:

$$n = \frac{\operatorname{sen} \left(\frac{d_{\min} + \Phi}{2} \right)}{\operatorname{sen} \left(\frac{\Phi}{2} \right)}. \quad \text{Eq. (3)}$$

Prismas podem ser utilizados para detectar variações muito pequenas no índice de refração, da ordem de 10^{-4} ! Nos laboratórios de pesquisa são utilizados equipamentos sofisticados para medir índices de refração – um deles é o refratômetro, que funciona com base no princípio de desvio angular de um feixe de luz. Para realizar medidas semelhantes no laboratório didático, precisamos detectar variações muito pequenas no ângulo de desvio d . Isso pode ser feito da seguinte forma:

1) **Colocando um anteparo longe do prisma.** Se a distância do anteparo ao prisma for R , então a variação angular Δd produz um deslocamento A na posição do feixe projetado, de forma que:

$$\Delta d = \frac{A}{R}, \quad \text{Eq. (4)}$$

onde a medida fica mais precisa quanto maior o valor de R .

2) **Escolhendo o ângulo de incidência que produz a maior variação no desvio angular com a mudança no índice de refração.** Tomando o modelo teórico do prisma (representado pela Eq. 2) como referência para delinear um experimento, podemos incidir luz em certo ângulo i_1 de forma que uma pequena mudança Δn no índice de refração provoca uma mudança significativa Δd no ângulo de desvio. Para encontrar esse ângulo de incidência, deriva-se a Eq. 2 em relação à n , obtendo:

$$\frac{\partial d}{\partial n} = \frac{n \cdot \text{sen } \Phi}{\sqrt{(n^2 - \text{sen}^2 i_1) \left(1 - \left[\text{sen } \Phi \cdot \sqrt{n^2 - \text{sen}^2 i_1} - \text{cos } \Phi \text{sen } i_1\right]^2\right)}}. \quad \text{Eq. (5)}$$

Um gráfico da Eq. 5 para prismas com diferentes aberturas angulares Φ mostra quais são os ângulos de incidência ideais para realizar medidas (veja o material de apoio no Moodle!).

Episódio de Modelagem:

Vimos que o índice de refração de um meio pode variar por diversos fatores. O ângulo de reflexão total da luz (θ_{RT}) incidente na interface que separa dois meios pode ser influenciado por esses fatores, afetando a transmissão de informações em um cabo de fibra ótica, por exemplo. O ângulo de reflexão total pode ser obtido pela Eq. 1:

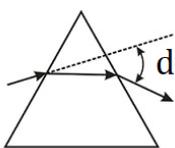
$$\theta_{RT} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad \text{Eq. (6)}$$

Neste Episódio de Modelagem será dado enfoque à utilização de prismas para determinação do índice de refração e sua dependência com as diversas variáveis físicas. Você deve delinear uma investigação pautada no modelo teórico do prisma, buscando relacionar os resultados obtidos com mudanças na reflexão total da luz.

Atividade Experimental: Avalie a dependência do ângulo de reflexão total da luz (θ_{RT}) de alguma variável física do meio em que ela se propaga (temperatura, densidade, etc.) ou de alguma característica da radiação. Sugerimos duas alternativas de investigação:

Investigação A

Investigue qual a relação entre o ângulo de reflexão total da luz (θ_{RT}) de um material sólido e a sua temperatura.



O índice de refração aumenta ou diminui com a temperatura? Busque com isso determinar diferenças no ângulo de reflexão total da luz para variações grandes de temperatura usando o método do desvio angular.

Investigação B

Fibras óticas transportam informação em três comprimentos de onda preferenciais: 850nm, 1300nm e 1550nm. Esses valores pertencem à faixa do infravermelho e, em geral, quanto maior o comprimento de onda, melhor. Qual a influência do comprimento de onda da luz na reflexão interna total? Como o índice de refração se comporta como uma função do comprimento de onda? Utilize a equação de Sellmeier para relacionar o ângulo de reflexão total da luz θ_{RT} com o comprimento de onda.

$$n^2 = A + \frac{B}{1 - \frac{C}{\lambda^2}}$$

Escolha uma das investigações sugeridas e/ou construa experimento(s) com o objetivo de realizar seus estudos sobre o ângulo de reflexão total da luz. Se for do seu interesse, você pode propor outra linha de investigação diferente das sugeridas para conduzir o seu experimento.

Lembre-se: as **Questões Norteadoras para o Desenvolvimento de Experimentos** guiarão seu trabalho nessa investigação!

LEIA MAIS!

- [Derivando a Lei de Snell pelo princípio de Fermat](#)
- [Equação de Sellmeier](#)
- [Efeito Poceles](#)
- [Miragens](#)

EQUAÇÕES DE FRESNEL

Para estudar a reflexão e transmissão da luz em uma superfície dielétrica, pode-se construir um modelo baseado nas conhecidas equações de Fresnel, que descrevem a amplitude relativa do campo elétrico refletido e transmitido pela interface que separa dois meios (ar e água, por exemplo). A partir dessas equações, obtém-se os coeficientes de reflexão e transmissão - as grandezas contrastáveis no laboratório didático – que servem para responder à questão da relíquia.

1. Condições de contorno

Quando uma onda eletromagnética se propaga pela matéria, pode-se tratar a situação por meio dos campos de deslocamento elétrico (\vec{D}) e magnético (\vec{H}), que oscilam perpendicularmente um ao outro e podem incluir os efeitos de polarização e magnetização do material, respectivamente. Admite-se que o meio material no qual a onda se propaga é isotrópico, isto é, suas constantes de permissividade elétrica (ϵ) e magnética (μ) não variam no espaço. Além disso, considera-se que o meio é linear, de forma que é possível escrever as seguintes relações, em termos das grandezas mais conhecidas (campo elétrico e indução magnética²³):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} . \quad (1)$$

Uma vez que, em geral, associa-se a polarização da luz à direção de oscilação do campo elétrico, em vez de trabalhar com \vec{D} , utiliza-se \vec{E} daqui para frente. Neste material, trata-se da interação da luz solar com a água de um lago, meio suposto dielétrico – ou seja, assume-se que sua condutividade seja praticamente zero ($\sigma \approx 0$). Em meios dielétricos, existem cargas elétricas que, apesar de ligadas aos átomos ou moléculas, podem produzir correntes induzidas localmente em resposta a campos externos aplicados.

Passa-se a analisar a situação em que uma onda eletromagnética incide sobre a interface que separa dois meios materiais dielétricos, isotrópicos e lineares, denotados por 1

²³ Existe uma controvérsia histórica e mesmo certa confusão com relação à denominação dos campos \vec{B} e \vec{H} . O campo \vec{B} é comumente chamado de *campo de indução magnética*, *densidade de fluxo magnético* ou simplesmente *campo magnético*. Já o campo \vec{H} é chamado de *campo magnético* ou simplesmente *campo H*. Aqui, optamos por chamar o campo \vec{H} de magnético e \vec{B} de indução magnética.

e 2 e caracterizados por suas constantes de permissividade elétrica (ϵ_1 , ϵ_2) e permeabilidade magnética ($\mu_1=\mu_2=\mu_0$). No problema enunciado no Episódio de Modelagem, o meio 1 representa o ar enquanto o meio 2, a água do lago. Ao incidir na água, uma parte da radiação incidente é refletida, permanecendo no meio 1, enquanto outra parte atravessa a superfície, se propagando no meio 2.

Do ponto de vista microscópico, os campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{H}) dessa radiação podem ser pensados como essencialmente constantes em uma região muito pequena ao redor da interface entre os dois meios. Além disso, é conveniente escrever tais campos em termos de suas componentes perpendiculares (E_{\perp} e H_{\perp}) e paralelas (E_{\parallel} e H_{\parallel}) à superfície nessa região. Considere, por exemplo, a Figura 1, que explicita as componentes paralelas dos campos elétrico (a) e magnético (b) *resultantes* nas proximidades da interface entre dois meios.

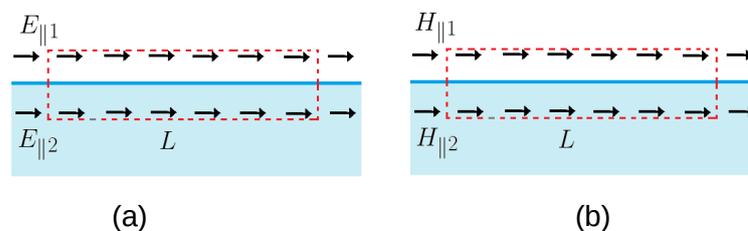


Figura 1 – O retângulo pontilhado vermelho é o caminho de integração. As setas representam a componente paralela do campo elétrico(a) e magnético (b) na superfície que separa os meios 1 e 2.

Pela lei de Faraday, $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\mu \int_A \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$, pode-se escolher o caminho C de integração representado pela linha pontilhada na Figura 1(a) e a área A como a superfície delimitada por essa linha. Sendo esse caminho arbitrário, é possível diminuir a altura do retângulo até que sua área seja desprezível, porém contendo os dois meios. Nessa situação, a integral de área na lei de Faraday - feita no sentido horário – se anula, de forma que:

$$E_{\parallel 1} L - E_{\parallel 2} L = 0 \quad \Rightarrow \quad E_{\parallel 1} = E_{\parallel 2} \quad . \quad (2)$$

O resultado indica que a componente do campo elétrico paralela ao plano é contínua na superfície.

De forma análoga, pode-se usar a Lei de Ampère, dada por

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_F + \epsilon \int_A \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \quad , \text{ para encontrar uma relação útil para o campo magnético.}$$

Nessa relação, i_F é a corrente livre (não ligada) total passando pela superfície. Como o meio é suposto dielétrico ($\sigma=0$), considera-se $i_F=0$. Pode-se realizar a integral sobre a curva representada pela Figura 1(b) de forma equivalente ao que foi feito anteriormente, isto é:

$$H_{\parallel 1} L - H_{\parallel 2} L = 0 \quad \Rightarrow \quad H_{\parallel 1} = H_{\parallel 2} \quad . \quad (3)$$

Mais uma vez, a Eq. 3 indica que o campo magnético é contínuo na interface, algo que não seria verdadeiro se o meio se tratasse de um metal, por exemplo, já que nesse caso $i_F \neq 0$. Mais duas relações (para cada uma das componentes perpendiculares) podem ser derivadas através da lei de Gauss, mas não será feito aqui porque não é necessário para o desenvolvimento das equações de Fresnel.

Para finalizar a seção, reforça-se o significado das Eqs. 2 e 3: ambas expressam que as componentes paralelas à superfície dos campos *resultantes* em cada meio (1 e 2) são contínuas. Isso implica que, por exemplo, em uma situação em que uma onda eletromagnética interagindo com a matéria é a única fonte de campo elétrico na região, a soma das componentes paralelas do campo elétrico da radiação incidente e refletida (ambas no meio 1) em um ponto da interface é igual à componente paralela da radiação transmitida (meio 2) neste ponto.

2 Equações de Fresnel

A partir desta seção, descreve-se de forma mais específica a luz refletida e transmitida pela interface entre dois meios. Serão obtidas expressões para o cálculo da amplitude do campo elétrico nas situações de incidência normal e oblíqua.

2.1 Incidência normal

Considere uma onda plana incidindo (i) normalmente sobre um meio dielétrico, isotrópico e linear, de forma que as ondas refletidas (r) e transmitidas (t) pela interface são as mostradas na Figura 2. Admite-se que a luz é polarizada linearmente, com direção de polarização - dada pelo campo elétrico - perpendicular à página. Na figura, vê-se que depois de incidir no meio, a direção do campo elétrico refletido e transmitido não mudou: essa escolha foi arbitrária e suas consequências serão debatidas a seguir.

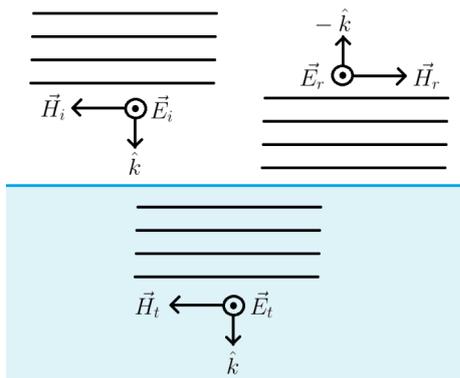


Figura 2 – Ondas incidentes, refletidas e transmitidas pela superfície.

O campo elétrico das ondas é paralelo à superfície, logo, pela Eq. 2, pode-se relacionar o campo elétrico total dentro e fora do material:

$$E_i + E_r = E_t \quad . \quad (4)$$

O campo magnético também é paralelo à superfície. Logo, pela Eq. 3:

$$H_i - H_r = H_t \quad . \quad (5)$$

Pode-se derivar resultados úteis a partir das Eqs. 4 e 5 quando se conhece a relação entre o campo elétrico e magnético de uma onda, isto é, uma relação da forma $H = H(E)$. Uma grandeza que fornece essa relação é a impedância da onda, que passará a ser abordada a seguir. Os resultados obtidos também serão úteis para derivar relações que descrevem os casos mais gerais de incidência oblíqua.

