



Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências
ISSN: 1806-5104
ISSN: 1984-2686
silnascimento@ufmg.br
Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências
Brasil

Um Estudo sobre as Contribuições de Atividades de Laboratório com Enfoque no Processo de Modelagem Científica no Domínio de Universitários sobre Conceitos de Ótica e sobre o Trabalho Experimental

Weber Pereira, Rodrigo
Albuquerque Heidemann, Leonardo
Angela Veit, Eliane

Um Estudo sobre as Contribuições de Atividades de Laboratório com Enfoque no Processo de Modelagem Científica no Domínio de Universitários sobre Conceitos de Ótica e sobre o Trabalho Experimental

Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, vol. 22, pp. 1-32, 2022

Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=571674320029>

DOI: <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2022u661692>

Um Estudo sobre as Contribuições de Atividades de Laboratório com Enfoque no Processo de Modelagem Científica no Domínio de Universitários sobre Conceitos de Ótica e sobre o Trabalho Experimental

A Study on the Contributions of Laboratory Activities Focused on the Scientific Modeling Process to Undergraduates' Understanding of Optics Concepts and Experimental Work

Rodrigo Weber Pereira
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
rodrigo.weber@ufrgs.br
Leonardo Albuquerque Heidemann
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
leonardo.h@ufrgs.br
Eliane Angela Veit
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
eav@if.ufrgs.br

DOI: <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2022u661692>

Recepción: 07 Octubre 2021
Aprobación: 11 Marzo 2022



Acceso abierto diamante

Resumo

Avaliamos as contribuições do uso da metodologia de ensino “Episódios de Modelagem” (EM) para que estudantes de graduação em Física ampliem seus domínios sobre o campo conceitual da Modelagem Didático-Científica (MDC+), em particular sobre o trabalho experimental e sobre os conceitos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental. Explorando essa metodologia em aulas de laboratório sobre, por exemplo, atenuação da luz e polarização, avaliamos também a sua contribuição para que os participantes ampliem seus domínios do campo conceitual da ótica. Adotando a perspectiva da MDC+, desenvolvemos quatro EM, cada um com enfoque em um conceito específico da MDC+. Por meio de um estudo de caso explanatório, tendo uma turma de uma disciplina de física experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como caso, respondemos às seguintes questões: (i) *Como os EM contribuem 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 contribuem para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da MDC+, favorecendo particularmente a atribuição de sentido e significado aos conceitos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental?* Como resultado, concluímos que os EM auxiliaram os estudantes a expandirem seus domínios do campo conceitual da modelagem científica e a mitigarem, ainda que parcialmente, dificuldades comuns da Ótica.

Palavras-chave: ÓTICA, MODELAGEM CIENTÍFICA, ATIVIDADES EXPERIMENTAIS, LABORATÓRIO DIDÁTICO.

Abstract

We evaluated the contributions of the teaching methodology named "Modelling Episodes" (EM), so that undergraduate physics students can enhance their understanding of the conceptual field of Didactic- Scientific Modeling (MDC +), in particular when it comes to experimental work and concepts of scientific model, variable control and experimental evidence. By exploring this methodology in laboratory classes e.g., on attenuation of light and polarization, we also assess its contribution for participants to broaden their conceptual understanding of optics. Adopting the perspective of MDC+, we developed four EM, each one focusing on a specific concept of the MDC+. Through an explanatory case study of an experimental physics class at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), we answered the following questions: (i) *how does the EM contribute to students' better conceptual understanding of optics, favoring the easing of student's typical difficulties in learning physical concepts of optics?* (ii) *how does it contribute to students' better conceptual understanding of MDC+, in particular as an enhancing*

method for attribution of sense and meaning to the concepts of scientific model, control of variables and experimental evidence? As a result of this study, we conclude that EM helped students develop a better understanding of scientific modeling and mitigate, although partially, common difficulties in the learning of optics.

Keywords: OPTICS, SCIENTIFIC MODELING, EXPERIMENTAL ACTIVITIES, LABORATORY LEARNING.

Introdução

Ler o roteiro; executar rigidamente os procedimentos estabelecidos no roteiro; provar, refutar ou “descobrir” uma lei científica; e escrever um relatório. Esses passos apresentam uma boa síntese do que ainda é realizado em diversos laboratórios de ensino no Brasil, a despeito da extensa literatura da área de ensino de Ciências que denuncia as deficiências teóricas e epistemológicas desse tipo de atividade (p. ex., Hodson, 1992; Borges, 2002; Trumper, 2003; Andrés et al., 2006; Buffer et al., 2009). Esse cenário evidencia que alternativas para fomentar experiências significativas aos estudantes, que promovam investigações em que teoria e prática caminhem lado a lado no processo de aprendizagem de Ciências, ainda estão distantes da realidade dos laboratórios de ensino. A questão da dissociação entre teoria e prática em aulas de laboratório nos cursos de Física motivou estudos empíricos que buscavam explorar as contribuições de atividades pautadas em modelagem nesses contextos (Heidemann, 2015) e levaram à proposição da metodologia “Episódios de Modelagem” (EM) (Heidemann et al., 2016). Um aspecto central dessa metodologia é propor atividades de caráter aberto, motivadas por situações-problema autênticas, com significado além do contexto acadêmico. Considera-se, nessa metodologia, o laboratório didático um ambiente propício para promover discussões epistemológicas sobre a natureza da Ciência e o processo de construção do conhecimento científico. Os estudos iniciais com os EM se concentraram nos campos conceituais da Mecânica, Fluidos e Termodinâmica. Os resultados dessas investigações mostraram que os EM se constituem em uma metodologia promissora, que precisa ser avaliada em outros campos da Física. Neste estudo, fazemos isso no campo da ótica.

Os EM se constituem em uma proposta metodológica fundamentada na Modelagem Didático-Científica (MDC+), um referencial teórico construído a partir de uma costura entre a Teoria dos Campos Conceituais (TCC) de Vergnaud (1998; 2012) e as concepções de modelagem científica de Bunge (1974; 2010) proposta por Brandão et al. (2011; 2012). Os autores demonstraram que o processo de modelagem científica pode ser entendido como um campo conceitual subjacente aos outros campos conceituais da Física. Heidemann (2015) e Heidemann et al. (2018) expandiram esse referencial agregando aspectos relacionados ao trabalho experimental. Na produção dessa expansão, denominada MDC+, foram inseridas as ideias de Bunge (1974) sobre o processo de contrastação empírica das ideias científicas, que traz elementos essenciais para as aulas de laboratório em contextos de ensino de Ciências. Por exemplo, dois conceitos importantes vinculados à MDC+ são os de “controle de variáveis” e “modelo teórico de referência”. De acordo com a MDC+, investigações empíricas não são conduzidas de forma atórica: ao realizar um experimento com o objetivo de estudar um evento/objeto, deve-se, antes disso, adotar um modelo teórico de referência, ou seja, uma representação repleta de idealizações e aproximações do objeto/evento investigado (um modelo teórico) que guiará as ações experimentais (por isso, tomado como referência); a montagem e coleta de dados é então conduzida tendo em vista procedimentos de controle de variáveis, isto é, procedimentos nos quais se controlam os parâmetros relevantes para o experimento, ao mesmo tempo em que se busca minimizar o efeito de fatores que não foram considerados no modelo teórico de referência, ou seja, em que se busca construir um objeto/evento compatível com as idealizações e aproximações assumidas no modelo teórico de referência. Esses procedimentos, que não costumam ser suficientemente explorados em atividades experimentais tradicionais, demandam, a partir de uma postura ativa dos estudantes, análises dos conhecimentos previamente construídos (especialmente das idealizações e aproximações do modelo teórico de referência), evidenciando que a experimentação científica é impregnada de teorização desde o seu delineamento até as suas conclusões.

Na MDC, entende-se que os estudantes ampliam seus domínios sobre os campos conceituais da modelagem científica e da Física por meio do enfrentamento de situações que estimulam a conceitualização do real. Em contextos de ensino, isso ocorre quando os estudantes são defrontados com problemas pouco idealizados, que estimulam a reflexão sobre os aspectos que fundamentam a construção dos modelos científicos usados para representar eventos/objetos reais. Metodologias de ensino focadas na modelagem científica são adequadas para esse fim porque favorecem que o estudante evoque, simultaneamente,

conhecimentos de natureza teórica e prática — ferramentas necessárias no processo de conceitualização do real. De fato, mobilizar as formas predicativas (saber explicitar) e operatória (saber fazer) do conhecimento para resolver problemas autênticos não é tarefa fácil, e muitos estudantes têm dificuldades nesse aspecto, como apontado por Hodson (1992) há décadas.

Neste artigo, apresentamos os resultados de uma pesquisa em que investigamos as contribuições da aplicação dos EM para que estudantes ampliem seus domínios sobre o trabalho experimental em aulas de cursos de graduação de Física envolvendo o campo conceitual da Ótica. Para esse fim, criamos quatro EM, cada um dando enfoque a um conceito da MDC+. Por exemplo, o primeiro EM (Weber et al., 2020), denominado “Atenuação da luz”, partia da seguinte questão: Como a poluição dos oceanos pode influenciar a fotossíntese das algas por meio de alterações na atenuação da luz solar? Até o momento da atividade, os estudantes só estavam familiarizados com o modelo de atenuação da luz decorrente da sua propagação no vácuo. Para responder à questão proposta, no entanto, precisavam explicar a atenuação da luz no oceano, ou seja, em um meio material. Por isso, os estudantes precisaram expandir o modelo que já conheciam, de propagação da luz no vácuo, incorporando aspectos relacionados à absorção e espalhamento da luz pela matéria. Assim, esse EM foi concebido para dar sentido e significado ao conceito de “expansão de um modelo”; já os conhecimentos da Ótica privilegiados foram o de propagação de energia luminosa e o modelo de Beer-Lambert (Kostinski, 2001), que descreve a atenuação da luz pela matéria.

Por meio da investigação, respondemos às seguintes questões:

Questão de pesquisa 1: Como os EM contribuem 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 contribuem para que os estudantes ampliem seus domínios do campo conceitual da MDC+, favorecendo particularmente a atribuição de sentido e significado aos conceitos de modelo científico, controle de variáveis e evidência experimental?