Admitindo todas as idealizações até aqui enunciadas, podemos escrever as conhecidas equações de onda:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{e} \quad \nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad . \quad (6)$$

Uma possível solução matemática para as Eqs. 6 é a onda plana, conforme ilustrada na Figura 3.

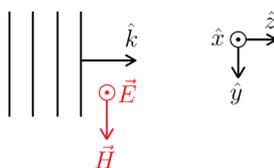


Figura 3 - Onda plana se propagando na direção z. O campo elétrico oscila na direção \hat{x} , enquanto que o campo magnético, na direção \hat{y} .

Nessa situação, os vetores \vec{E} e \vec{H} podem ser escritos como:

$$\vec{E} = E_0 \hat{x} e^{i(\omega t - kz)} , \quad (7)$$

$$\vec{H} = H_0 \hat{y} e^{i(\omega t - kz)} , \quad (8)$$

em que E_0 e H_0 são as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente.

A frequência angular $\omega = 2\pi f$ e o número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ da radiação se relacionam entre si por meio da equação:

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} . \quad (9)$$

Para verificar a validade da Eq. 9, basta substituir as soluções (Eqs. 7 e 8) nas equações de onda (Eq. 6). Por exemplo, $\nabla^2 \vec{E} = -k^2 \vec{E}$ e $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \vec{E}$. Para a onda plana, a razão entre a amplitude do campo elétrico e magnético é definida como a impedância da onda, dada por:

$$Z = \frac{E}{H} . \quad (10)$$

A impedância tem a mesma unidade de resistência elétrica. Como se nota pela sua definição, $[Z] = \frac{V/m}{A/m} = \Omega$. Outra expressão para a impedância pode ser obtida pela

Lei de Faraday, isto é, $\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$. Fazendo as derivadas a partir das Eqs. 7 e 8, obtêm-se $-ikE \hat{y} = -\mu i\omega H \hat{y}$. Usando a Eq. 9, chegamos na relação:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} . \quad (11)$$

Outro resultado conhecido - derivado da Eq. 6 - é a determinação da velocidade v de propagação da luz na matéria:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} . \quad (12)$$

Em particular, a velocidade da luz no vácuo é $v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$. Essa relação pode ser usada para definir a impedância do vácuo, isto é:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \mu_0 c . \quad (13)$$

A velocidade de propagação da onda no meio (Eq. 12) também pode ser calculada pelo seu índice de refração n , definido pela relação:

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow v = \frac{1}{n\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \quad (14)$$

Nesse ponto, pode-se obter uma relação útil entre a impedância (Z) de um meio e seu índice de refração. Para isso, admite-se que $\mu \approx \mu_0$, uma aproximação razoável para a maioria dos materiais²⁴ na região do espectro visível. A partir das Eqs. 13 e 14, tem-se:

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (15)$$

A razão entre a permissividade do meio (ϵ) e do vácuo (ϵ_0), como escrita na Eq. 15, é definida como permissividade relativa, de forma que é comum encontrar essa equação na forma $n = \sqrt{\epsilon_r}$. Substituindo a Eq. 15 na Eq. 11 (considerando $\mu \approx \mu_0$), tem-se:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{n} \Rightarrow Z = \frac{Z_0}{n} \quad (16)$$

onde foi utilizado o resultado da Eq. 13. Finalmente, através das Eqs. 10 e 16, obtêm-se a relação desejada:

$$H = \frac{En}{Z_0} \quad (17)$$

A Eq. 17 relaciona os campos elétrico e magnético instantâneos de uma onda com o índice de refração do material em que se propaga.

A partir daqui, pode-se voltar às Eqs. 4 e 5, substituindo a Eq. 17:

$$E_i + E_r = E_t \quad ,$$

$$H_i - H_r = H_t \quad \Rightarrow \quad \frac{E_i n_1}{Z_0} - \frac{E_r n_1}{Z_0} = \frac{E_t n_2}{Z_0} \quad \Rightarrow \quad E_i n_1 - E_r n_1 = E_t n_2$$

Definindo a amplitude de reflexão (r) e transmissão (t) relativas a E_i (amplitude da onda incidente), pelas relações:

²⁴ Um contraexemplo, são os materiais ferromagnéticos, onde essa aproximação não se justifica.

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{e} \quad t = \frac{E_t}{E_i} , \quad (18)$$

podemos reescrever essas equações como

$$1 + r = t , \quad (19)$$

$$n_1(1 - r) = t n_2 . \quad (20)$$

Juntando as Eqs. 19 e 20, obtêm-se as seguintes relações:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} , \quad (21)$$

$$t = \frac{2 n_1}{n_1 + n_2} . \quad (22)$$

Para ilustrar o resultado obtido, considere a incidência normal da luz polarizada em uma interface ar-água. Nesse caso, $n_1=1$ e $n_2=1,33$ de forma que:

$$r = -0,14 \quad \text{e} \quad t = 0,86 .$$

O sinal negativo de r implica que o sentido do campo elétrico *refletido* é o oposto do campo elétrico incidente. Isso pode ser entendido através da analogia da reflexão de um pulso de onda que se propaga em uma corda quando encontra o nó (ponto fixo) em uma parede. Por outro lado, a *transmissão* ocorre sem inverter o sentido do campo elétrico já que o sinal de t é positivo.

2.2 Incidência oblíqua: polarização perpendicular ou paralela ao plano de incidência

Na incidência oblíqua, a radiação incide formando certo ângulo com a normal da superfície. Dependendo do tipo de polarização da onda incidente (definido pela direção de oscilação do campo elétrico), existe simultaneamente componentes dos campos que são paralelas e perpendiculares à superfície. Uma forma de diminuir a complexidade do problema consiste em estudar, inicialmente, duas situações especiais que podem ser usadas para compor a situação mais geral de polarização em uma direção arbitrária: a polarização perpendicular ao plano de incidência e a paralela ao plano de incidência.

Para isso, primeiramente deduz-se as conhecidas leis da reflexão e lei de Snell. Por uma questão puramente cinemática, para que a descrição ondulatória da radiação eletromagnética funcione do ponto de vista matemático, o termo de fase ($\vec{k} \cdot \vec{r}$) das ondas

incidente, refletida e refratada devem ser idênticos na interface ($\vec{r}_{interface}$). Pela Figura 4, é possível verificar que na interface essa condição fornece:

$$k_i \text{sen } \theta_i = k_r \text{sen } \theta_r = k_t \text{sen } \theta_t \quad .$$

Usando as Eqs. 12, 14 e a definição de índice de refração, temos: $k = \frac{\omega n}{c}$.

Como a frequência angular é a mesma nos dois meios, tem-se:

$$n_1 \text{sen } \theta_i = n_1 \text{sen } \theta_r = n_2 \text{sen } \theta_t \quad ,$$

ou seja, $\theta_i = \theta_r$ e $n_1 \text{sen } \theta_i = n_2 \text{sen } \theta_t$.

Considere agora uma onda plana, polarizada perpendicularmente ao plano de incidência, incidindo com um ângulo θ_i em relação à normal da superfície, conforme mostrado na Figura 4. A onda refletida (r) e transmitida (t) se propagam formando ângulos θ_r e θ_t com a normal à superfície, respectivamente.

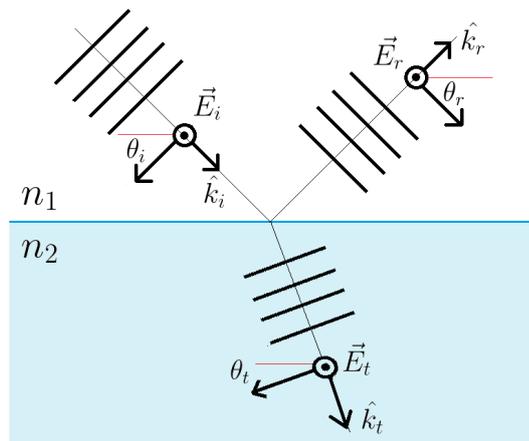


Figura 4 – Polarização perpendicular ao plano de incidência. Os campos elétricos da onda incidente, refletida e transmitida apontam na mesma direção. O mesmo não ocorre com o campo magnético.

Procedendo como no caso da incidência normal, pode-se computar o campo elétrico total fora e dentro do meio e usar as condições de contorno. A partir da Eq. 2:

$$E_i + E_r = E_t \quad \Rightarrow \quad 1 + r = t \quad . \quad (23)$$

Pela Eq. 3:

$$H_i \cos \theta_i - H_r \cos \theta_r = H_t \cos \theta_t \quad \Rightarrow \quad \frac{E_i n_1}{Z_0} \cos \theta_i - \frac{E_r n_1}{Z_0} \cos \theta_r = \frac{E_t n_2}{Z_0} \cos \theta_t \quad ,$$

em que os termos com cosseno aparecem porque busca-se apenas a componente paralela ao plano (ver Figura 4). Pela lei da reflexão, $\theta_i = \theta_r$, logo:

$$n_1 \cos \theta_i (1 - r) = n_2 \cos \theta_t \quad (24)$$

Por meio das Eqs. 23 e 24, obtêm-se:

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (25)$$

$$t_{\perp} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (26)$$

É interessante destacar que, para o caso de incidência normal ($\theta_i = \theta_t = 0$), as Eqs. 25 e 26 recaem às Eqs. 21 e 22. As mesmas considerações feitas anteriormente para a incidência normal com relação ao sinal das grandezas r_{\perp} e t_{\perp} valem aqui.

Considere uma situação semelhante à anterior, porém agora com a polarização paralela ao plano de incidência, conforme ilustrado na Figura 5.

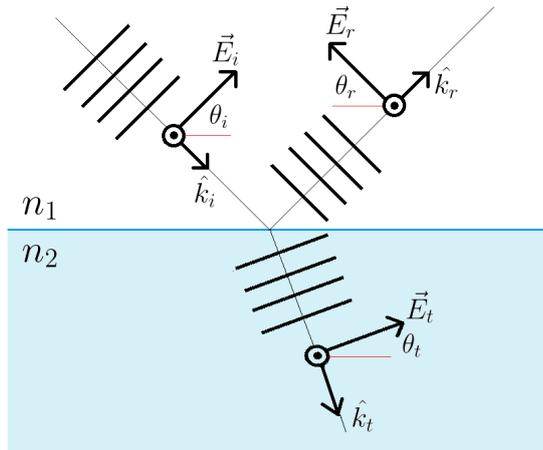


Figura 5 - Polarização paralela ao plano de incidência. Os campos magnéticos da onda incidente, refletida e transmitida apontam na mesma direção. O mesmo não ocorre com o campo elétrico.

Novamente, procede-se avaliando as componentes paralelas à interface pelas Eqs. 2 e 3:

$$E_i \cos \theta_i - E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t \quad \Rightarrow \quad (1 - r) \cos \theta_i = \cos \theta_t t \quad (27)$$

$$H_i + H_r = H_t \Rightarrow \frac{E_i n_1}{Z_0} + \frac{E_r n_1}{Z_0} = \frac{E_t n_2}{Z_0} \Rightarrow (1+r)n_1 = n_2 t \quad . \quad (28)$$

Através das Eqs. 27 e 28, obtém-se:

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad , \quad (29)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad . \quad (30)$$

A Figura 6 representa o comportamento dos coeficientes de reflexão e transmissão da luz polarizada nas duas configurações (perpendicular e paralela) quando a luz troca de meio, passando do ar ($n_1=1$) para a água ($n_2=1,33$).

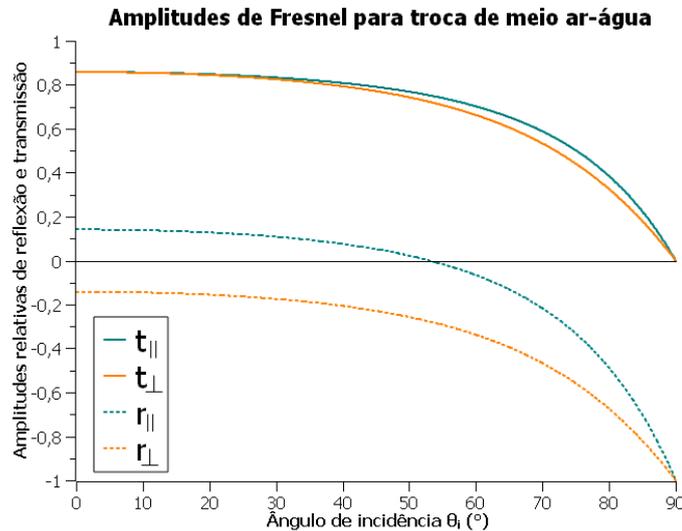


Figura 6 – Para a interação ar-água, a luz transmitida *nunca* inverte o sentido do campo elétrico. Já a luz refletida polarizada perpendicularmente tem o campo *sempre* invertido. Por outro lado, luz refletida polarizada paralelamente só inverte o sentido do campo elétrico a partir de certo ângulo de incidência, conhecido como ângulo de Brewster.