A coleta de dados ocorreu ao longo de um semestre, o segundo do ano de 2019, quando introduzimos os quatro EM em uma turma de Física Experimental do quarto semestre dos currículos dos cursos de Física (licenciatura e bacharelado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A metodologia de pesquisa empregada foi a de estudo de caso explanatório, na acepção de Yin (2005; 2011), em que o caso escolhido foi a turma, tendo contado com sete unidades de análise — estudantes selecionados dessa turma.

Na próxima seção, apresentamos fatores que potencializam o aprendizado de Física no contexto das aulas de laboratório e as principais dificuldades de aprendizagem dos estudantes no campo conceitual da Ótica e a seção seguinte, os fundamentos do referencial teórico usado nessa pesquisa. Na Seção 4, elucidamos a metodologia de ensino dos EM, bem como a metodologia de pesquisa adotada e os procedimentos de coleta de dados. Na seção 5, apresentamos os resultados. Por fim, tecemos as considerações finais.

Estudos anteriores: atividades de laboratório e dificuldades no campo da Ótica

A metodologia de EM foi desenvolvida a partir de resultados da literatura que evidenciam as potencialidades e limitações de atividades experimentais no ensino de Ciências. Por exemplo, procurando fomentar o engajamento dos estudantes, busca-se problematizar e contextualizar as atividades a partir de eventos reais, que despertem o interesse dos estudantes, como é sugerido por Hodson (1992) e Maltese (2010). Além disso, pautando-se pelas ideias de Montinho et al. (2011) e Borges (2002), os problemas propostos são vinculados com os conhecimentos prévios dos estudantes, o que é proporcionado pelo uso de Tarefas Prévias, como será detalhado na seção 4.1. Outro fator que caracteriza os EM é o seu moderado grau de abertura, que confere liberdade investigativa aos estudantes, sem que os mesmos incorram em dificuldades excessivas. Isso está em acordo com as ideias de Andrés et al. (2006) e Deacon et al. (2011), que defendem que os estudantes devem estar em posição de tomar decisões na realização de experimentos. As investigações realizadas pelos estudantes são sugeridas pelo(a) professor(a), que distribui um Guia de Atividade que contém elementos essenciais para que os estudantes possam delinear os próprios

experimentos. O objetivo dos EM é a busca por respostas a questões formuladas por meio do emprego de conhecimentos científicos específicos. Portanto, apesar do caráter aberto dos EM, seus objetivos de aprendizagem são bem definidos, o que é essencial em aulas práticas, segundo Holmes e Wiemann (2018) e Parreira e Dickmann (2020). Por fim, os EM facilitam a apreensão de conceitos de Física pelos estudantes porque fomentam a discussão de aspectos epistemológicos relacionados à natureza da Ciência e à construção do conhecimento científico, em acordo com as ideias de Koponen (2007) e Heidemann (2011).

Uma vez que os EM desta investigação tratam de tópicos de Ótica, consultamos na literatura as principais dificuldades de estudantes sobre esse campo conceitual. As concepções sobre luz e as dificuldades em aprender conteúdos específicos relacionados a ela foram investigadas em vários países e os resultados são vastos (Djanette & Fouad, 2014). A seguir, nos limitamos a apresentar uma compilação contendo algumas das dificuldades e concepções equivocadas típicas dos estudantes na aprendizagem de Ótica.

Segundo Colin e Viennot (2000), muitos estudantes: têm dificuldade em conectar os modelos de Ótica Física e Geométrica; não sabem explicitar nem operacionalizar o domínio de validade das representações geométricas e físicas da Ótica; preferem representar fenômenos físicos pela Ótica Geométrica, ainda que a Ótica Física fosse mais adequada. Já Ambrose et al. (1999) afirmam que diversos estudantes: têm dificuldades em lidar com o modelo ondulatório da luz, e, portanto com Ótica Física; têm dificuldades em entender as representações didáticas das ondas eletromagnéticas nos livros didáticos; não se dão conta de que os campos elétrico e magnético em uma onda eletromagnética são interdependentes; entendem uma onda plana como tendo uma extensão espacial finita. Qing et al. (2018) e Palacios et al. (1989) relatam, respectivamente, que, muitos estudantes têm dificuldades em utilizar condições de contorno da teoria eletromagnética nos contextos em que ela se aplica e em compreender o conceito de dispersão da luz.

Outros autores relatam, ainda, algumas crenças e concepções equivocadas comuns entre estudantes. Kaltakci et al. (2016) concluem que os estudantes entendem que: imagens virtuais existem independentemente da presença do observador; o tamanho da imagem no espelho plano depende do tamanho do espelho ou da distância entre o objeto e o espelho; imagens reais só podem ser vistas em um anteparo; não se vê qualquer imagem de um objeto colocado no ponto focal de um espelho convexo/ lente divergente. Pompeia et al. (2007) destacam que estudantes entendem que a luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas; objetos escuros não refletem luz; um objeto é visível porque luz o ilumina; espelhos refletem 100% da luz incidente em sua superfície; lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos. Já Djanette e Fouad (2014) identificam crenças de que a velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio; cor é uma propriedade dos objetos; a velocidade de propagação da luz depende da velocidade da fonte emissora. Yalcin et al. (2009), por sua vez, reportam que os estudantes entendem que tudo que se vê é uma fonte de luz; 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. Por fim, Blizak et al. (2009) destacam crenças de que 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.

Uma vez conhecidas as dificuldades mais comuns na Ótica, temos condições de avaliar o papel dos EM no avanço dos estudantes nesse campo conceitual. Na seção seguinte, explicamos o referencial teórico adotado na pesquisa.

A Teoria dos Campos Conceituais (TCC) e a Modelagem Didático- Científica (MDC+)

Segundo Vergnaud, quando o estudante é defrontado com tarefas, desencadeiam-se processos cognitivos nos seus esquemas de pensamento (Vergnaud, 1998). O processo de formação de novos esquemas, que permitem que o sujeito lide com tarefas novas e/ ou mais complexas, se dá por meio do enfrentamento de situações que têm potencial de dar sentido a (novos) conceitos que podem ser úteis para resolver a tarefa. Uma única situação não dá sentido a um conceito, mas à medida que o sujeito atribui sentido a um

conceito em uma ampla gama de situações, esse conceito é consolidado em sua estrutura cognitiva. De forma simplificada, o conjunto de conceitos, situações, teoremas², relações e esquemas de pensamento relacionado a uma determinada área do conhecimento pode ser entendido como um campo conceitual (Vergnaud, 1993). Vergnaud destaca que o domínio de um campo conceitual é um processo lento e progressivo, marcado por avanços e retrocessos. Assim, não se espera que um estudante possa dominar um conjunto de conhecimentos após poucas intervenções didáticas (por melhor que sejam), já que o domínio de um campo conceitual se consolida quando o estudante consegue não apenas explicitar conhecimentos teóricos, mas também operacionalizá-los em um amplo conjunto de situações.

Por exemplo, com base na MDC, atividades didáticas de modelagem científica em Ótica devem estimular a reflexão sobre o(s) modelo(s) teórico(s) de referência a ser(em) usado(s) para descrever o fenômeno físico em questão; tal situação demanda mobilização de conhecimentos predicativos e operatórios específicos do campo conceitual da Ótica e da modelagem; o estudante precisa ter consciência sobre os aspectos da realidade que foram considerados na construção do(s) modelo(s), bem como, sobre os aspectos que foram desprezados nesse processo; precisa ter clareza sobre as situações em que o(s) modelo(s) se aplicam, bem como seu(s) domínio(s) de validade; segundo a MDC, tais considerações favorecem a atribuição de sentido aos conceitos do campo conceitual da modelagem (para mais detalhes sobre a MDC, consultar Brandão et al. (2011; 2012).

Tendo em vista a importância das situações na teoria de Vergnaud, nesta pesquisa, ainda que tenhamos consciência de que outros elementos são importantes para se ampliar o domínio de um campo conceitual, buscamos entender como os estudantes atribuem sentido e significado a conceitos da Ótica e da modelagem em atividades experimentais analisando suas ações durante o enfrentamento das situações fomentadas por meio dos EM. Para entender as particularidades do processo de modelagem científica no contexto de aulas experimentais, passamos a explicar o referencial teórico desta pesquisa: a MDC+.

A partir da MDC+, entende-se que o processo de modelagem científica vinculado às situações experimentais faz parte de um campo conceitual (próprio) subjacente aos campos conceituais específicos da Física (p. ex., o da Ótica). Para esclarecer os conceitos específicos associados ao trabalho experimental, Heidemann (2015) e Heidemann et al. (2016) recorreram às ideias de Bunge (1974; 2010) sobre modelos e o processo de contrastação empírica das ideias científicas. Para Bunge, as atividades empíricas (experimentos de laboratório) são sempre precedidas por um trabalho teórico, que parte de uma questão de pesquisa. Nesse trabalho, por meio de uma série de simplificações da realidade, constroem-se relações hipotético-dedutivas³ (modelos científicos), a partir das quais se busca fazer previsões sobre o comportamento do sistema físico em questão. O modelo que descreve o sistema a ser estudado no experimento é chamado de modelo teórico de referência e tal modelo deve ser validado por meio de operações empíricas, ou seja, de observações, medições e experimentos. Por inverter a ordem, colocando o trabalho teórico como um primeiro passo da experimentação, a perspectiva da MDC+ se afasta da concepção empirista-indutivista — muito presente nas aulas de laboratório atuais — segundo a qual se pode obter a lei a partir dos dados (Silveira & Ostermann, 2002).

A MDC+ incorpora aspectos vinculados ao trabalho experimental nos processos envolvidos na modelagem científica. Por exemplo, os autores desse referencial argumentam que a validação do modelo, como proposta por Bunge, deve ser feita através de um delineamento investigativo que mantém um rigoroso controle de variáveis visando garantir que as simplificações assumidas no processo de construção do modelo sejam respeitadas tanto quanto possível no experimento. O processo de contrastação empírica envolve a comparação entre previsões geradas a partir do modelo científico e evidências experimentais. Caso o resultado da contrastação seja insatisfatório, o modelo pode sofrer expansão — aumentando assim seu grau de precisão ou domínio de validade —, seja pela inclusão de novos referentes, seja pela modificação nas idealizações assumidas no seu processo de construção. Ainda, o modelo pode ser substituído por outro mais adequado de acordo com os fins que se deseja. É importante destacar que o enfoque das atividades práticas apoiadas na MDC+ não está na “prova” ou “refutação” dos modelos. De fato, a avaliação de um modelo em uma situação específica não garante que ele seja válido em qualquer situação. A noção de “prova” tem relação com a concepção equivocada de que modelos são capazes de descrever a realidade em

sua completude. Na verdade, tanto o trabalho teórico quanto empírico pressupõem idealizações, implicando que modelos oferecem apenas uma aproximação entre a teoria e realidade. Nesse sentido, na MDC+ o processo de validação de modelos é entendido como uma avaliação do grau de precisão e domínio de validade de suas predições para a situação em questão.