Da Figura 6, extrai-se duas informações importantes: primeiramente, o módulo das amplitudes relativas é menor ou igual a 1, isto é, o campo elétrico das ondas refletidas e transmitidas é sempre menor ou igual ao campo elétrico da onda incidente. Além disso, para luz polarizada paralelamente se identifica a existência de um ângulo de incidência, denominado ângulo de Brewster, para o qual não há nenhuma luz refletida. Usando a Eq. 29 com a lei de Snell, pode-se mostrar que essa situação ocorre se a seguinte condição é satisfeita: $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$.

3. Coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T)

Quando luz de irradiância I_i , em W/m^2 , incide sobre um meio, parte da sua energia é refletida (I_r) e parte é transmitida (I_t). Define-se o coeficiente de reflexão (R) e transmissão (T) de uma superfície como:

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (31)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (32)$$

Os coeficientes R e T podem ser determinados no laboratório didático se a irradiância da luz puder ser estimada, algo factível através de luxímetros. Também é possível calculá-los de maneira teórica através das amplitudes relativas r e t , como será demonstrado agora.

Da teoria eletromagnética, podemos calcular a irradiância de uma onda eletromagnética pelo módulo da média temporal sobre o vetor de Poynting, isto é,

$$I = \langle \vec{S} \rangle_t :$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \Rightarrow I = \langle \vec{E} \times \vec{H} \rangle_t \Rightarrow I = \langle EH \rangle_t ,$$

$$I = \left\langle E \frac{En}{Z_0} \right\rangle_t \Rightarrow I = \frac{n}{Z_0} \langle E^2 \rangle_t .$$

Admitindo que a onda é plana, a oscilação do campo elétrico pode ser descrita

por uma função trigonométrica do tipo seno, de forma que $\langle E^2 \rangle_t = E_0^2 \langle \sin^2 \theta \rangle_t = \frac{E_0^2}{2}$, em

que E_0 é a amplitude da onda e o fator $\frac{1}{2}$ surge como o resultado da média temporal sobre um ciclo de oscilação da função. Assim, a intensidade de uma onda eletromagnética pode ser escrita como:

$$I = \frac{E_0^2 n}{2 Z_0} \cos \theta , \quad (33)$$

em que o cosseno vem do fato de que é preciso levar em consideração a componente da radiação que efetivamente atravessa uma dada superfície, como ilustrado na Figura 7.

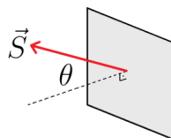


Figura 7 – Vetor de Poynting representando uma onda eletromagnética atravessando uma superfície formando um ângulo com a normal. Somente a componente normal à superfície é responsável pelo transporte de energia através da interface do meio.

Assim, é preciso levar em consideração os ângulos de incidência e reflexão da luz ao calcular o coeficiente de reflexão R . Pelas Eqs. 31 e 33, temos:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{\frac{E_r^2 n_1}{2Z_0} \cos \theta_r}{\frac{E_i^2 n_1}{2Z_0} \cos \theta_i} = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 = r^2 ,$$

onde levou-se em consideração que $\theta_i = \theta_r$. Ou seja, pode-se calcular o coeficiente de reflexão da luz em qualquer situação de polarização pela expressão:

$$R = r^2 . \quad (34)$$

De forma análoga, para calcular o coeficiente de transmissão T é necessário considerar o ângulo de incidência e transmissão. Fazendo a conta (usando a lei de Snell), obtém-se:

$$T = \frac{\operatorname{tg} \theta_i}{\operatorname{tg} \theta_t} t^2 . \quad (35)$$

Em geral, no entanto, não é necessário calcular R e T simultaneamente. Isso porque, pela conservação da energia, $I_r + I_t = I_i$, logo:

$$R + T = 1 . \quad (36)$$

4. Polarização em direção arbitrária e luz não polarizada

Até aqui foram obtidas expressões para lidar com a luz incidente linearmente polarizada perpendicular ou paralelamente ao plano de incidência. A luz do Sol, no entanto, não é polarizada.

Para tratar essa situação, suponha inicialmente que luz linearmente polarizada incide (com ângulo de incidência θ_i arbitrário) sobre uma superfície de forma que a direção de polarização forma um ângulo Φ com o plano de incidência, conforme representado na Figura 8.

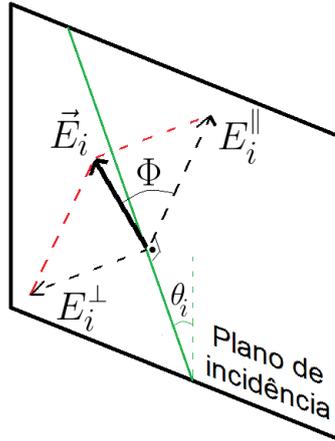


Figura 8 – Luz polarizada em direção arbitrária. A linha contida no plano representa a luz incidente.

Nessa situação, as componentes perpendiculares (E_i^\perp) e paralela (E_i^\parallel) ao plano de incidência podem ser escritas em termos da amplitude do campo elétrico incidente E_i :

$$E_i^\parallel = E_i \cos \Phi \quad , \quad (37)$$

$$E_i^\perp = E_i \sin \Phi \quad . \quad (38)$$

A luz refletida tem amplitude E_r diferente da inicial, podendo também ser decomposta em componentes paralelas e perpendiculares ao plano de incidência. Pelo teorema de Pitágoras, vale:

$$E_r^2 = E_r^{\parallel 2} + E_r^{\perp 2} \quad , \quad (39)$$

onde E_r^\parallel e E_r^\perp são as amplitudes de campo elétrico refletidos na direção paralela e perpendicular ao plano de incidência, respectivamente. Conforme a Eq. 33, admite-se que a intensidade da luz incidente e refletida nessa situação pode ser escrita como:

$$I_i = \frac{E_i^2 n_1}{2 Z_0} \cos \theta_i \quad ,$$

$$I_r = \frac{E_r^2 n_1}{2 Z_0} \cos \theta_r = \frac{E_r^{\parallel 2} n_1}{2 Z_0} \cos \theta_r + \frac{E_r^{\perp 2} n_1}{2 Z_0} \cos \theta_r \quad ,$$

onde a Eq. 39 foi usada. Assim, lembrando que $\theta_i = \theta_r$, o coeficiente de reflexão R_Φ para uma luz polarizada em direção arbitrária, formando um ângulo Φ com o plano de incidência (Eq. 31) fica:

$$R_{\Phi} = \frac{E_r^{\parallel 2} + E_r^{\perp 2}}{E_i^2} = \left(\frac{E_r^{\parallel}}{E_i} \right)^2 + \left(\frac{E_r^{\perp}}{E_i} \right)^2 = \left(\frac{E_r^{\parallel}}{E_i} \right)^2 \cos^2 \Phi + \left(\frac{E_r^{\perp}}{E_i} \right)^2 \sin^2 \Phi ,$$

onde se utilizou as Eqs. 37 e 38. Os termos entre parênteses são definidos como as amplitudes relativas r_{\parallel} e r_{\perp} que, elevadas ao quadrado, fornecem o coeficiente de reflexão (Eq. 34). Logo, podemos escrever R_{Φ} como:

$$R_{\Phi} = R_{\parallel} \cos^2 \Phi + R_{\perp} \sin^2 \Phi . \quad (40)$$

Procedendo de forma análoga, o cálculo do coeficiente de transmissão T_{Φ} fornece o resultado:

$$T_{\Phi} = T_{\parallel} \cos^2 \Phi + T_{\perp} \sin^2 \Phi . \quad (41)$$

A partir de agora, passa-se a avaliar o caso típico da luz não polarizada, como a do Sol. A característica desse tipo de radiação é a não existência de uma direção preferencial de oscilação do campo elétrico. Rigorosamente, a luz do Sol é incoerente, de forma que suas componentes estão fora de fase. No entanto, devido a grande aleatoriedade na direção de oscilação do campo elétrico, admitimos que o módulo do campo elétrico resultante na direção perpendicular ao plano de incidência é igual ao módulo do campo na direção paralela. Nessas condições, $\Phi = 45^\circ$ e as Eqs. 40 e 41 fornecem:

$$R_{np} = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2} , \quad (42)$$

$$T_{np} = \frac{T_{\parallel} + T_{\perp}}{2} , \quad (43)$$

onde R_{np} e T_{np} são os coeficientes de reflexão e transmissão da luz não polarizada, respectivamente. O Quadro 1 ilustra as relações derivadas neste material.

Polarização	Reflexão	Transmissão	Cons. da Energia
Paralela ao plano de incidência	$R_{\parallel} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2$	$T_{\parallel} = \frac{tg \theta_i}{tg \theta_t} \left(\frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2$	$R_{\parallel} + T_{\parallel} = 1$
Perpendicular ao plano de incidência	$R_{\perp} = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2$	$T_{\perp} = \frac{tg \theta_i}{tg \theta_t} \left(\frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2$	$R_{\perp} + T_{\perp} = 1$
Formando ângulo Φ com o plano de incidência	$R_{\Phi} = R_{\parallel} \cos^2 \Phi + R_{\perp} \sin^2 \Phi$	$T_{\Phi} = T_{\parallel} \cos^2 \Phi + T_{\perp} \sin^2 \Phi$	$R_{\Phi} + T_{\Phi} = 1$
Não polarizada	$R_{np} = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2}$	$T_{np} = \frac{T_{\parallel} + T_{\perp}}{2}$	$R_{np} + T_{np} = 1$

Quadro 1 – Resumo das equações que representam o modelo de reflexão e transmissão da luz em superfícies dielétricas de acordo com sua polarização. Apresenta-se R_{\parallel} , R_{\perp} , T_{\parallel} e T_{\perp} com as respectivas amplitudes já substituídas nas Eqs. 34 e 35.

Para ilustrar o resultado teórico de algumas das relações até aqui trazidas, considere a reflexão da radiação monocromática que incide na interface que separa o ar da água, isto é, $n_1=1$ e $n_2=1,33$. A Figura 9 ilustra a previsão teórica para três configurações de polarização dessa radiação (vide Quadro 1).

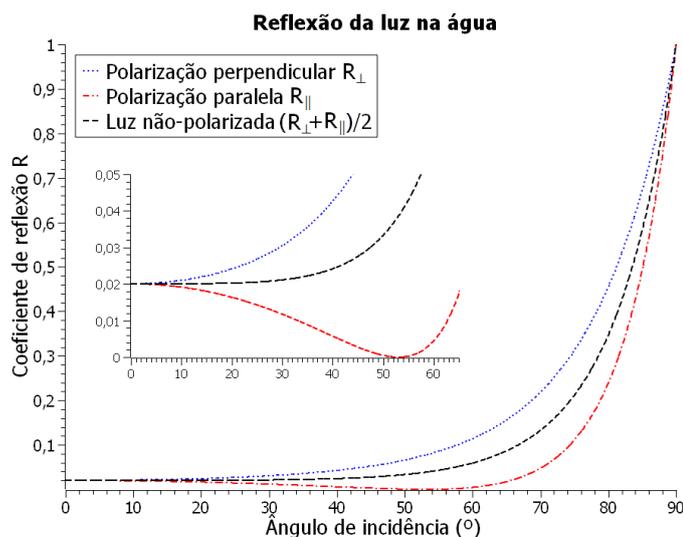


Figura 9 – Percentual da luz refletida na água em função do ângulo de incidência para diferentes tipos de polarização. O gráfico interno destaca o comportamento do evento para

ângulos de incidência menores do que 60 graus. De forma semelhante, um gráfico do percentual de luz transmitida pode ser obtido usando a equação $T=1-R$.

Na Figura 9, é possível identificar que o coeficiente de reflexão para luz polarizada paralelamente ao plano de incidência vai a zero em torno de 53° (curva vermelha), que corresponde ao ângulo de Brewster, situação na qual a luz é totalmente transmitida do ar para a água ($R=0 \Rightarrow T=1$). Já a curva azul, representando o coeficiente de reflexão da luz com polarização perpendicular ao plano de incidência, cresce de forma monotônica a partir de seu valor mínimo, que corresponde ao caso de incidência normal ($\theta_i=0$), indicando que pelo menos 2% da radiação é refletida pela superfície da água. Já a curva preta representa a reflexão da luz não polarizada, obtida a partir da média aritmética entre os dois coeficientes de reflexão. Esse é o caso de interesse para resolver a questão de pesquisa proposta na atividade da relíquia, já que representa a luz do Sol. O valor do coeficiente de reflexão da água nesse caso determina quanta energia solar incidente na superfície é refletida, e, portanto, quanta é transmitida. A análise da Figura 9 indica que o coeficiente de reflexão da luz solar é menor do que 10% para ângulos menores do que 66° , de forma que, pela conservação da energia, mais de 90% da luz entra no meio aquático nesse intervalo angular.

Referências

- [1] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics (John Wiley & Sons, New York, 1962).
- [2] P. Lorrain, Eletromagnetic fields and waves (W. H. Freeman and Company, New York, 1988).
- [3] M. Born & E. Wolf, Principles of optics (Pergamon Press, New York, 1980).
- [4] D. J. Griffiths, Eletrodinâmica (Pearson, São Paulo, 2015).
- [5] E. Hecht, Optics (Addison Wesley, London, 2002).

POLARIZAÇÃO DA LUZ

*Um boato sobre uma relíquia mística de uma tribo ancestral motivou a expedição de um grupo de arqueólogos na região em que a lenda se refere. Segundo guias locais, a lenda conta que a relíquia pode ser vista no fundo de um lago de águas cristalinas a partir da sua margem e observando no sentido oeste. Porém, segundo a lenda, a relíquia só é visível por volta do meio dia, desaparecendo misteriosamente ao longo da tarde. Intrigada com a situação, uma arqueóloga questiona se a reflexão da luz solar sobre a superfície da água pode de alguma forma ofuscar a imagem do fundo do lago. **Quais fatores influenciam na intensidade da luz solar refletida pela superfície? Em quais condições a relíquia é visível para um observador parado na margem do lago?***



Figura 1 (Fonte , último acesso 05/09/2020)

Um observador pode enxergar a relíquia no fundo do lago se a luz refletida em sua superfície chegar aos seus olhos com intensidade suficiente. Para isso, a luz precisa ser transmitida de dentro da água para fora, na direção do observador. No entanto, essa não é a única radiação que chega aos seus olhos. De fato, parte da luz do céu é refletida na superfície da água, ofuscando a imagem da relíquia. A Figura 1 nos dá a dica crucial para começar a entender o problema: a intensidade da luz refletida depende do ângulo de incidência, já que olhando no horizonte do lago se enxerga o céu. Para poder responder às perguntas levantadas, precisamos compreender como se dá a interação da radiação eletromagnética na interface entre dois meios. Quando a luz incide na interface entre dois meios, parte dela é transmitida e parte é refletida, sendo que três fatores influenciam nesse processo: a) o ângulo de incidência da luz, b) o índice de refração do meio e c) a polarização da luz. Nesse Episódio de Modelagem, damos particular enfoque ao conceito de polarização e como a transmissão e reflexão da radiação eletromagnética pela matéria é influenciada por essa propriedade intrínseca da luz.

A polarização da radiação é um fenômeno do cotidiano e seu estudo é de extrema importância. Para citar alguns exemplos, podemos mencionar as antenas de telecomunicação, que emitem radiação eletromagnética polarizada – os satélites de telecomunicação podem emitir em duas direções perpendiculares para propagar o dobro da informação com a mesma frequência; a luz do céu é polarizada, de forma que nossos óculos de Sol possuem polarizadores em direções específicas para bloquear a intensidade luminosa – diversos insetos utilizam a polarização do céu como uma bússola para se orientar; o cinema 3D projeta duas imagens diferentes na mesma tela, cada uma em uma polarização para que possamos ter o efeito de profundidade utilizando os óculos. Existem algumas maneiras de produzir luz polarizada. Passamos a citar as três principais: polarização por absorção, por reflexão e por espalhamento.

Polarização por absorção

A luz é descrita por campos elétricos e magnéticos que oscilam em um plano perpendicular à sua direção de propagação. Um polarizador pode ser entendido como uma rede de fios condutores, onde os elétrons podem oscilar em linha. O campo elétrico variável da luz incidente faz com que os elétrons oscilem em uma única direção (que coincide com a direção dos condutores), absorvendo todas as componentes de campo elétrico da radiação incidente ao longo dessa direção, deixando apenas a componente perpendicular aos “fios” passar. A direção em que o campo elétrico passa é chamada de eixo de transmissão do polarizador. Desta forma, é possível produzir luz polarizada por absorção.

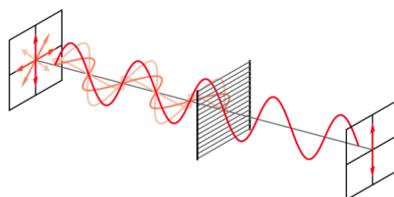


Figura 2 (**Fonte**, último acesso 05/09/2020)

Se a luz incidente de intensidade I_0 já for polarizada, é possível calcular a intensidade da luz transmitida I_T pela Lei de Malus:

$$I_T = I_0 \cos^2 \theta, \quad \text{Eq. (1)}$$

onde θ é o ângulo entre o eixo de transmissão e a direção de polarização da luz incidente. Podemos considerar que a intensidade da radiação transmitida, se a luz incidente não for polarizada, é simplesmente a metade da radiação incidente, isto é:

$$I_T = \frac{I_0}{2}, \quad \text{Eq. (2)}$$

já que a média sobre o período da função $\cos^2\theta$ é $\frac{1}{2}$. Ao incidir a luz de um *laser* sobre um polarizador, verifica-se, para alguns tipos de *lasers* de gas, que a intensidade da luz transmitida varia com o tempo, podendo oscilar entre zero e um valor máximo. Isso ocorre porque alguns desses lasers possuem ciclos longos de estabilização de sua direção de polarização. Já *lasers* de diodo são mais estáveis e essa oscilação da direção de polarização não ocorre. De qualquer forma, uma boa forma de verificar a estabilidade da direção de polarização de uma fonte luminosa é fazê-la passar por um polarizador e medir a intensidade da luz transmitida em função do tempo.

Polarização por reflexão

Quando uma radiação incide sobre uma superfície transparente dielétrica²⁵, parte dela é refletida e parte é refratada. Considere luz não-polarizada, representada idealmente por raios de luz, conforme a Figura 3, atravessando uma superfície dielétrica transparente. O conceito „raio de luz“, próprio da Ótica Geométrica, será usado quando nos referirmos às grandezas macroscópicas como ângulo de incidência, reflexão e transmissão. Já a descrição da interação da luz com a interface que separa dois meios é melhor descrita por meio de um tratamento ondulatório da radiação, próprio da Ótica Física, que conduz aos resultados apresentados a seguir. O raio de luz incidente forma com a normal um plano chamado plano de incidência. Repare que, inicialmente, a luz incidente tem componentes contidas no plano e componentes fora do plano. Existe um ângulo de incidência, chamado Ângulo de Brewster θ_B , no qual a luz refletida contém apenas a componente perpendicular ao plano de incidência, anulando todas as outras componentes e se tornando totalmente polarizada. Neste mesmo ângulo, a luz refratada se torna parcialmente polarizada, com a sua componente perpendicular ao plano de incidência muito reduzida. Pode-se mostrar ainda que o ângulo entre os raios refletidos e refratados é de 90° .

²⁵ Uma superfície dielétrica é aquela capaz de deslocar de maneira reversível as nuvens eletrônicas dos átomos que a compõem (materiais isolantes). Como exemplos, podemos citar a água pura, o vidro e o acrílico.

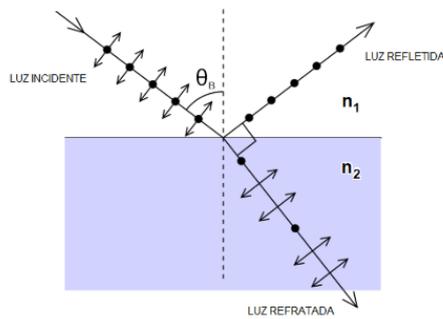


Figura 3 (Fonte , último acesso 05/09/2020)

Dessa forma, é possível produzir luz polarizada por meio da reflexão. De maneira semelhante, se a luz incidente for polarizada em uma direção paralela ao plano de incidência, não haverá reflexão da luz no Ângulo de Brewster, pois apenas a componente perpendicular ao plano de incidência é refletida nesse ângulo. O ângulo de Brewster pode ser calculado pela seguinte relação:

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}, \quad \text{Eq. (3)}$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração do meio 1 e 2, respectivamente.

Se a luz refletir em uma superfície condutora, como a dos metais, então a luz pode ou não ser polarizada por reflexão. Por exemplo, se luz não polarizada no comprimento de onda do visível incidir no ouro, sua componente paralela ao plano de incidência sofre mais atenuação em comparação com sua componente perpendicular, de forma que a luz refletida é parcialmente polarizada na direção perpendicular. No entanto, o coeficiente de reflexão no ouro é muito grande (para qualquer ângulo de incidência, em qualquer direção de polarização), de forma que, é uma boa aproximação considerar que a luz não polarizada se mantém não polarizada ao refletir na superfície do ouro.

Polarização por espalhamento

O espalhamento ou dispersão da luz corresponde à mudança de direção da radiação após interagir com a matéria. Esse fenômeno pode gerar polarização. Vamos considerar o espalhamento da luz não-polarizada proveniente do Sol na nossa atmosfera: os elétrons das moléculas de ar suspensas absorvem a radiação incidente, vibrando em alguma direção contida no plano perpendicular à propagação da radiação, funcionando como um dipolo oscilante. Cada um desses elétrons funciona como uma pequena antena, reemitindo a radiação absorvida em direções aleatórias. Se a direção de emissão for paralela à radiação

incidente (0° ou 180°), a radiação reemitida também é não-polarizada. Se a direção de emissão for perpendicular à radiação incidente (90° ou 270°), a radiação reemitida será linearmente polarizada. Sendo reemitida em qualquer outra direção, a radiação será parcialmente polarizada. É importante reforçar que apenas a luz que vem *diretamente* do Sol é não polarizada. Entretanto, mesmo quando se considera a luz espalhada pelo Sol, desde que não muito afastada dele, ainda é uma boa aproximação considerá-la como não polarizada: para distancias menores que 30° do Sol, o grau de polarização da luz espalhada é menor que 10%!



Figura 4

Essas situações podem ser evidenciadas na Figura 4. Quando o Sol está a pino, a polarização da luz do Sol é predominantemente horizontal ao longo de todo o horizonte. Quando o Sol se põe no oeste, os observadores que olham ao longo do meridiano S-N enxergam luz predominantemente polarizada na vertical, enquanto os observadores olhando diretamente para o crepúsculo veem luz predominantemente não-polarizada. É importante observar que a polarização se torna aleatória se a luz for absorvida e reemitida múltiplas vezes antes de atingir o observador. Cada comprimento de onda da radiação incidente é espalhado com maior ou menor intensidade, dependendo principalmente da composição atmosférica: lembre que o céu é azul por que a radiação azul tem um dos menores comprimentos de onda do espectro visível, sofrendo assim mais espalhamento Rayleigh do que outros comprimentos de onda. Em ambientes poluídos ou com muita poeira, as radiações com comprimentos de onda maiores, como na faixa do vermelho, tendem a sofrer maior dispersão, tornando o céu mais avermelhado.

Episódio de Modelagem:

Queremos investigar como a energia luminosa da radiação se comporta ao incidir na interface entre dois meios materiais. Vimos que a transferência de energia depende do estado de polarização da luz e aqui resumimos as relações necessárias para lidar com essa situação. Suponha que radiação com intensidade I_0 , polarizada em alguma direção, incide em uma superfície (formando certo ângulo de incidência), sofrendo nesse processo simultaneamente reflexão, absorção e transmissão pelo meio. Em cada um dos processos a intensidade da luz refletida, absorvida e transmitida é I_R, I_A, I_T , respectivamente. Define-se assim os coeficientes de reflexão (R), absorção (A) e transmissão (T) como:

$$R = \frac{I_R}{I_0}, \quad A = \frac{I_A}{I_0}, \quad T = \frac{I_T}{I_0}. \quad \text{Eqs. (4)}$$

Pela conservação da energia, vale: $R + A + T = 1$. Por exemplo, para luz polarizada, a Lei de Malus (Eq. 1) pode ser escrita como:

$$T = \cos^2 \theta. \quad \text{Eq. (5)}$$

Para calcular o coeficiente de reflexão e transmissão da luz em uma superfície dielétrica, como a água, vidro e acrílico, precisamos usar as equações de Fresnel. Sendo θ_i o ângulo de incidência da luz se propagando em um meio com índice de refração n_1 , θ_t o ângulo de refração da luz transmitida para o meio com índice de refração n_2 , então distingue-se duas situações:

- **Polarização perpendicular:** O campo elétrico da luz incidente é perpendicular ao plano de incidência.

$$R_{\perp} = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad \text{Eq. (6)}$$

- **Polarização paralela:** O campo elétrico da luz incidente é paralela ao plano de incidência.