Aulas práticas calcadas na MDC+ suscitam a reflexão, por parte dos estudantes, sobre os elementos do trabalho experimental anteriormente mencionados (Heidemann et al., 2016; 2018). Defende-se, ainda, que as situações enfrentadas no contexto de laboratório devem partir de problemas autênticos, pouco idealizados, que estimulam a conceitualização do real por meio do processo de modelagem científica. O enfoque nas situações autênticas não é um enfoque apenas naquilo que é concreto/sensível, mas sim na problematização em si. Ao ser defrontado com problemas reais ou pouco idealizados, o processo de abstração (conceitualização do real) passa a ter sentido para o estudante, facilitando a integração de novos esquemas de pensamento à sua estrutura cognitiva. Dessa forma, de acordo com a TCC de Vergnaud, espera-se que as situações enfrentadas pelos estudantes no laboratório tenham potencial para agregar sentido aos conceitos do trabalho experimental, contribuindo para que os estudantes avancem no domínio do campo conceitual da MDC+. Conforme mencionado na introdução, uma das questões de pesquisa deste estudo busca elucidar como os EM podem contribuir para que estudantes deem sentido e significado à três conceitos da MDC+: modelo teórico de referência ou, por simplicidade, modelo científico (MC), controle de variáveis (CV) e evidência experimental (EE). Ao se envolver em atividades experimentais, no entanto, os estudantes mobilizam conhecimentos relacionados a diversos conceitos da MDC+, como o conceito de idealização, contrastação empírica e domínio de validade. Na próxima seção explicamos o que são os EM e qual a metodologia de pesquisa empregada.

Metodologias de ensino e pesquisa

Este estudo foi conduzido com estudantes de graduação no contexto de aulas de laboratório de Física. Primeiramente explicamos essa metodologia, depois explicamos o contexto do estudo e da coleta de dados.

Metodologia de Ensino

Os EM (Heidemann et al., 2016) são uma metodologia de ensino voltada para a experimentação, cujo principal objetivo é defrontar os estudantes com problemas que demandam reflexão e tomada de decisões na modelagem científica de eventos físicos. As quatro etapas da metodologia, descritas em detalhes em Weber (2021), envolvem uma etapa de preparação (primeira etapa), em horário extraclasse, e ações no laboratório didático (demais etapas). Para explicar essas etapas, vamos utilizar o segundo EM deste estudo, que é dirigido pela seguinte situação-problema:

A maior parte da comunicação global se dá por satélites ou por cabeamento de fibra ótica. Para garantir a comunicação entre países separados por mares, uma extensa rede de cabos marítimos está em operação. Um cabo de fibra ótica dirige a propagação da luz por possuir no seu interior 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?

Podemos observar que o enunciado desse EM contém uma problemática potencialmente instigante, sem proposições explícitas sobre as idealizações e/ou aproximações que podem ser assumidas para resolvê-lo. A reflexão total da luz, fenômeno determinante da transmissão de informação pelo cabo, depende essencialmente do índice de refração dos materiais que compõem o cabo. Usualmente, os estudantes costumam considerar o índice de refração dos materiais como uma grandeza constante. Entretanto, a temperatura do material e o comprimento de onda da luz são fatores que influenciam esse parâmetro. Um questionamento que pode surgir da explicitação desses fatores é: como os cabos de fibra ótica funcionam mesmo quando submetidos a grandes variações de temperatura, que influenciam no índice de refração do seu núcleo e, portanto, influenciam no ângulo de reflexão interna total do material? Ao refletir sobre esses

aspectos criticamente, os estudantes tornam explícitas as simplificações da realidade imbricadas nos modelos que descrevem a propagação da luz no cabo, que, muitas vezes, ficam implícitas.

Para quantificar o índice de refração de materiais no laboratório didático com razoável precisão, prismas podem ser utilizados. Nesse EM, esperávamos dar enfoque ao papel dos modelos no delineamento experimental, em particular, ao modelo de deflexão da luz em prismas (daqui em diante chamado de modelo do prisma). Admitindo a validade da Lei de Snell e que o meio é homogêneo, derivamos esse modelo a partir de considerações puramente geométricas. Para obter o índice de refração por meio de experimentos, é preciso conhecer aspectos importantes do modelo, como a existência de um ângulo de desvio mínimo e a necessidade de incidir luz em um ângulo de incidência específico, de acordo com a geometria do prisma, para produzir a deflexão máxima frente a pequenas variações no índice de refração do material. Portanto, o “modelo científico” adotado para o planejamento do experimento e análise dos dados, um dos conceitos centrais da MDC+, é privilegiado porque fica evidente que o delineamento desse experimento não pode ser feito sem conhecimentos teóricos prévios, assim como a própria justificativa da realização do experimento depende do entendimento das simplificações consideradas no modelo teórico que dirige a investigação empírica. Nesta pesquisa, cada EM privilegia discussões em torno de um conceito específico da MDC+. Entretanto, conforme mencionado na Seção 3, ao realizarem atividades experimentais, os estudantes mobilizam conhecimentos relacionados a mais de um conceito da MDC+, simultaneamente⁴. Assim, apesar desse EM dar enfoque ao conceito de “modelo científico” (MC), podemos avaliar, por exemplo, como os estudantes atribuíram sentido e significado aos conceitos de evidência experimental (EE) e controle de variáveis (CV), conforme os objetivos da segunda questão de pesquisa.

Para que os estudantes entendam a situação-problema do EM e consigam mobilizar conceitos primordiais para dar início às investigações, obtendo respostas para as questões formuladas, solicitamos que realizassem uma Tarefa Prévia à aula presencial, que constitui a primeira etapa do EM. No caso exemplificado, a Tarefa Prévia consistiu na leitura de textos sobre a lei de Snell e sobre o modelo do prisma do livro didático da disciplina (Halliday & Resnick, 2009), além de um manuscrito de quatro páginas, elaborado especialmente para a disciplina, em que o modelo do prisma é introduzido chamando atenção para os aspectos da modelagem subjacente a sua construção; também solicitamos aos estudantes que respondessem a um questionário contendo três perguntas, que serviu, simultaneamente, para que a professora da turma avaliasse os conhecimentos prévios dos estudantes e seu grau de apropriação sobre o assunto. Por exemplo, uma das perguntas nesse questionário foi “Qual condição tem que ser satisfeita para haver reflexão interna total da luz?”.

Na segunda etapa, presencial, denominada Discussão Inicial, a professora buscou sanar as dificuldades que emergiram do questionário sobre a tarefa prévia e apresentou a situação-problema sobre os cabos de fibras óticas aos estudantes. Exposto o problema, a professora entregou um Guia de Atividade que tem como objetivo resumir aspectos essenciais sobre o modelo do prisma, bem como sugerir linhas de investigação para os estudantes adotarem. No Guia de Atividade não estão contidas instruções sobre como montar experimentos ou coletar os dados: sua função é orientar o estudante, evitando que o mesmo se sinta perdido durante a execução da atividade. No EM exemplificado, as sugestões envolviam investigar a dependência do índice de refração com a temperatura do material e com o comprimento de onda da luz. No Guia da Atividade, uma das sugestões foi: “Investigue qual a relação entre o ângulo de reflexão total da luz 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”. Como se nota, não há uma forma preconcebida de resolver o problema proposto (apesar de a professora ter uma solução prévia a ser apresentada ao final do EM). Além das sugestões, constam no guia a situação-problema (como apresentada nesta subseção) e um resumo sobre o modelo que descreve o desvio da luz em prismas, sem quaisquer instruções de aplicação desses modelos ou ilustrações de esquemas de montagem. Além do Guia de Atividade, os estudantes receberam, já no primeiro EM, uma folha contendo questões norteadoras para o

desenvolvimento de experimentos, que tinha como objetivo auxiliá-los no delineamento experimental de todas as atividades da disciplina.

A terceira etapa, denominada Investigação, começou logo que os Guias de Atividade foram entregues. Os estudantes, organizados em grupos, poderiam optar por uma das linhas investigativas, usando os materiais disponibilizados. Eles também poderiam propor outras investigações desde que envolvendo conhecimentos relacionados aos conteúdos abordados no EM — que foram construídos levando em conta a súmula da disciplina — ou propor outras investigações, contanto que passíveis de serem feitos com os materiais disponibilizados ou que eles trouxessem os materiais necessários. Em qualquer dos casos, deveriam planejar o experimento a ser realizado. Por exemplo, um grupo usou a liberdade que lhes foi concedida e decidiu investigar a variação do índice de refração da água em função da concentração de sal, uma investigação não sugerida no guia da atividade. Destacamos que os estudantes só receberam autorização para coletar dados na aula seguinte, após apresentarem à professora um planejamento no caderno de laboratório. Com isso, esperávamos incentivar e dar tempo para os estudantes pudessem(i) refletir sobre: as questões específicas formuladas a partir da situação-problema; quais grandezas seriam medidas; a adequação do modelo do prisma para descrever a situação; e (ii) planejar/delinear o experimento, estabelecendo procedimentos de controle de variáveis buscando atenuar o efeito de fatores não levados em conta na construção do modelo científico, avaliando os instrumentos, bem como sua adequação, para realizar a coleta de dados necessários.