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad \text{Eq. (7)}$$

- **Luz não-polarizada:** O campo elétrico da luz incidente não tem direção preferencial de propagação. Nesse caso, vale a relação (veja a dedução no texto disponibilizado sobre as equações de Fresnel):

$$R_{np} = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2} \quad \text{Eq. (8)}$$

Você pode impor a condição de Brewster na Eq. 7 ($\theta_i + \theta_t = 90^\circ$) para mostrar que $R=0$ nessa situação. Em ambas as relações acima, podemos usar a lei de Snell para eliminar uma das variáveis angulares e acabar apenas com as grandezas conhecidas (n_1 e θ_i): $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$.

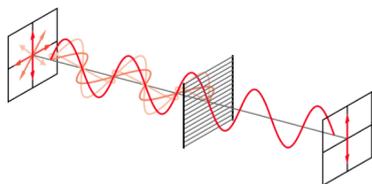
Para realizar essa investigação, você deve ter certeza sobre o estado de polarização da fonte luminosa antes de fazer as medidas. A maneira mais prática de se obter radiação polarizada é fazer luz não-polarizada passar por um polarizador de absorção, mesmo que isso diminua sua intensidade. Lembre também de usar fontes colimadas, evitando perdas de energia por diminuição da intensidade luminosa. As grandezas mensuráveis nessa atividade são a iluminância inicial E_{V_0} , a iluminância final (depois da reflexão ou transmissão) E_V e os ângulos (θ na lei de Malus e θ_i). Admite-se que o índice de refração do ar é 1.

Atividade Experimental:

Nesta atividade você determinará os coeficientes de reflexão R ou de transmissão T da luz polarizada, com o objetivo de estudar a transferência de energia nesses processos.

Investigação A

A luz pode ser polarizada por absorção através de um filtro polarizador.



Avalie a adequação da Lei de Malus para descrever a transmissão (T) de energia da luz polarizada.

Investigação B

Investigue a reflexão (R) da luz polarizada paralela ou perpendicularmente ao plano de incidência quando ela é refletida em uma superfície dielétrica como o vidro ou o acrílico.



Fonte (último acesso: 05/09/2020)

Existe um ângulo em que não existe reflexão? Em que situação?

Investigação C

Em que condições a “reliquia mística” é visível para o(a) arqueólogo(a) que observa a água?



Investigue a reflexão (R) da luz não-polarizada na superfície da água. Em torno de que horas a relíquia é visível para um observador parado na superfície da água olhando na direção oeste?

Escolha uma das investigações sugeridas e/ou construa experimento(s) com o objetivo de realizar seus estudos sobre a transmissão de energia por polarização. Se for do seu interesse você pode propor outra linha de investigação para conduzir o seu experimento.

Lembre-se: as **Questões Norteadoras para o Desenvolvimento de Experimentos** guiarão seu trabalho nessa investigação!

LEIA MAIS!

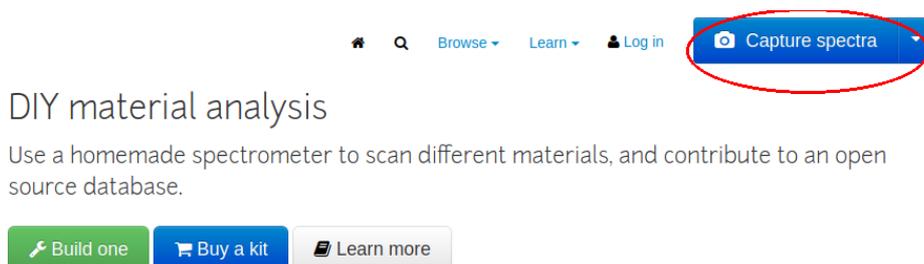
- [A luz do laser é polarizada?](#)
- [Reflexão no ângulo de Brewster](#)
- [Teoria de antena](#)
- [Polarização do céu](#)
- [Ondas eletromagnéticas em meios lineares](#)

Apêndice J - Material suplementar do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”

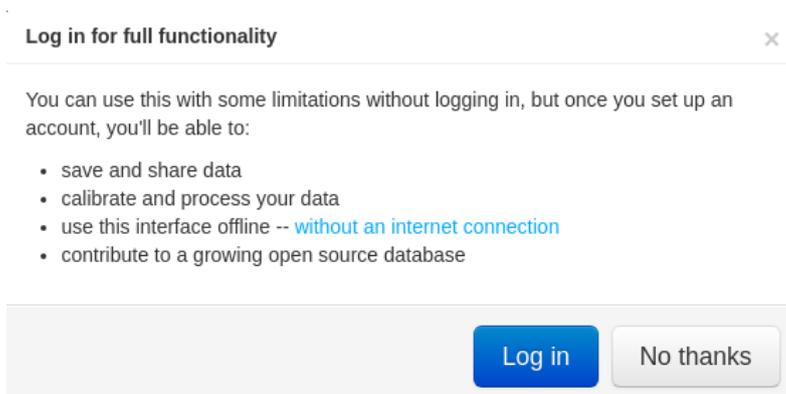
TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO ESPECTRÔMETRO

Tendo construído seu espectrômetro de bolso, siga os seguintes passos para realizar uma medida quantitativa com ele.

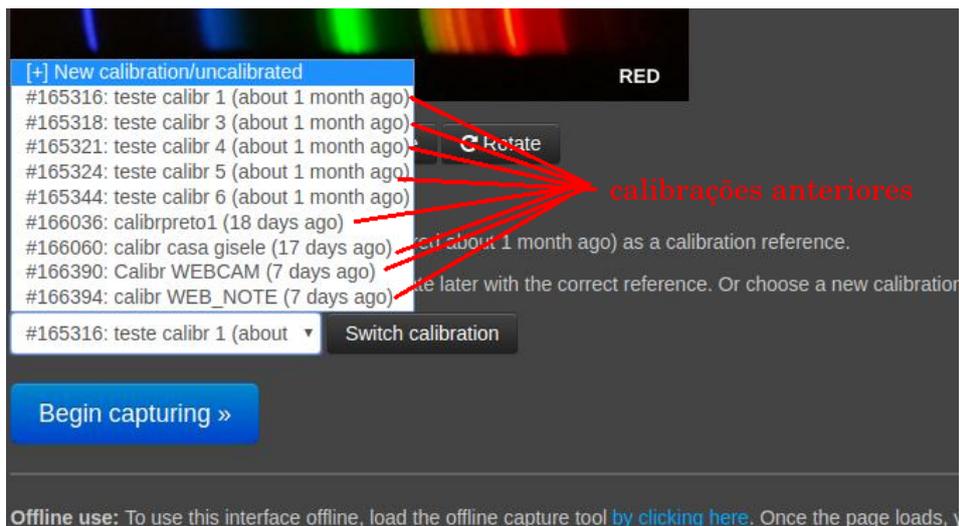
1) Acesse o site <https://spectralworkbench.org/> e clique em **Capture** spectra no canto superior direito.



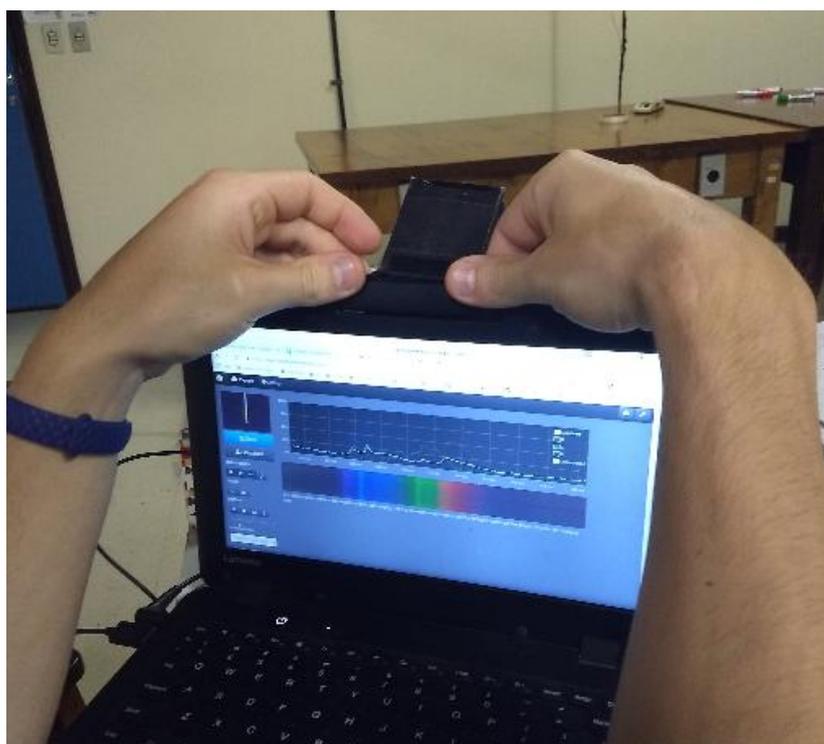
2) Faça **Login** com sua conta do google, facebook, twitter ou crie sua própria conta no site. Verifique se você está realmente logado, pois do contrário suas imagens não ficarão salvas. Às vezes ele te leva para outra página depois de logar, e quando você volta ele diz que você não está logado. Faça o login novamente, nesse caso.



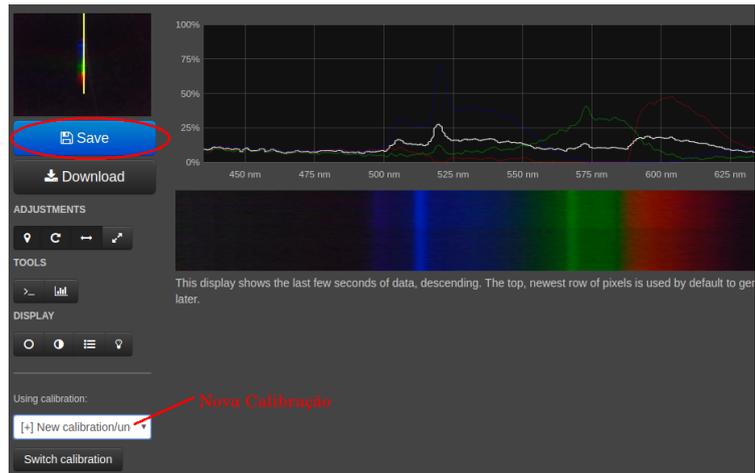
3) Você sabe que está logado quando as suas imagens e calibrações anteriores aparecem no menu no canto inferior esquerdo. Se você já tem uma calibração feita, apenas selecione ela no menu **Switch calibration**. Se você quer fazer outra calibração ou para fazer sua primeira calibração, clique em **[+] New calibration/uncalibrated**.



4) Acople (sem fixar, apenas segurando com as mãos mesmo) o espectrômetro na sua câmera/Webcam/celular e clique em **Begin capturing**. Aponte a câmera/Webcam/celular junto com o espectrômetro para uma lâmpada fluorescente qualquer, até que você obtenha o espectro típico de emissão do mercúrio.

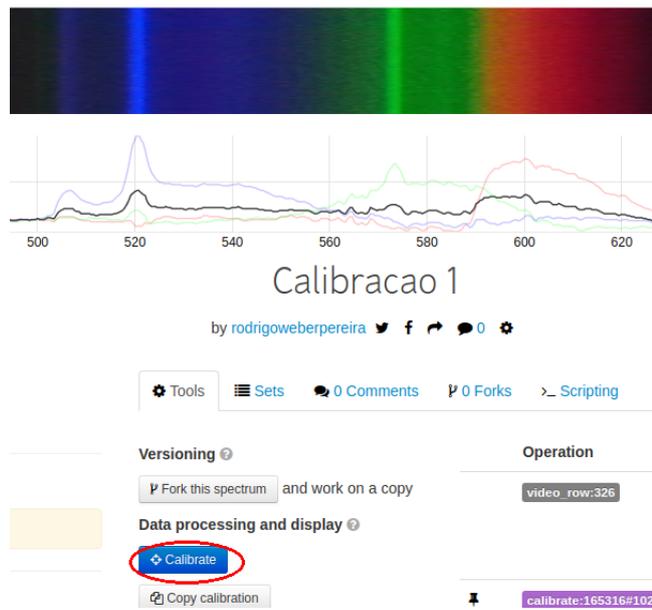


5) Uma vez que você achou a posição ideal do espectrômetro, fixe-o com fita adesiva na(o) câmera/Webcam/Celular e cubra qualquer entrada de luz que não venha diretamente da fenda com fita isolante preta (por exemplo). Clique no botão **Save** em seguida.