Na última etapa, chamada de Discussão Final, os estudantes apresentaram seus resultados para a turma em pequenos quadros brancos, de 1mx1m, tendo um tempo de apresentação de cerca de 10 a 15 min por grupo. Durante as apresentações, a professora buscou fomentar o debate entre os estudantes, estimulando-os a exercitarem a argumentação e o uso da linguagem científica. Esse momento também se mostrou oportuno para trazer discussões explícitas sobre o processo de modelagem científica, chamando atenção para as consequências das idealizações assumidas na construção dos modelos, a importância dos procedimentos de controle de variáveis, o processo de contrastação empírica, o significado das incertezas experimentais, etc. Por fim, solicitamos que os estudantes elaborassem um relatório, a ser entregue até uma semana depois da Discussão Final. Nesse relatório, os estudantes tiveram, ainda, a oportunidade de redimir eventuais equívocos identificados na Discussão Final, assim como ampliar as análises e conclusões, levando em conta sugestões do grande grupo.

Os quatro EM implementados neste estudo estão sintetizados na Figura 1. Para mais detalhes sobre os EM 1 e 3, consulte Weber et al. (2020) e Weber et al. (2021); para detalhes sobre os EM 2 e 4, consulte Weber (2021).

EM	Conceito da MDC+ enfocado	Conhecimentos de Ótica enfocados	Síntese da situação-problema explorada
1	Expansão de modelo científico	Transporte de energia e modelo de Beer-Lambert	Para compreender os efeitos nocivos da poluição nos oceanos, investigar os mecanismos que podem ser responsáveis por atenuar a luz nos diferentes meios materiais.
2	Modelo científico	Índice de refração e modelo que descreve a deflexão da luz que atravessa um prisma	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.
3	Controle de variáveis	Polarização, coeficientes de reflexão e transmissão e Equações de Fresnel	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.
4	Medição	Espectroscopia e redes de difração	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.

Figura 1.

Episódios de Modelagem construídos para a realização da pesquisa
 Autoria própria

Metodologia de Pesquisa

O contexto de realização da pesquisa foi uma turma da disciplina de Física Experimental IV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que contava com 15 estudantes, sendo seis mulheres e nove homens, com média de idade de 20,3 anos. Estudantes do bacharelado e licenciatura em Física cursam essa disciplina, frequentando a mesma turma. A disciplina foi escolhida porque nela são trabalhados conhecimentos do campo conceitual da Ótica. Tradicionalmente, essa disciplina contava com 12 práticas de laboratório guiadas por roteiros. Para a realização desta pesquisa, redistribuímos os conteúdos previstos em oito atividades práticas: quatro EM criados para a pesquisa e quatro experimentos tradicionais (práticas com lentes, espelhos, redes de difração e o experimento de Young). O número de práticas foi reduzido porque frente ao limite temporal imposto pelo semestre letivo, optamos por promover aprendizagens com maior profundidade e autonomia ao invés de varrer mais tópicos de forma superficial e dirigida. Todas as atividades foram integradas com o plano de ensino, tendo sido consideradas para fins de atribuição de conceito final do estudante na disciplina. Todos os estudantes selecionados para participar da pesquisa assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido, aceitando participar desse estudo. O pesquisador coletou dados ao longo do segundo semestre de 2019, integralizando 32 horas-aula de imersão em campo.

Como critério para seleção dos participantes da pesquisa, adotamos a entrega de todos os relatórios referentes aos EM realizados. Da turma em questão, selecionamos sete estudantes como unidades de análise da pesquisa, sendo seis homens e uma mulher. Assim, esta pesquisa se constitui em um estudo de caso único (a turma), explanatório e incorporado (com sete unidades de análise), conforme Yin (2005; 2011). Dirigimos a coleta de dados por proposições teóricas derivadas de estudos anteriores com EM (Heidemann, 2015). Essas proposições se referem, respectivamente, a cada uma das duas questões de pesquisa do estudo:

Proposição Teórica 1: Os EM desenvolvidos proporcionam aos estudantes situações com potencial para dar sentido e significado a conceitos do campo conceitual da Ótica, e que favorecem a amenização de dificuldades típicas dos estudantes na aprendizagem de conceitos físicos da Ótica, porque tais conceitos são

mobilizados e discutidos com os colegas e professor/a em todas as etapas do EM, desde a realização da tarefa prévia até a discussão final, particularmente no planejamento, execução, e análise dos experimentos.

Proposição Teórica 2: Os EM desenvolvidos proporcionam aos estudantes situações com potencial para dar sentido e significado aos conceitos de modelo científico, controle de variáveis e evidências experimentais, favorecendo avanços no domínio do campo conceitual da MDC+, porque tais conceitos são mobilizados e discutidos com os colegas e professor/a em várias etapas do EM, particularmente no planejamento, execução, e análise dos experimentos.

Baseados nas proposições teóricas, buscamos identificar as situações fomentadas pelos EM e seu potencial para dar sentido e significado a conceitos da Ótica e da MDC+. Para isso, coletamos dados por meio de: caderno de campo, relatórios produzidos pelos estudantes, respostas dos alunos aos questionários sobre as tarefas prévias, entrevistas semiestruturadas (gravação de áudio) e a apresentação durante a Discussão Final (gravação de vídeo). Utilizamos protocolos de observação (Apêndices L a O de Weber, 2015). Durante a disciplina, o papel da professora era o de ministrar as aulas e avaliar os estudantes; a coleta de dados era de inteira responsabilidade do pesquisador, que buscava interferir o mínimo possível na dinâmica das aulas. Todos os dados coletados foram analisados a partir das orientações metodológicas de Yin (2011).

Ainda que os conhecimentos implícitos façam parte do processo de conceitualização do real e, portanto, da aprendizagem do estudante, limitamos o escopo deste estudo ao que foi explicitado pelos estudantes. Para avaliar a primeira proposição teórica, identificamos as situações fomentadas nos EM que demandavam a mobilização de conhecimentos que são, conforme a literatura, de difícil apreensão por parte dos estudantes. Em seguida, analisamos, em cada situação, em que medida os EM foram frutíferos para ampliar o domínio do campo conceitual da Ótica, mitigando dificuldades comuns.

Já a avaliação da segunda proposição teórica foi orientada pela análise da mobilização explícita de conhecimentos sobre conceitos da modelagem científica. Fizemos uma classificação em três níveis: contribuiu, contribuiu timidamente e não contribuiu para que o estudante explicitasse, de modo coerente com a MDC+, conhecimentos relacionados aos conceitos de Modelo Científico (MC), Controle de Variáveis (CV) e Evidência Experimental (EE).

Resultados

Organizamos a apresentação dos resultados em duas subseções, cada uma referente a uma questão de pesquisa. Concentramo-nos na apresentação dos dados mais relevantes, que nos possibilitam avaliar as proposições teóricas do estudo. Mais resultados podem ser consultados em Weber (2021).

Primeira questão de pesquisa: contribuições dos EM para a ampliação do domínio do campo conceitual da Ótica

Para responder à primeira questão de pesquisa, concentramo-nos na análise das situações enfrentadas pelos estudantes e nas relações delas com as dificuldades típicas relatadas na Seção 2.

Temos evidências de que a concepção equivocada de que “lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos” foi mitigada durante o primeiro EM. Considerar a luz emitida por um laser como colimada é uma idealização que pode, ou não, ser adequada, dependendo da distância considerada. No primeiro EM, os estudantes observaram a atenuação da luz proveniente de lasers ao atravessar diferentes meios materiais. Todos os estudantes participantes da pesquisa, exceto o Estudante 6, realizaram investigações em meios sólidos⁶, como o vidro e o acrílico. São evidências de que essa dificuldade foi mitigada os seguintes excertos retirados dos relatórios dos estudantes 3 e 5: “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” e “notando que o laser dispersa muito, utilizou-se um diafragma para focalizar o feixe”.

O Estudante 7 também argumenta que “Para um laser real, não se tem um feixe perfeitamente focalizado, de forma que haverá um afastamento entre os raios de luz supostamente paralelos”. Os estudantes 1 e 2 realizaram a mesma investigação com as varetas de vidro, porém não usaram diafragmas

para colimar a luz do laser antes de passar pelo material. Quando perguntados sobre isso, explicaram, corretamente, que nas curtas distâncias em que as medidas foram feitas, a abertura do feixe era desprezível. Portanto, as evidências permitem afirmar que todos os estudantes tinham ciência de que lasers emitem raios de luz que não são perfeitamente paralelos.

Também temos evidências de que as noções equivocadas de que “luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas” e “os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes” foram mitigadas por meio dos EM 1 e 3. Por exemplo, no EM 1, quando a luz proveniente do laser incide em um meio material, parte de sua energia é perdida por reflexão; tal perda é detectável pelo luxímetro e não passou despercebida pelos estudantes, como fica exposto, por exemplo, no relatório da Estudante 4: “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...”. Durante a Discussão Final desse EM, o Estudante 2 explicou para seus colegas: “Quando tu está indo do laser para o vidro, tu tens uma interface [...]. Então deve ter algum [...] efeito de reflexão ou algo do gênero, que faça com que esse valor [Iluminância ajustada] seja diferente da Iluminância do laser.”

Os demais estudantes também manifestaram essa compreensão em seus relatórios ou durante a Discussão Final. No terceiro EM, os estudantes investigaram a interação da luz polarizada com meios dielétricos. Um dos principais resultados dessa situação vem da conservação da energia: a soma das intensidades da luz refletida, absorvida e transmitida é igual à intensidade da luz incidente. Assim, a reflexão da luz em superfícies dielétricas é uma hipótese básica assumida pelos estudantes durante esse EM. À exceção do Estudante 3, todos os outros mencionaram explicitamente em seus relatórios que parte da luz é refletida ao incidir em um meio. Por exemplo, 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”. Nesse EM, o Estudante 7 investiga as situações em que há (ou não) luz refletida na superfície do acrílico como uma função do ângulo de incidência da luz. Em seu relatório o estudante escreve:

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].

Por conta disso, ambos os EM auxiliaram os estudantes na amenização das crenças equivocadas de que a luz só pode ser refletida por espelhos ou outras superfícies lisas e que os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes.

Muitos estudantes acreditam que “a velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio”. Conforme mencionado na subseção “Metodologia de Ensino”, os estudantes investigaram os fatores que influenciam no índice de refração dos materiais no segundo EM. Antes mesmo das investigações, percebemos, pelas respostas ao questionário da Tarefa Prévia, que os estudantes tinham boa compreensão sobre o conceito de refração da luz. Por exemplo, o Estudante 1 escreveu nesse questionário: “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”. Mesmo que a velocidade da luz não tenha sido tema central de nenhuma investigação do EM, todos os estudantes acabaram mencionando esse aspecto fazendo relação com os resultados obtidos em seus experimentos. Por exemplo, os estudantes 3, 4, 5 e 6 investigaram a dependência do índice de refração da água com a concentração de sal. O seguinte excerto, retirado do relatório do Estudante 3 resume o consenso do grupo:

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 [...] o índice de refração aumenta.

Os estudantes 1 e 2 utilizaram prismas para determinar o índice de refração em função do comprimento de onda da luz. Um esquema representando sua montagem experimental é mostrado na Figura 2. Em seus

relatórios, os estudantes colocam a dependência da velocidade de propagação da luz das diferentes componentes da luz branca com o índice de refração de forma explícita. Os resultados obtidos foram contrastados empiricamente com o modelo de Sellmeier (Ghosh, 1997) por meio do ajuste dos coeficientes desse modelo aos dados experimentais obtidos.

As evidências mostraram que o segundo EM foi frutífero para expor os estudantes 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, que é definido em termos da velocidade de propagação da luz.

Na literatura, relata-se que “estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz”. O experimento mostrado na Figura 2, realizado pelos estudantes 1 e 2 (únicos que fizeram essa investigação), mostrou-se adequado para minimizar essa dificuldade. Como relatado, ambos estudantes conseguiram medir o índice de refração em função do comprimento de onda da luz. Nas palavras do Estudante 2: “Neste experimento, a determinação do índice de refração 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”.

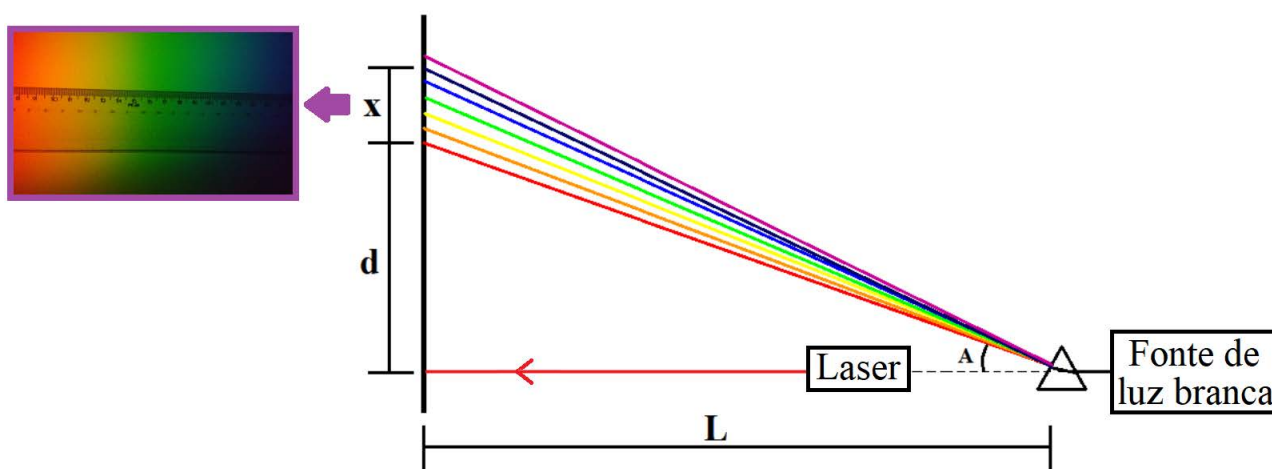


Figura 2.

Esquema usado pelos estudantes 1 e 2 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 espectro projetado na parede autoria própria.

Temos evidências de que o EM 4 contribuiu para que os estudantes mitigassem a crença de que “a cor é uma propriedade dos objetos”, principalmente porque se parte do pressuposto que o processo de formação da visão se dá por meio dos sinais elétricos enviados pelas células do olho humano e da interpretação do cérebro sobre a intensidade desses sinais. Motivados pela questão de pesquisa geral (Como um pixel pode gerar milhões de cores?), os estudantes construíram espectrômetros e conduziram investigações com o objetivo de quantificar o espectro de emissão e absorção de diferentes amostras, dentre elas, a luz emitida pelos pixels das telas.

Nos relatórios de todos os estudantes que realizaram esse EM, foram feitas referências explícitas sobre a interpretação humana das cores. 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”. Realmente, 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. Ainda, sobre sua investigação, o Estudante 1 pontua que, para a formação das diferentes cores pelos pixels, é necessário regular a intensidade de cada uma de suas componentes: “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”. O espectrômetro permitiu analisar o espectro dos filtros de luz do laboratório. O Estudante 2 afirma que “os filtros coloridos do laboratório não são verdadeiramente monocromáticos, pois permitem a passagem de um intervalo de comprimentos de onda”. Portanto, as evidências corroboram a hipótese de que os EM auxiliaram os estudantes a amenizarem a crença de que as cores são propriedades dos objetos; por meio das situações fomentadas, as cores são entendidas em termos do comprimento de onda emitido pelo objeto e da fisiologia do olho humano.

Até aqui, concentramo-nos em elucidar as principais evidências que dão suporte à hipótese de que os EM auxiliaram os estudantes a amenizar dificuldades típicas da Ótica. A Figura 3 resume as concepções equivocadas e dificuldades de Ótica amenizadas a partir das situações fomentadas em cada EM.

EM	Concepções equivocadas e dificuldades
1	“Luz emitida por uma fonte mais potente se propaga por uma distância maior do que luz emitida por uma fonte menos potente”
	“Lasers emitem raios de luz perfeitamente paralelos”
	“Luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas”
2	“A velocidade da luz não tem relação com a refração ou com o meio”
	“Estudantes têm dificuldades em compreender o conceito de dispersão da luz”

Figura 3.

Concepções equivocadas e dificuldades típicas do campo conceitual da Ótica amenizadas em cada EM autoria própria.

EM	Concepções equivocadas e dificuldades
3	“Os fenômenos da reflexão e refração são mutuamente excludentes”
	“Luz é refletida somente por espelhos e outras superfícies lisas”
4	“Um objeto é visível porque luz o ilumina”
	“Cor é uma propriedade dos objetos”
	“Diferentes fontes luminosas não podem emitir o mesmo tipo de luz”

Figura 3.

Concepções equivocadas e dificuldades típicas do campo conceitual da Ótica amenizadas em cada EM (continuação) autoria própria

Entretanto, algumas concepções e crenças equivocadas apontadas na segunda seção não foram confrontadas de forma significativa nos EM, em particular, as relacionadas com a natureza ondulatória da luz. De fato, conforme apontado na consulta à literatura, muitos estudantes têm dificuldade em entender as representações das ondas eletromagnéticas nos livros didáticos e 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 do primeiro EM, essa dificuldade ficou evidente na medida em que cinco estudantes demonstravam compreensões equivocadas ou confusas sobre aspectos fundamentais do conceito de vetor de Poynting, como sua direção e significado físico. No terceiro EM, à exceção dos estudantes 2 e 7, percebemos que todos tiveram dificuldades conceituais relacionadas à imposição das condições de contorno do campo elétrico e magnético na fronteira entre dois meios dielétricos. Essas dificuldades apareceram no contexto da derivação das equações de Fresnel. Por fim, no último EM, todos os estudantes, exceto o 7, tiveram dificuldades em explicar com precisão o que se observava no espectrômetro. Esperávamos que os estudantes tivessem clareza de que os dados coletados por meio do espectrômetro dissessem respeito ao primeiro máximo de difração, porém as evidências mostram que os estudantes não tinham clareza sobre esse aspecto.

Na próxima seção apresentamos as evidências referentes à segunda questão de pesquisa.

Segunda questão de pesquisa: contribuições dos EM para a ampliação do domínio do campo conceitual da modelagem científica

Optamos por analisar particularmente como as situações dos EM contribuíram para que os estudantes dessem sentido e significado a três conceitos fundamentais da MDC+, quais sejam: Modelo Científico, Controle de Variáveis e Evidência Experimental. Começamos a apresentação dos resultados pelo conceito de Modelo Científico.

Modelo Científico (MC)

Fizemos a análise dos dados coletados buscando responder às seguintes questões sobre as ações dos estudantes durante os EM: “a investigação realizada foi coerentemente pautada por algum modelo científico?” e “em que medida foram explicitados os pressupostos teóricos e domínio de validade do modelo?”. Com isso, pudemos responder como conhecimentos relacionados ao conceito de Modelo Científico foram mobilizados. Em todos os EM, concluímos que, em geral, os estudantes eram capazes de operacionalizar o modelo científico 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.

No primeiro EM, à exceção do Estudante 6, todos os estudantes utilizaram corretamente a Lei de Beer-Lambert como modelo científico para apoiar suas investigações⁷. Ou seja, os estudantes ajustaram a curva prevista por essa lei aos seus dados e determinaram o coeficiente de atenuação linear dos diferentes materiais investigados, conseguindo operacionalizar o conhecimento. Porém, mesmo os estudantes que “deduziram” o modelo em seus relatórios não explicitaram os pressupostos teóricos assumidos em sua construção (p. ex. “o material é homogêneo” e “a reemissão da luz por parte do meio material não contribui para o feixe original”). Isto é, nenhum explicitou o domínio de validade da Lei de Beer-Lambert, as hipóteses subjacentes à sua construção ou, se o fizeram, apenas de forma incompleta. Por exemplo, nenhum estudante menciona que o espalhamento é um dos fenômenos responsáveis pela atenuação da luz, apenas a absorção, como podemos ver no relatório do Estudante 1: “Conforme os fótons passam pelo meio, alguns deles são absorvidos, portanto, diminuindo a intensidade, causando a atenuação da luz”. Apontamos tais problemas de forma individual nos relatórios dos estudantes e melhoraram significativamente nos EM seguintes, como será mostrado a seguir.