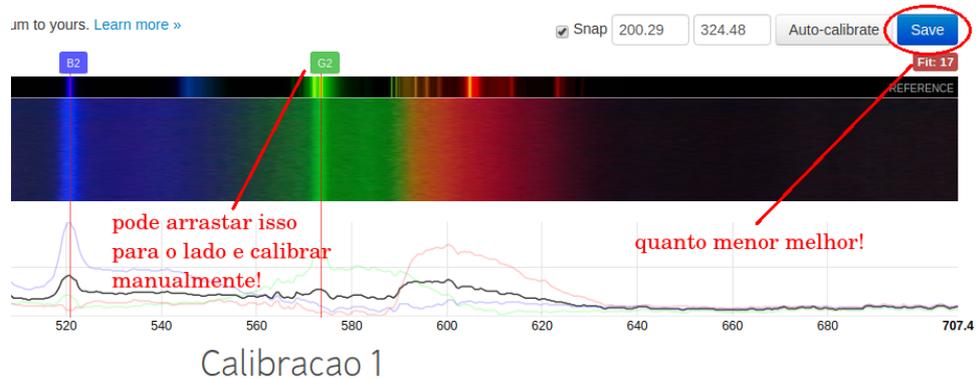


6) Dê um nome para a sua calibração e clique no botão **Save with selected calibration**.
 OBS: o nome não pode conter acentos, espaços em branco e caracteres especiais.

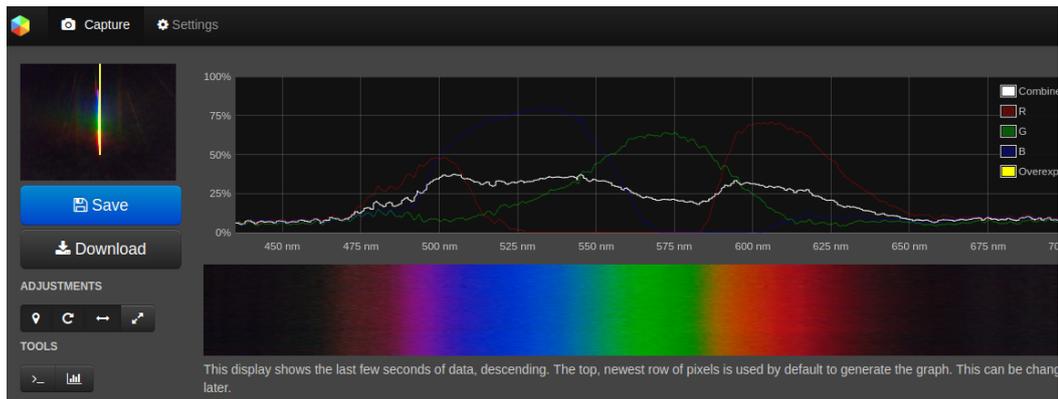
7) Em seguida uma vai abrir a página onde todos os seus espectros medidos serão salvos. Para tornar a imagem que você fez uma “calibração” (isto é, para torná-la a referência de futuras medidas), aperte no botão **Calibrate**. Só faça esse processo se a imagem for a da lâmpada de Hg!



8) Vai aparecer o espectro de emissão do mercúrio comparado com o seu espectro. Nesse ponto é que você descobre se a calibração ficou boa. O ideal é que o indicador **Fit** (na figura aparece **Fit: 17**) fique verde, e quanto menor melhor. Arrastando **G2** e **B2** de um lado para o outro você consegue fazer o ajuste manual. Para fazer calibração automática clique em **Auto-Calibrate** (às vezes a calibração manual fica com um Fit melhor!). Concluída a sua calibração, aperte no botão **Save**.

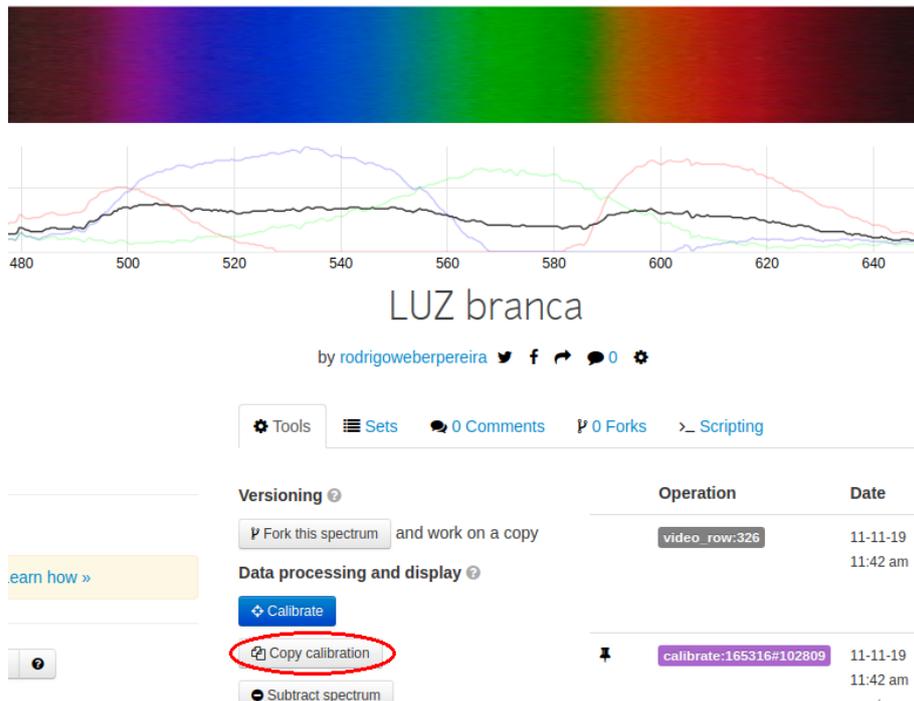


9) Pronto, agora você já pode fazer suas medidas. **Não mexa mais no espectrômetro, pois do contrário sua calibração se perde!** É aconselhável fazer esse processo de calibração antes de fazer qualquer sequência de medidas. Para começar a medir, aponte seu espectrômetro para alguma fonte luminosa. A figura abaixo mostra o espectro de emissão de uma lâmpada incandescente (luz branca):



10) Não se preocupe em selecionar uma calibração agora. Apenas clique em salvar quando estiver satisfeito com a imagem e dê um nome para a figura (também não se preocupe com a calibração):

11) Com o espectro aberto na página do software, você tem que aplicar a calibração feita anteriormente para poder fazer uma análise quantitativa. Para isso, clique no botão **Copy calibration**.



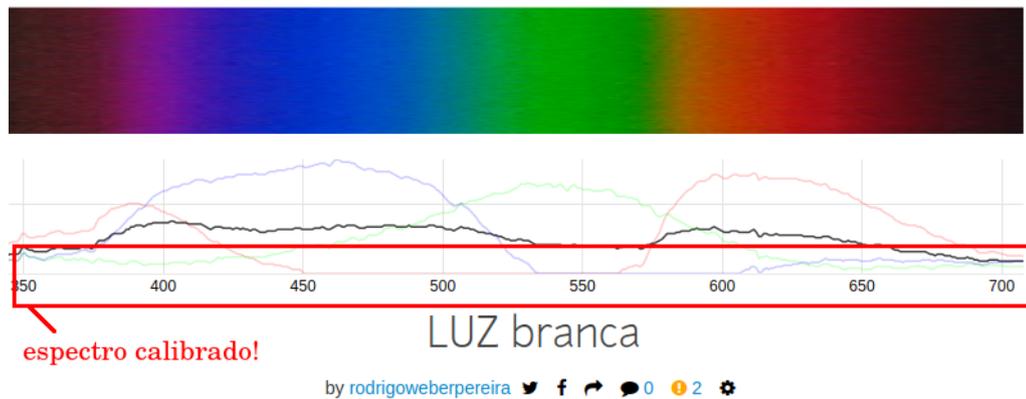
12) Em seguida, na janela lateral que aparece na direita você pesquisa a calibração feita recentemente pelo nome (ou clicando na lupa, simplesmente). Encontrado a calibração desejada, clique em **Apply** para que os comprimentos de onda da luz de mercúrio sirvam de calibração para calcular o comprimento de onda da sua medida em particular.

clique aqui para mostrar suas calibrações recentes. clique aqui para aplicar a calibração.

Use data from an earlier calibrated spectrum to calibrate this one.

Search	Your spectra
#166632: Calibracao 1	by rodrigoweberpereira 31 minutes ago Apply
#166416: Ar atmosf	by rodrigoweberpereira 7 days ago Apply
#166404: Ne	by rodrigoweberpereira 7 days ago Apply

Feito isso (aguarde alguns segundos) você deve notar uma mudança no gráfico abaixo de sua imagem, indicando que a calibração foi aplicada e as cores da imagem devem bater com o comprimento de onda associado (Ex: o azul tem que aparecer em torno da região 450 nm, enquanto o vermelho em volta da região 625 nm).



13) Para fazer uma análise quantitativa do espectro, basta escolher um formato de *output* no canto inferior esquerdo:



Os dados vêm na forma de planilha, onde o comprimento de onda (Wavelength) está em nanômetros (nm). Os valores Red, Green e Blue são as intensidades relativas em cada cor e Average é a intensidade média (nas três cores).

	A	B	C	D	E	
1	Wavelength	Average	Red	Green	Blue	
2	258	17.8	20.4	12.75	17.85	
3	258.9	17.8	20.4	12.75	17.85	
4	259.8	17.8	20.4	12.75	17.85	
5	260.7	17.8	20.4	12.75	17.85	
6	261.6	15.3	17.85	12.75	17.85	
7	262.5	12.7	17.85	10.2	15.3	
8	263.4	12.7	15.3	10.2	15.3	
9	264.3	12.7	15.3	10.2	15.3	
10	265.1	12.7	15.3	10.2	15.3	
11	266	15.3	17.85	12.75	17.85	
12	266.9	15.3	17.85	12.75	17.85	
13	267.8	15.3	17.85	12.75	17.85	
14	268.7	15.3	17.85	12.75	17.85	
15	269.6	15.3	17.85	12.75	17.85	
16	270.5	15.3	17.85	12.75	17.85	
17	271.4	15.3	17.85	10.2	17.85	
18	272.2	15.3	17.85	12.75	17.85	
19	273.1	17.8	20.4	12.75	20.4	
20	274	17.8	20.4	15.3	22.95	

Repare que essa intensidade luminosa não é em Lux! Trata-se apenas de uma medida relativa de saturação do CCD da câmera. Os valores podem variar no intervalo [0-255], por isso, para obter a saturação do pixel, basta dividir os resultados por “255”.

Apêndice K - Guia da Atividade do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”

ESPECTROSCOPIA

Atualmente as telas dos dispositivos eletrônicos são vendidas comercialmente alegando poder reproduzir mais de 16 milhões de cores diferentes (apesar do olho humano reconhecer pouco mais do que 10 milhões). Com uma simples lente de aumento é possível olhar de perto a superfície dessas telas e constatar que existem várias unidades iguais formadas por três cores, apenas: vermelho, verde e azul. Essa unidade forma um pixel. **Como um pixel de três cores pode gerar todas as cores que reconhecemos nas telas? De maneira geral, como é possível produzir milhares de cores com apenas três?**

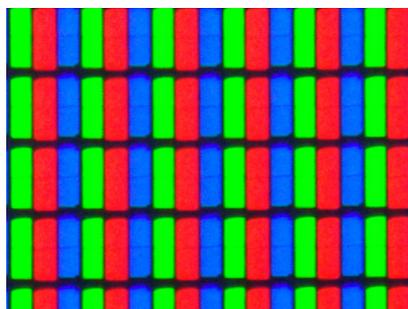


Figura 1 (Fonte, último acesso em 26/10/2020)

Nós associamos as cores a um comprimento de onda específico dentro espectro eletromagnético. Mas a percepção das cores, na verdade, é determinada por dois fatores: a frequência e a interpretação humana. Em 1802, o médico oftalmologista e físico inglês Thomas Young postulou que as cores percebidas pelo olho humano podem ser obtidas pela combinação de três cores, a saber, vermelho, verde e azul (em inglês, *Red, Green, Blue*, sigla RGB). Em 1866, o físico alemão Hermann von Helmholtz confirmou os resultados de Young experimentalmente e postulou a existência de três tipos de células capazes de gerar impulsos nervosos, hoje chamadas de “cones”, cada uma responsável por dar a sensação das cores vermelho, verde e azul. Essas células podem ser excitadas por vários comprimentos de onda da luz, conforme a figura 2.

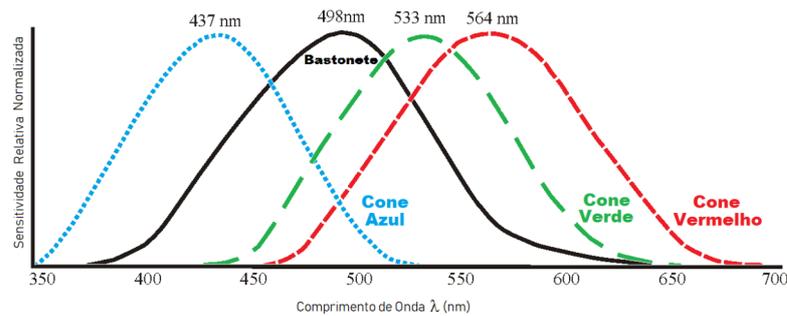


Figura 2 (Fonte: Adaptado de Dowling, 1987).