No segundo EM, além de operacionalizar o modelo científico de referência (Lei de Snell ou o modelo de deflexão da luz em prismas), medindo e calculando grandezas e parâmetros úteis para conduzir seus experimentos, cinco de sete estudantes explicitaram, mesmo que de forma parcial, as idealizações subjacentes aos modelos utilizados. Por exemplo, em seu relatório, referindo-se às idealizações da lei de Snell, o Estudante 6 escreve: “[...] 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 [...]”; já o estudante 7, referindo-se ao modelo do prisma escreve: “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 [...] e para um feixe de luz monocromática [...]”. Um exemplo de manifestação parcial/incompleta de conhecimentos relacionados ao conceito de MC pode ser encontrado no seguinte excerto do relatório do Estudante 2: “em uma interface entre dois materiais com índice de refração distintos, um raio incidente sofre refração, alterando sua trajetória”. Esse estudante explicita o domínio de validade da Lei de Snell, entretanto, não explicita as idealizações admitidas na construção do modelo, por isso consideramos seu aproveitamento apenas parcial.

No terceiro EM, os estudantes investigaram a reflexão e transmissão da luz polarizada. Dos sete participantes da pesquisa, seis manifestaram explicitamente conhecimentos relacionados ao conceito de MC. Por exemplo, as evidências mostram que os estudantes 2 e 5 entendem que o polarizador é uma entidade ideal e que a Lei de Malus não captura todos os fenômenos envolvidos na situação estudada. Em seus relatórios destacamos os seguintes excertos, respectivamente: “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 [...], entre outros”. Conforme comentado, esse EM foi o que mais favoreceu que os estudantes explicitassem conhecimentos relacionados ao conceito de MC.

Por fim, verificamos que o último EM auxiliou poucos (apenas 3 dos 7) estudantes a explicitarem o conceito de MC. Possivelmente, isso correu porque, na maior parte do tempo disponível, os estudantes se ocuparam ou em montar o espectrômetro ou em aprender a usar o software. As dificuldades operacionais na utilização do espectrômetro não permitiram que déssemos uma maior ênfase sobre o papel dos MC que sustentam seu funcionamento, o que explica parte das dificuldades enfrentadas pelos estudantes nesse EM, conforme comentamos no final da subseção anterior.

A Figura 4 resume o resultado consolidado, por estudante, em cada EM, sobre a manifestação de conhecimentos relacionados ao conceito de MC. Essa figura usa a classificação explicada na metodologia de pesquisa: (✓) indica que o episódio contribuiu, () contribuiu timidamente e (x) que não contribuiu para que o estudante explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de forma coerente com as relações propostas na MDC+.

Por meio da Figura 4, vemos que, em 14 das 28 ocorrências analisadas, os EM contribuíram, mesmo que de forma tímida, para que os estudantes avançassem no domínio do conceito de MC. O primeiro EM foi o que os estudantes tiveram mais dificuldade em explicitar conhecimentos relacionados a esse conceito, possivelmente porque: (i) tendo sido o primeiro EM, não estavam habituados com a autonomia que lhes foi concedida; (ii) a longa tradição de aulas experimentais conduzidas por meio de roteiros excessivamente fechados e dirigidos não fomenta a reflexão sobre os modelos subjacentes às investigações experimentais. Esse aspecto melhorou significativamente com as aulas subsequentes, como se observa na figura. Já o terceiro EM foi o mais frutífero para fomentar avanços sobre o conceito de MC.

A Figura 4 também permite identificar que a trajetória dos estudantes no domínio do conceito de MC é marcada por avanços e retrocessos. Por exemplo, podemos notar que os EM 1 e 2, possivelmente, não contribuíram para que o Estudante 1 explicitasse conhecimentos relacionados ao conceito de MC. Já o terceiro EM, possivelmente, auxiliou-o nesse sentido, enquanto o quarto teve uma contribuição apenas parcial.

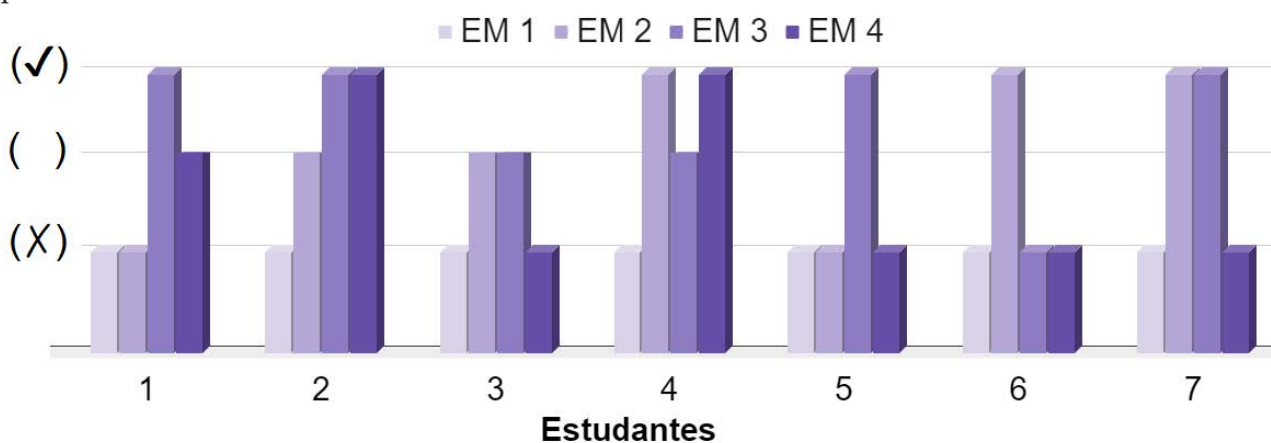


Figura 4.

Resumo dos resultados sobre a contribuição dos EM na construção de sentido e significado pelos estudantes para o conceito de MC autoria própria.

Com isso encerramos a análise sobre a contribuição dos EM para que os estudantes explicitassem conhecimentos relativos ao conceito de MC. A seguir, investigamos as contribuições dos EM com respeito ao conceito de CV.

Controle de Variáveis (CV)

Para avaliar em que medida os EM fomentaram a mobilização de conhecimentos relacionados ao conceito de CV, buscamos identificar se os estudantes tomaram o cuidado, durante o delineamento experimental e coleta de dados, de controlar variáveis e parâmetros definidos no modelo científico de referência, bem como se foram tomadas providências para minimizar a influência de efeitos desprezados no modelo.

Constatamos que, em geral, os estudantes manifestavam implicitamente conhecimentos sobre o conceito de CV em suas investigações. Por exemplo, o seguinte excerto do relatório do Estudante 7 é um exemplo de menção implícita a um procedimento de controle de variáveis fomentado no segundo EM: “[...] mergulhou-se o prisma em água, fervendo-o por aproximadamente dez minutos, para que o seu interior estivesse uniformemente aquecido”. O Estudante 7 aquece o material uniformemente porque nesse caso o índice de refração do material é igual em todos os pontos, uma hipótese básica do modelo. Entretanto, mesmo que isso não tenha sido dito de forma explícita, o conjunto do relatório evidencia que essa ação foi tomada com esse objetivo. No que segue, apresentamos algumas evidências e a análise feita a partir delas.

No primeiro EM, os estudantes mediam a atenuação da luz na matéria. Parâmetros fundamentais de serem medidos/controlados eram a iluminância inicialmente incidente no detector, a incidência normal da luz no detector do luxímetro, a iluminância “de ruído” da sala, que não podia ser completamente escura. Dos sete participantes da pesquisa, cinco demonstraram ter empregado tais procedimentos de controle de variáveis nesse EM. Os estudantes 2 e 3, por exemplo, escrevem em seus relatórios, respectivamente: “a luz da sala foi desligada para não influenciar no experimento”; “[...] o valor a distância nula (luxímetro encostado no laser) foi de 7300 ± 1 lx. Enquanto que o valor de ruído proveniente da sala semi-escura foi de 1 lx”. O Estudante 1 explica, ainda: “[...] os bastões eram trocados [...] de maneira que estivessem o mais próximo possível do laser e do luxímetro, para avaliar somente o efeito do bastão na atenuação da luz, desconsiderando o ar”.

No segundo EM, parte dos estudantes investigou a variação do índice de refração de prismas com a temperatura e com o comprimento de onda (ver Figura 2). Nesse caso, um CV pautado no modelo científico de referência é fundamental, como destaca o Estudante 1: “a montagem do experimento foi feita para obter o ângulo mínimo [de desvio] para cada comprimento de onda [...]”. O Estudante 7, que avaliou a influência da temperatura na variação do índice de refração, justifica a escolha do ângulo de incidência da luz no prisma com base em resultados teóricos previstos pelo modelo. 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 no prisma seja máximo, e, portanto, observável em um anteparo distante. Já os estudantes 3, 4, 5 e 6 mediram a variação do índice de refração da água em função da concentração de sal por meio do ângulo de reflexão total da luz. Os estudantes 4 e 6 destacaram, por exemplo, a necessidade da luz utilizada no experimento ser monocromática, de acordo com as idealizações assumidas na lei de Snell, bem como a importância de controlar a concentração de sal. Por exemplo, o Estudante 6 escreve: “Nota-se também que os últimos 3 pontos não têm variação no índice de refração. Isto, provavelmente, se dá pela saturação da solução aquosa, que já apresentava corpo de fundo precipitado”. O Estudante 4, por mais que tenha listado algum procedimento de CV, o fez de forma essencialmente mecânica, possivelmente sem refletir sobre a necessidade de tais procedimentos. Esse estudante meramente cita as especificações técnicas do laser que foi usado, sem explicar, por exemplo, que a luz monocromática é uma hipótese básica do modelo utilizado. Já o Estudante 5, por mais que tenha executado o experimento com sucesso, não chamou atenção para nenhum procedimento de CV.

No terceiro EM, todos os estudantes, exceto o 7, fizeram investigações com polarizadores, usando a Lei de Malus. Nesse EM, cinco dos sete estudantes manifestaram conhecimentos relacionados a esse conceito. Destacamos, como aspecto negativo, um equívoco relacionado ao CV na investigação dos estudantes 1 e 2.

Nesse caso, foi utilizada luz não colimada na investigação. Apesar de alertados pelo pesquisador após a Discussão Final, esses estudantes não mencionaram em seus relatórios que esse aspecto comprometia seus resultados. Já o Estudante 6, além de não mencionar se a luz da sala foi apagada, afirma, de forma equivocada que “a Lei de Malus descreve o comportamento de um feixe de luz monocromático”.

No último EM, os estudantes 1, 2 e 7 manifestaram conhecimentos significativos relacionados ao conceito de Controle de Variáveis. Por exemplo, o Estudante 1 justifica a calibração do espectrômetro por meio da utilização de uma lâmpada fluorescente, que contém mercúrio: “Como o espectro do vapor de mercúrio é bem definido, ele foi utilizado para fazer a calibração [do espectrômetro]”. Já o Estudante 2 explica que “foi utilizado o canhão de luz branca a uma distância suficientemente grande para que não houvesse superexposição excessiva do espectrômetro à luz [...]”, evidenciando um procedimento de controle de variáveis. Os estudantes 3, 4, 5 e 6 não manifestaram conhecimentos relacionados ao conceito de CV nesse EM. Por exemplo, esses estudantes utilizaram a mesma luz que serviu na calibração do espectrômetro (uma lâmpada fluorescente) para fazer medidas do espectro de absorção de amostras⁸. Ainda, nenhum deles se preocupou em eliminar fontes luminosas externas da análise, como a radiação de fundo da sala. A Figura 5 resume os resultados discutidos.

Portanto, as evidências mostram que em 19 das 28 ocorrências analisadas, os EM fomentaram a criação de situações que contribuiriam, mesmo que de forma tímida, para que os estudantes avançassem no domínio do conceito de Controle de Variáveis. Verificamos que o EM 2 foi o mais adequado para favorecer que os estudantes manifestassem conhecimentos relacionados a esse conceito, enquanto o quarto EM foi o menos adequado nesse sentido. O exame das Figuras 2 e 3 evidencia que os estudantes participantes da pesquisa possuem maior domínio sobre o conceito de Controle de Variáveis em comparação com o de MC. Na maior parte das vezes, as manifestações de conhecimento sobre esse conceito, no entanto, são implícitas.

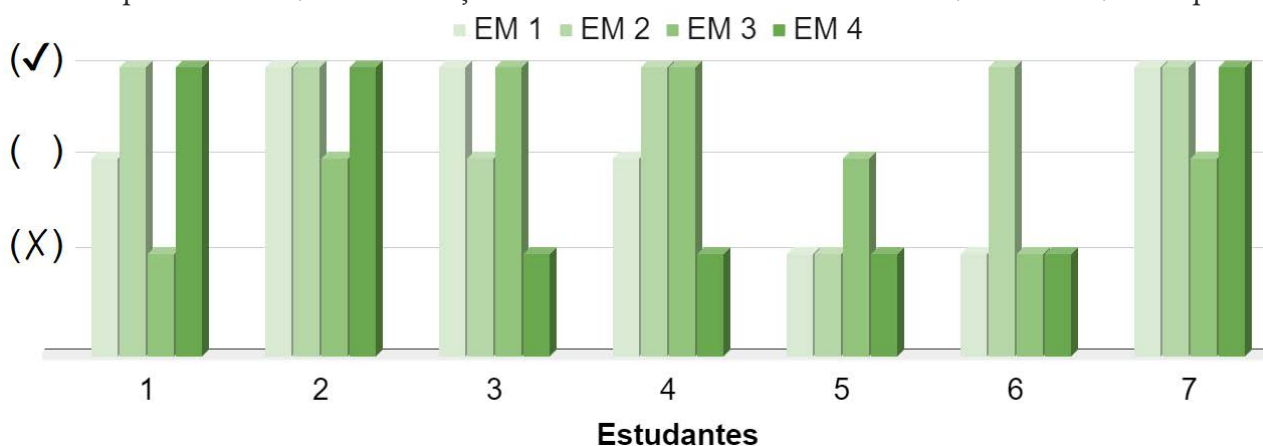


Figura 5.

Resumo dos resultados sobre a contribuição dos EM na construção de sentido e significado pelos estudantes para o conceito de Controle de Variáveis autoria própria

Na próxima subseção apresentamos as evidências sobre o conceito de Evidência Experimental.

Evidência Experimental (EE)

Para avaliarmos como os EM auxiliaram os estudantes a darem sentido e significado ao conceito de EE, buscamos verificar se suas investigações foram conduzidas tendo em vista: (i) conjuntos de dados experimentais, com as respectivas incertezas nas medidas; (ii) a obtenção de conclusões baseadas em evidências; e (iii) as implicações das teorias auxiliares envolvidas no processo de medição.

A análise dos dados mostra que as maiores dificuldades dos estudantes com relação ao conceito de EE tiveram relação com a construção de intervalos de confiança para as evidências (por meio do tratamento estatístico dos dados experimentais coletados) e com afirmações sem respaldo empírico. A seguir, apresentamos algumas fontes de evidências coletadas.

No primeiro EM, cinco dos sete estudantes explicitaram conhecimentos relacionados ao conceito de EE. Por exemplo, o Estudante 1, referindo-se à incerteza na variável “distância”, escreve: “os valores de x [distância] foram medidos com uma régua milimetrada, portanto a incerteza é de 0,05cm [...]”. 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 [...]”. Todos os estudantes obtiveram o coeficiente de atenuação por meio do seu ajuste aos dados experimentais usando algum software. Entretanto, pouquíssimos eram rigorosos na apresentação de seus resultados, sendo que alguns estudantes sequer apresentavam as incertezas associadas. Nesse EM, apenas os estudantes 2 e 7 apresentam o coeficiente de determinação R^2 e fazem cálculos explícitos de propagação de incertezas, por exemplo. No segundo EM, repetiram-se os problemas com as incertezas. De fato, percebemos que os estudantes possivelmente davam pouca importância a esse aspecto fundamental do fazer experimental. Por exemplo, o Estudante 3 justifica que, “devido ao fato do sal ter sido medido em balança de precisão [...] foi desconsiderada a incerteza dessas medidas”. Perguntando aos estudantes, descobrimos, para nossa surpresa, que muitos não estavam habituados a fazer a propagação das incertezas pelo método das derivadas, apesar de estarem cursando a quarta disciplina experimental do curso. Verificamos nos relatórios de vários estudantes que a incerteza, quando calculada, era obtida pelo método dos valores limites, introduzido no início da primeira física experimental, porque os alunos ainda não sabem derivar.

As evidências sugerem que três dos sete participantes da pesquisa tinham propensão de considerar somente dados que eram corroborados ou pelos seus vieses cognitivos, ou pelos modelos teóricos utilizados, ignorando certas EE obtidas. Por exemplo, no EM 1, o Estudante 3 relata que, “foi possível encontrar um resultado muito satisfatório [...]: a curva passa entre a maioria dos pontos [...]”. Entretanto, para chegar nesse resultado, o estudante removeu um ponto experimental, com a seguinte justificativa: “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 representa a realidade de forma especular. Já o Estudante 7, durante o EM 2, equivocou-se ao não acreditar nos seus resultados sobre o cálculo da variação no índice de refração em um prisma de vidro. Segundo sua concepção, o índice de refração deveria aumentar com a temperatura, não diminuir, conforme seus resultados. De acordo com o estudante, isso ocorre porque as moléculas do material “se agitam mais”, dificultando a passagem de luz. Aparentemente, essa explicação é formulada em analogia ao argumento tipicamente usado para explicar o aumento da resistência elétrica dos materiais à medida que sua temperatura se eleva. Entretanto, dependendo da composição do vidro, o índice de refração pode aumentar ou diminuir com a temperatura (John, 1991).

Em geral, as EE coletadas no laboratório são contrastadas empiricamente com modelos teóricos com os quais se faz predições ou extrapolações, buscando descrever certo fenômeno. Entretanto, caso não haja um modelo teórico disponível, a contrastação não faz sentido. Mesmo assim, a longa tradição das aulas de laboratório mostra que diversos estudantes têm a tendência de conectar pontos experimentais por linhas ou fazer ajustes de “melhor curva” para extrapolar seus resultados. Por exemplo, no EM 2, não havia um modelo que descrevesse a variação do índice de refração com a temperatura ou com a concentração de sal, por exemplo. Mesmo assim, os estudantes 3 e 4 acabaram fazendo ajustes de melhor curva. Os demais estudantes não cometeram esse equívoco, como fica evidente nas falas dos estudantes 5, 6 e 7, respectivamente: “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”, “[...] preferiu-se não fitar nenhum tipo de função [...] uma vez que não tem sentido [...] sem uma teoria de embasamento”, “Um gráfico do índice de refração em função da temperatura seria injustificado, uma vez que não se sabe a relação entre essas grandezas”. Já os estudantes 1 e 2 ajustaram os parâmetros do modelo de Sellmeier aos seus dados experimentais.

No terceiro EM, à exceção do Estudante 7, todos os estudantes avaliaram a transmissão da energia luminosa por polarizadores, tendo a Lei de Malus como modelo científico de referência. Os estudantes 1, 2 e 5 notaram que uma quantidade constante de energia era transmitida pelo polarizador, independente da polarização da luz incidente. Esses estudantes expandiram a Lei de Malus, acrescentando um termo aditivo

correspondente à quantidade constante de energia, podendo assim contrastar suas EE com as predições. Já os estudantes 3 e 4 associaram a diferença entre as predições da Lei de Malus e suas evidências a erros experimentais — indicando que esses estudantes possivelmente partem do pressuposto de que os polarizadores reais do laboratório são equivalentes aos ideais, concebidos para construção da Lei de Malus. Nesse EM, o Estudante 7 avaliou a reflexão da luz em meios dielétricos. As EE coletadas por ele foram as iluminâncias incidentes e refletidas no material, que foram usadas para calcular o coeficiente de reflexão da luz em função do ângulo de incidência. Tais dados foram contrastados com um modelo que prevê esse fenômeno e o estudante avalia sua adequação por meio da comparação das EE com o valor teórico, como se vê na sua afirmativa “pode-se ver que as medidas de zeros na refletividade e o ângulo de Brewster estão próximos”.

As evidências mostram que o quarto EM auxiliou quatro dos sete participantes da pesquisa a dar sentido e significado ao conceito de EE. Por exemplo, referindo-se ao espectro de emissão de um laser investigado, o Estudante 1 explica que: “[...] há um pico bem definido em 631,1nm. Esse valor está de acordo com o que o fabricante do laser informa como sendo o comprimento de onda para este equipamento, 632,8nm, considerando o valor da incerteza de 5nm do espectrômetro utilizado”, evidenciando que o estudante associou intervalos de confiança para suas medidas. O mesmo foi feito pela Estudante 4. Os demais estudantes, no entanto, não associaram incertezas aos dados coletados. Já o Estudante 7 mostra ter compreendido o processo de formação das cores dos pixels de uma tela com base nas EE coletadas em sua investigação, como se nota pelo seguinte trecho de seu relatório, referindo-se a uma cor específica: “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”. Tais afirmações são corroboradas pelas EE obtidas pelo estudante.