Na Figura 2, é mostrada a sensibilidade relativa normalizada de cada uma dessas células - cada uma tem uma sensibilidade diferente para um determinado comprimento de onda! A excitação simultânea dessas células produz pulsos elétricos em diferentes intensidades, que são interpretados pelo nosso cérebro, fornecendo a noção de cor²⁶.

Por exemplo, luz monocromática amarela (575 nm) excita os cones vermelhos e verde simultaneamente, mas não o cone azul. Da mesma forma, luz monocromática vermelha (564 nm) excita tanto os cones verdes quanto os vermelhos, mas uma vez que a sensibilidade do cone vermelho é bem maior para esse comprimento de onda, o cérebro interpreta a cor como vermelha.

Na Figura 2 também está representada a sensibilidade de uma célula nervosa ocular chamada “bastonete”, que está associada com a percepção luminosa de baixíssimo brilho²⁷ (visão noturna) e com a visão periférica do olho. Os bastonetes não conseguem distinguir cores. Os cones, por outro lado, são mais sensíveis a radiações mais brilhantes, associadas com a luz do dia. Nossa percepção de cores sofre a influência de outros fatores como o contexto no qual a imagem está inserida. O contraste entre a intensidade luminosa de radiações provenientes de regiões vizinhas afeta nossa capacidade de diferenciar cores, na medida em que nosso cérebro busca compensar pequenas diferenças na intensidade de radiação para facilitar o reconhecimento de padrões. Na Figura 3, por exemplo, as elipses têm todas a mesma cor.

²⁶ A noção de cor está associada com a chamada visão fotópica.

²⁷ Visão escotópica.



Figura 3 (Fonte: Autoria própria)

O diagrama CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), conforme a Figura 4, é o resultado de um estudo profundo sobre a natureza da visão humana. Esse diagrama representa todas as cores percebidas pelo olho humano. A curva superior do gráfico representa as cores puras, presentes no arco-íris, e os números em azul representam o comprimento de onda (em nanômetros) associados com essas radiações. As cores puras são aquelas produzidas por *lasers*, sendo consideradas radiações monocromáticas. Mas como você poderia determinar se luz proveniente de uma fonte aparente monocromática é de fato monocromática? Por exemplo, as cores marrom, roxo, rosa-choque e magenta não são puras e devem ser necessariamente geradas a partir de uma composição de cores. A luz amarela, por outro lado, pode se apresentar na forma pura, isto é, como um comprimento de onda único ou como uma mistura de radiações monocromáticas verde e vermelho! As cores dentro do diagrama não resultam de uma radiação monocromática e só podem ser obtidas através de uma combinação de radiações puras entre os comprimentos de onda do espectro visível.

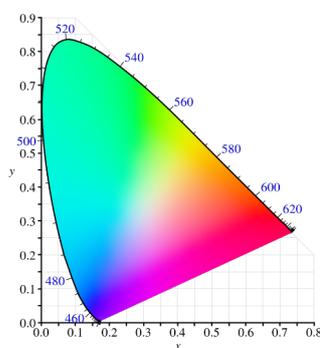


Figura 4 (Fonte, último acesso em 26/10/2020)

Telas de computadores, celulares, máquinas fotográficas e projetores conseguem reproduzir apenas uma região de cores dentro diagrama CIE, sendo esta paleta de cores característica chamada de Gamut. Atualmente, o Gamut mais utilizado pelas telas de dispositivos visuais é o sistema sRGB, que corresponde a uma região triangular limitada dentro do diagrama CIE: **nesse sistema, uma imagem nunca poderá ser fiel à realidade, já que nem todas as cores reais estão dentro da região triangular.**

Como compor as componentes monocromáticas do espectro eletromagnético para formar as cores visíveis para os humanos? Nesse episódio de modelagem buscaremos aprofundar nosso entendimento sobre a região visível do espectro eletromagnético através, da construção de um espectrômetro.

Episódio de Modelagem: Em geral, para medir as diferentes componentes espectrais de radiação de uma fonte luminosa utiliza-se um espectrômetro, que pode representar o espectro de emissão ou absorção da amostra em questão.

Nesse episódio de modelagem aprenderemos a construir um espectrômetro de bolso capaz de fazer medidas quantitativas de espectros luminosos com precisão de 5nm! O projeto do espectrômetro foi adaptado da iniciativa <https://publiclab.org/>, sendo necessário apenas papel, fita adesiva e um DVD-R para sua construção, como mostra a Figura 5.

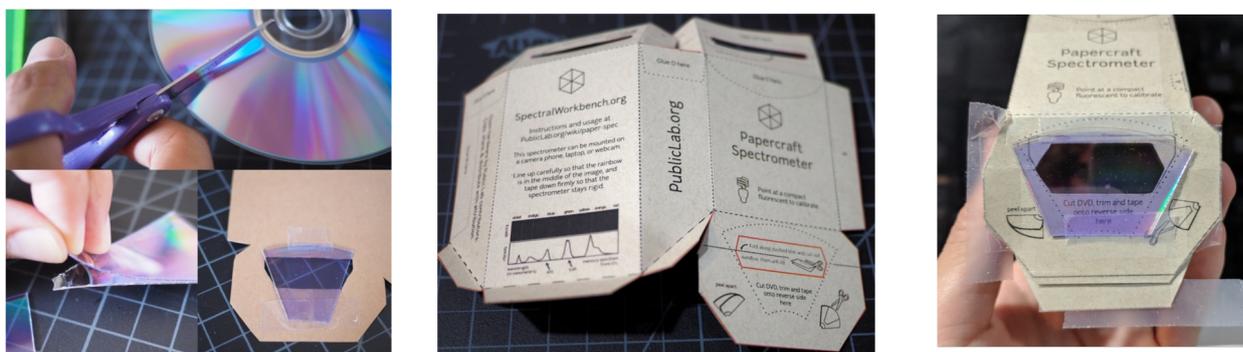


Figura 5 (Fonte, último acesso em 26/10/2020)

Nesse espectrômetro, a luz a ser analisada entra na caixa por uma fenda fina e sofre difração ao atravessar um DVD-R colocado na saída da caixa. A luz difratada é analisada por uma câmera (Webcam, celular, etc.), que mede o comprimento de onda de cada componente da luz difratada baseada em uma calibração feita anteriormente com luz de uma lâmpada de mercúrio. Essa calibração pode ser feita usando um *software* automatizado chamado SpectralWorkbench (<https://spectralworkbench.org/>).

Mesmo um pedaço de CD pode ser utilizado como rede de difração para espalhar a luz em ângulos diferentes. Isso porque um CD contém minúsculas ranhuras como indica a Figura 6 (cerca de 600 ranhuras/mm).

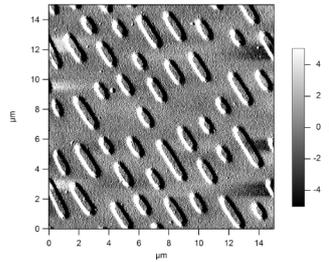


Figura 6 - Um CD visto no microscópio ([Fonte](#), último acesso 26/10/2020)

É necessário, no entanto, remover a capa metálica refletora do CD, ficando apenas com a parte de plástico, pois queremos que a luz o atravesse, podendo assim chegar na câmera. Esse processo é mais simples de ser feito em um DVD-R, que pode ser desmontado facilmente. Além disso, por ter mais ranhuras por mm (~1350), o ângulo de difração é maior:

$$n\lambda = h \cdot \text{sen}\theta; n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Eq. (1)}$$

Na Eq. 1, n é a ordem do máximo, λ é o comprimento de onda, θ é o ângulo de difração do n -ésimo máximo e h é o inverso da densidade de ranhuras por unidade de comprimento. Um maior número de fendas garante uma maior resolução da imagem também ($R = Nn$, onde N é o número de fendas e n a ordem dos máximos).

O espectrômetro é construído de forma tal que a câmera detecta apenas um dos máximos de difração da luz que entra na fenda e sofre difração no DVD-R. Baseado na posição em que a radiação é detectada no CCD da câmera, é possível estimar o comprimento de onda usando a Eq. 1. Nosso espectrômetro, no entanto, faz isso por meio da simples comparação com a posição das linhas do espectro de emissão do mercúrio, como indicado na Figura 7.

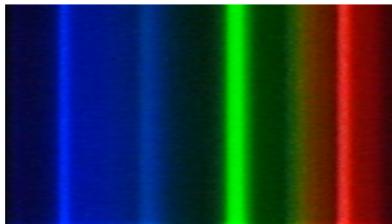


Figura 7 - Espectro de emissão da lâmpada de vapor de Hg. (Fonte: autoria própria)

Como o espectro de emissão do mercúrio é conhecido, sabemos de antemão qual o comprimento de onda de cada uma de suas linhas. O *software* utiliza isso como referência,

de forma que o espectrômetro pode ser usado para medir qualquer outra fonte luminosa depois de calibrado.

No Moodle foram disponibilizados:

- A folha para recorte do espectrômetro, que deve ser impressa frente e verso.
- O tutorial de utilização do espectrômetro com o *software* SpectralWorkbench.

O objetivo da atividade consiste em aprender a usar o espectrômetro em duas situações típicas: análise do espectro de absorção e emissão. Para a investigação, você precisa saber que um espectro é o complementar do outro, como indica a Figura 5.

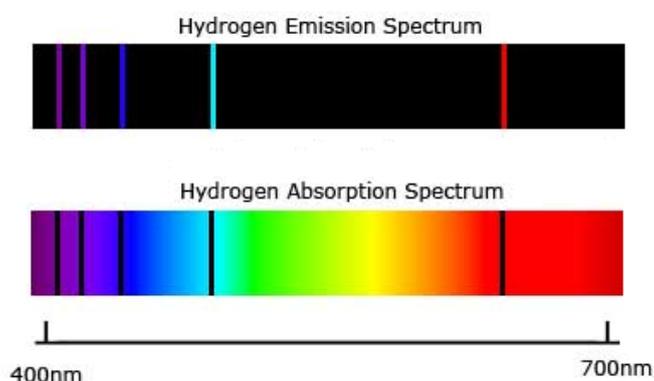


Figura 8 – A complementariedade dos espectros de emissão e absorção do Hidrogênio.

([Fonte](#), último acesso em 26/10/2020)

O espectro de emissão corresponde à luz emitida por uma substância quando seus elétrons são excitados, emitindo luz ao voltar para estados menos energéticos. Já o espectro de absorção ocorre quando uma substância é iluminada com radiação de espectro contínuo (luz branca): nessa situação, em vez de emitir luz, a substância absorve aqueles comprimentos de onda que correspondem ao espectro de emissão. Assim, observa-se o espectro contínuo, exceto por esses comprimentos de onda absorvidos.

Atividade Experimental: Nesta atividade, podemos construir o espectrômetro portátil para investigar o funcionamento dos pixels de uma tela, estudando o processo de formação das cores pelo sistema RGB. O espectrômetro também é usado para medir o espectro de absorção ou espalhamento de uma amostra. Para realizar o experimento, é preciso calibrá-lo usando uma lâmpada de mercúrio, mas sem estar no laboratório, não temos a facilidade para isso. Neste semestre, podemos usar os dados fornecidos e a calibração feita por nós anteriormente. Abaixo sugerimos três possibilidades de investigação:

Investigação A:

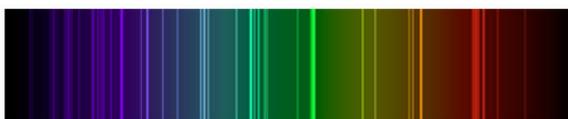
Determine a composição espectral dos filtros coloridos disponíveis no laboratório. Em que medida esses filtros podem ser chamados de monocromáticos? Meça também o espectro de emissão de um laser e compare os resultados obtidos com os filtros.



Laser ([Fonte](#), último acesso: 26/11/2020)

Investigação B:

A espectroscopia é uma das técnicas analíticas mais utilizadas nos laboratórios de pesquisa para determinar a composição química de amostras. Os astrônomos, por exemplo, podem saber os materiais presentes no interior de estrelas distantes através das linhas de emissão espectral dos átomos presentes nelas.



Sódio ([Fonte](#), último acesso: 03/10/2019)

Nessa atividade você analisará o espectro de emissão de alguns gases com o objetivo de

determinar sua assinatura espectral.

Investigação C:

As folhas possuem uma série de pigmentos fotossintéticos, não apenas a clorofila. No processo de fotossíntese a energia do Sol é convertida em energia química, sendo armazenada em açúcares.



Folha ([Fonte](#), último acesso em 26/10/2020)

Quais são os comprimentos de onda utilizados pelos pigmentos para fazer a fotossíntese? Nessa investigação você medirá um espectro de absorção.

Nessa investigação, o software moodlight.org pode ser útil. Se for do seu interesse você pode propor outra linha de investigação para conduzir o seu experimento.

Lembre-se: as **Questões Norteadoras para o Desenvolvimento de Experimentos** guiarão seu trabalho nessa investigação!

LEIA MAIS!

- [Espectrofotometria](#)
- [Espectroscopia na Astronomia](#)
- [Sombras coloridas \(Prof. Lang\)](#)

Referências:

John E. Dowling, The Retina: an approachable part of the brain, The belknap press of Harvard University Press, 1987.

Apêndice L - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”

De acordo com os objetivos do Episódio de Modelagem “Atenuação da Luz”, estão explicitados abaixo as principais prováveis dificuldades relacionadas aos conceitos de referência que se pretende dar sentido com a atividade prática.

Dificuldade de Aprendizagem (O aluno)	Exemplo	Comentário
<p>...tem dificuldades para identificar as idealizações/simplificações do modelo teórico de referência e/ou de delinear procedimentos para controlar elementos desconsiderados nesse modelo.</p>	<p>o aluno esquece de considerar:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) as características da emissão de luz pontual, bem como desconsidera que um feixe de luz do laser não é 100% colimado. 2) se a radiação observada é monocromática ou não. 3) a radiação proveniente das lâmpadas da sala. 4) a precisão limitada do sensor, bem como sua orientação preferencial. 5) outros comprimentos de onda emitidos pelo laser e que contribuem para a energia do feixe. 6) que a fonte pode não emitir sempre a mesma potência luminosa. 	
<p>...tem dificuldades em identificar as aproximações envolvidas no modelo teórico de referência, bem como mobilizar o conceito de aproximação na condução de suas investigações.</p>	<p>o aluno...</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) utiliza valores da função visibilidade sem discriminar os casos fotópicos e escotópicos. 2) Não vê a necessidade de considerar os comprimentos de onda da luz envolvidos no caso do cálculo do Fluxo Luminoso (V) 	
<p>... tem dificuldade em explicitar os referentes (objetos ou eventos da realidade) que constituem o sistema em estudo ou a sua vizinhança abarcados pelo modelo.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) identificar os fatores que podem influenciar a atenuação da luz no meio, como a densidade, anisotropia do meio, reflexão da superfície, etc 2) definir o tipo de radiação usado no experimento - se é monocromático ou não, etc 3) identificar a radiação de fundo como uma constante do problema, etc. 	
<p>... tem dificuldade em incluir novos referentes (objetos ou eventos da realidade) nesse modelo a fim de melhorá-lo.</p>	<p>o aluno não percebe a influência da radiação de fundo, ou perda constante de energia por reflexão da luz em alguma superfície.</p>	

Dificuldade de Aprendizagem (O aluno)	Exemplo	Comentário
<p>... tem dificuldade de controlar variáveis e parâmetros ou os confunde.</p>	<p>1) ignora a dependência dos parâmetros de ajuste das curvas com outras variáveis não abarcadas no modelo (Temperatura, Densidade, etc). 2) Esquece de que a área do sensor é um parâmetro do sistema. 3) não vê a atenuação da luz pelo vidro no experimento do cano como apenas um parâmetro de atenuação constante nas medidas.</p>	
<p>... tem dificuldade em decidir que tipo de representação deve ser utilizada para responder à questão formulada.</p>	<p>1) o aluno não diferencia fonte colimada (laser) com fonte pontual. 2) confunde Iluminância ($E_V - \text{lm/m}^2$) com Fluxo Luminoso ($\Phi_V - \text{lm}$). 3) confunde Iluminância ($E_V - \text{lm/m}^2$) com Intensidade Luminosa ($I_V - \text{lm/Sr}$). 4) confunde a energia total emitida por uma fonte com a energia que atravessa uma seção de área, apenas.</p>	
<p>... tem dificuldade em representar a atenuação luminosa da luz usando seus conhecimentos já consolidados sobre energia e sua conservação.</p>	<p>o aluno... 1) considera que a energia luminosa medida pelo instrumento é toda a energia emitida pela fonte, esquecendo das componentes não mensuráveis 2) não consegue explicar a perda de energia luminosa como uma consequência da absorção pelo meio e não simplesmente pela distância da fonte de luz.</p>	

Apêndice M - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”

De acordo com os objetivos do Episódio de Modelagem “Reflexão Total da Luz”, estão explicitados abaixo as principais prováveis dificuldades relacionadas aos conceitos de referência que se pretende dar sentido com a atividade prática.

Dificuldade de Aprendizagem (O aluno)	Exemplo	Comentário
...tem dificuldades em realizar a contrastação empírica entre evidências e previsões teóricas.	o aluno tem dificuldade em apreender as evidências geradas por sua investigação, confundindo parâmetros do sistema com variáveis do modelo, tendo assim dificuldade em realizar os procedimentos empíricos necessários para fazer a contrastação empírica.	
... apresenta dificuldade em estabelecer ou explicitar o domínio de validade do modelo teórico utilizado.	O aluno não vê a necessidade de usar fontes monocromáticas, ter meios isotrópicos & dielétricos para realizar o experimento, fazer medidas com temperatura constante, etc.	
... tem dificuldade em estimar o grau de precisão do modelo.	O aluno não compreende os efeitos de alguns fatores físicos não considerados originalmente no modelo na hora de estabelecer o grau de precisão de seu modelo.	
... confunde o conceito de previsão com o de evidência.	para o aluno os resultados do experimento deveriam refletir a previsão do modelo de forma especular.	

Apêndice N - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”

De acordo com os objetivos do Episódio de Modelagem “Polarização da Luz”, estão explicitados abaixo as principais prováveis dificuldades relacionadas aos conceitos de referência que se pretende dar sentido com a atividade prática.

Dificuldade de Aprendizagem (O aluno)	Exemplo	Comentário
...tem dificuldade em controlar a direção de polarização ou ângulo de incidência.	O aluno não entende como identificar a direção de polarização paralela com o auxílio do ângulo de Brewster. A partir da polarização paralela, obter a polarização perpendicular.	
...tem dificuldades em delinear um experimento seguindo os pressupostos teóricos assumidos na construção do modelo teórico de referência.	O estudante não se dá conta que a superfície precisa ser dielétrica, ou a luz incidente tem que ser monocromática.	
...tem dificuldade em relacionar o modelo teórico de referência da investigação com as evidências coletadas	O aluno tenta fazer ajustes de melhor curva, ou acrescentar constantes sem significado físico para ajustar os dados.	

Apêndice O - Protocolo de observação do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”

De acordo com os objetivos do Episódio de Modelagem “Espectroscopia”, estão explicitados abaixo as principais prováveis dificuldades relacionadas aos conceitos de referência que se pretende dar sentido com a atividade prática.

Dificuldade de Aprendizagem (O aluno)	Exemplo	Comentário
...tem dificuldades em realizar a operação empírica “ observação ”.	O aluno tem dificuldades em realizar percepções intencionais/deliberadas (com um objetivo prévio) e ilustradas (guiadas por um conhecimento prévio). Por exemplo, o aluno não se dá conta de que precisa de uma luz branca de fundo para medir o espectro de absorção.	
...tem dificuldades em realizar a operação empírica “ Medição ”.	O aluno não se familiariza com o software nem com o espectrômetro. Têm dificuldade em interpretar as medições porque não compreende os mecanismos internos de conversão de fatos reais para medidas.	
...tem dificuldades em realizar a operação empírica “ Experimentos ”.	Tem dificuldade em provocar mudanças deliberadas para obter medições com o espectrômetro. Por exemplo, ao construir o espectrômetro bem vedado para evitar luz externa, alinhar a câmera com a fenda, regular a intensidade da luz de entrada com o uso de polarizadores, etc.	

Apêndice P - Guia das entrevistas semiestruturadas

Guia das entrevistas semiestruturadas nos grupos

1. Fale sobre suas aulas de laboratório de Física. Fique à vontade para falar de todas as aulas de laboratório que você já participou.
2. Fale sobre a liberdade que foi dada aos alunos durante as atividades experimentais.
3. Fale sobre os Episódios de Modelagem que foram realizadas na disciplina.
4. Fale sobre o que você aprendeu com os Episódios de Modelagem. Fale sobre os guias de atividades. Fale sobre as tarefas de leitura. Fale sobre as rubricas.
5. Qual atividade experimental você considera que foi a mais proveitosa na disciplina? Por quê?
6. Fale sobre o sistema de avaliação das disciplinas de laboratório de Física.
7. Fale sobre o que você entende por teoria e por modelo.
8. Fale sobre o que você entende por modelagem.
9. Fale sobre os experimentos científicos.
10. Quais medidas devem ser tomadas quando ocorrem discrepâncias entre resultados experimentais e teóricos em uma investigação? Como elas devem ser avaliadas?

Problemas para serem resolvidos

Problema 1: devido a um acidente com navio petroleiro, um grande vazamento de óleo assola o litoral do Estado. Ambientalistas alertam as autoridades para o risco de extinção em massa de espécies marinhas típicas da região devido à drástica redução da entrada de luz nas camadas mais profundas de água. Você é contratado por uma agência reguladora internacional para avaliar o risco ambiental associado com a catástrofe, de forma que as devidas providências possam ser tomadas. Como você procederia? que modelo poderia ser utilizado para descrever a perda da intensidade luminosa? quais as principais características desse modelo? Como você conduziria algum experimento para testar suas hipóteses?

Problema 2: empresas de telecomunicações utilizam tecnologia de ponta para garantir que o sinal transmitido por meio de cabos de fibra ótica possa chegar ao seu destino evitando o máximo possível as perdas. No contexto dos testes de um novo material com aplicações em fibra ótica para ser empregado em escala mundial, uma empresa decide investigar se esse material é adequado ou não para transmitir as informações por longas distâncias, implicando que o cabo irá operar em condições extremas. Você é contratado por essa empresa para investigar a viabilidade da utilização de um determinado tipo de radiação eletromagnética na transmissão do sinal. Como você procederia? Que modelo poderia ser utilizado para avaliar se a radiação eletromagnética permanece ou não dentro do cabo? Quais os fatores físicos têm que ser levados em consideração na construção do modelo para ele ter validade? Como você delinearía algum experimento para testar suas hipóteses?

Apêndice Q - Termo de consentimento livre e esclarecido

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa intitulada *Episódios de Modelagem: integração das atividades experimentais no processo de Modelagem Didático Científica no contexto dos conteúdos relacionados à Ondas Eletromagnéticas, Ótica Física e Geométrica*, que tem como pesquisadora responsável a Dra. Eliane Angela Veit (eav@if.ufrgs.br), docente do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A pesquisa será realizada por Rodrigo Weber Pereira (rodrigo.weber@ufrgs.br), estudante de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEnFís/UFRGS). O motivo que nos leva a estudar esse assunto é identificar as principais dificuldades conceituais do campo conceitual da Modelagem Didático-Científica na disciplina de Física IV, assim como identificar as potencialidades dos Episódios de Modelagem na assimilação de conteúdos de ondas eletromagnéticas, Ótica Geométrica e Ótica Física. A pesquisa envolverá a realização de entrevistas semiestruturadas com os(as) alunos(as), fazendo uso de escritos, imagens e vídeos das aulas ministradas ao longo do semestre.

Nesse contexto, informamos que:

- sua participação é inteiramente voluntária;
- não haverá despesas para sua participação nesta pesquisa, assim como você não será remunerado(a) para tal;
- as informações coletadas serão utilizadas apenas para a pesquisa e poderão ser divulgadas em eventos e publicações científicas, porém sem trazer sua identificação explícita;
- a pesquisa não oferece riscos aos participantes, a não ser algum constrangimento pelas respostas fornecidas ou o comportamento frente a certas situações propostas. Para evitar este risco, buscaremos sempre manter seu anonimato;
- você poderá se recusar a responder qualquer pergunta da entrevista, ou qualquer outra solicitação que lhe seja feita;
- você poderá retirar seu consentimento ou interromper sua participação na pesquisa a qualquer momento antes da divulgação dos resultados, bastando para isso comunicar a algum dos pesquisadores;
- esse termo de consentimento foi elaborado em duas vias, sendo uma via para você, participante da pesquisa, e outra para o pesquisador responsável;

Desta forma, uma vez tendo lido e entendido tais esclarecimentos e, por estar de pleno acordo com o teor do mesmo, eu _____, CPF _____, dato e assino este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Porto Alegre, ____ de _____ de 20 ____.

Assinatura do Participante

Assinatura do mestrando, Rodrigo Weber Pereira

Assinatura da orientadora, Eliane Angela Veit.