A Figura 6 resume os resultados da pesquisa com respeito ao conceito de EE.

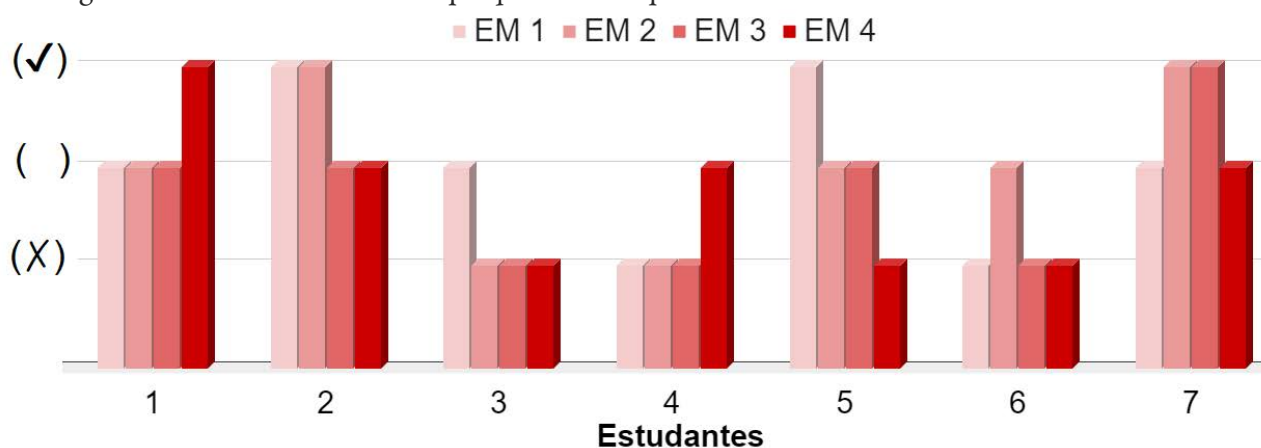


Figura 6.

Resumo dos resultados sobre a contribuição dos EM na construção de sentido e significado pelos estudantes para o conceito de CV
 Autoria própria.

Por meio da Figura 6, percebemos que em 18 das 28 ocorrências os EM contribuíram, mesmo que parcialmente, para que os estudantes dessem sentido e significado ao conceito de EE. Os EM 1 e 2 foram os mais adequados para auxiliar os estudantes a manifestarem conhecimentos relacionados ao conceito de EE, enquanto os EM 3 e 4 foram os menos adequados nesse sentido.

Considerações finais

Buscando atacar o problema da dissociação entre teoria e prática no contexto dos cursos de nível superior em Física, esse estudo avaliou as contribuições da metodologia de ensino Episódios de Modelagem (EM) para proporcionar aos estudantes o enfrentamento de situações didáticas experimentais envolvendo Ótica, ampliando assim seus domínios dessas áreas. Emergindo da análise dos dados, em conformidade com as proposições teóricas deste estudo, destacamos evidências que apontam para o fato de que os EM

auxiliaram os estudantes a mitigar dificuldades comuns, conforme relatadas na literatura, sobre o campo conceitual da Ótica, bem como a avançarem no domínio do campo conceitual da Modelagem Didático-Científica (MDC+).

Sobre a primeira questão de pesquisa, com base nas evidências apresentadas na primeira subseção de “Resultados”, podemos concluir que, de forma geral, exceto para as interpretações ondulatórias da luz, os EM proporcionaram situações aos estudantes para que dessem sentido e significado a conceitos que são, tipicamente, de difícil apreensão no campo conceitual da Ótica. Por conta disso, consideramos que a primeira proposição teórica foi parcialmente corroborada.

Com relação à segunda questão de pesquisa, tendo em vista os resultados apresentados na segunda subseção de “Resultados”, constatamos que os EM fomentaram diversas situações que foram úteis para defrontar os estudantes com problemas que requerem a mobilização de conhecimentos relacionados a conceitos da MDC+. Em particular, focamos a análise nos conceitos de MC, CV e EE. As evidências apresentadas mostram que os EM, na maior parte das vezes (51 de 84 ocorrências), auxiliaram, mesmo que de forma parcial, os estudantes a construir sentido e significado aos conceitos de MC, CV e EE. Isso ocorreu por meio do enfrentamento de diferentes situações que fomentam a mobilização desses conceitos. Como indicado pelas figuras 4, 5 e 6, verificamos que conhecimentos relacionados a esses conceitos não foram 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.

Também evidenciamos que os EM de mandaram um grau mais ativo de participação dos estudantes no planejamento, execução e análise de suas ações no laboratório didático, oportunizando, simultaneamente, a reflexão individual e o compartilhamento de ideias com o grande grupo. Em contraste com as aulas tradicionais de laboratório, podemos destacar que, ao optar pela adoção dos EM, o(a) professor(a) deve levar em conta que essa metodologia: demanda mais tempo por atividade (em geral, três encontros); pressupõe certa autonomia e liberdade investigativa (dentro de limites preestabelecidos) com respeito às aspirações dos estudantes; exige maior engajamento, tanto dos professores quanto dos estudantes, principalmente por conta da Tarefa Prévia e da não existência de roteiros preconcebidos. Essas características resultam da incorporação de aspectos que, conforme resultados da literatura da área de pesquisa em ensino de Ciências, propiciam melhores condições para a aprendizagem em situações didáticas experimentais.

Do ponto de vista da pesquisa em ensino de Física, esse artigo contribui com a área porque amplia estudos já realizados com a MDC+ por meio do enfoque no campo conceitual da Ótica, além de propor quatro atividades experimentais inovadoras e significativas do ponto de vista do aprendizado de Física. Tais atividades se destacam principalmente por envolverem conceitos de campos conceituais da Física, especificamente sobre Ótica, concomitantemente com discussões epistemológicas, particularmente relacionados com o caráter representacional do conhecimento científico. Desse modo, proporciona um ensino de Física mais orgânico, menos fragmentado, promovendo uma visão holística do fazer científico a partir de situações problematizadas e contextualizadas.

Agradecimentos

Agradecemos à professora Cilaine Verônica Teixeira pela colaboração no desenvolvimento das atividades didáticas descritas neste artigo.

Referências

- Ambrose, B. S., Heron, P. R., Vokos, S., & McDermott, L. C. (1999). Student understanding of light as an electromagnetic wave: relating the formalism to physical phenomena. *American Journal of Physics*, 67(10), 891–898. <https://doi.org/10.1119/1.19144>
- Andrés, M. M., Pesa, M., & Moreira, M. A. (2006). El trabajo de laboratorio en cursos de Física desde la Teoría de Campos Conceptuales. *Ciência & Educação (Bauru)*, 12(2), 129–142. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132006000200002>
- Blizak, D., Chafiqi, F., & Kendil, D. (2009). *The Education and Training in Optics and Photonics Conference*. https://spie.org/Documents/ETOP/2009/etop2009_Proceedings.pdf
- Borges, A. T. (2002). Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(3), 291–313. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6607>
- Brandão, R. V., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2011). A modelagem científica vista como um campo conceitual. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28(3), 507–545. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n3p507>
- Brandão, R. V. (2012). *A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no ensino de Física* (Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul). Lume — Repositório Digital da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/70335>
- Borges, A. T. (2002). Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física (Florianópolis)*, 19(3), 291–313. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6607>
- Buffler, A., Lubben, F., & Ibrahim, B. (2009). The relationship between students' views of the nature of science and their views of the nature of scientific measurement. *International Journal of Science Education*, 31(9), 1137–1156. <https://doi.org/10.1080/09500690802189807>
- Bunge, M. (1974). Teoria e realidade. Editora Perspectiva.
- Colin, P., & Viennot, L. (2000). Using two models in optics: Student's difficulties and suggestion for teaching. *American Journal of Physics*, 69(7), 36–44. <https://doi.org/10.1119/1.1371256>
- Bunge, M. (2010). Caçando a realidade. Editora Perspectiva.
- Deacon, C., & Hajek, A. (2011). Student perceptions of the value of physics laboratories. *International Journal of Science Education*, 33(7), 943–977. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.481682>
- Djanette, B., & Fouad, C. (2014). Determination of university student's misconceptions about light using concept maps. *Social and behavioral Sciences*, 152(1), 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.247>
- Ghosh, G. (1997). Sellmeier Coefficients and Dispersion of Thermo-Optic Coefficients for Some Optical Glasses. *Applied Optics*, 36(7), 1540–1546. <https://doi.org/10.1364/AO.36.001540>
- Halliday, D., & Resnick, R. (2009). Fundamentos de Física — Ótica e Física Moderna, vol.4. (8ª ed.). LTC.
- Heidemann, L. A. (2011). Crenças e atitudes sobre o uso de atividades experimentais e computacionais no ensino de física por parte de professores do ensino médio (Dissertação de Mestrado, Universidade

- Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul). Lume — Repositório Digital da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/31006>
- Heidemann, L. A. (2015). Resignificação das atividades experimentais no ensino de física por meio do enfoque no processo de modelagem científica (Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul). Lume — Repositório Digital da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/117767>
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2016). Modelagem Didático-científica: integrando atividades experimentais e o processo de modelagem científica no ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(1), 3–32. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n1p3>
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2018). 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*, 23(2), 352–382. <http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2018v23n2p352>
- Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: An exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 14(5), 541–562. <https://doi.org/10.1080/0950069920140506>
- Holmes, N. G., & Wieman, C. E. (2018). Introductory physics labs: we can do better. *Physics today*, 71(1), 38–45. <https://doi.org/10.1063/PT.3.3816>
- John, M. J. (1991). Thermo-optic Coefficients of Some Standard Reference Material Glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(7), 1689–1691. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb07162.x>
- Kaltakci, D., & Eryilmaz, A. (2009). Contemporary Science Education Research: Learning and Assessment. <http://eprints.teachingandlearning.ie/2455/1/Hayes%20and%20Childs%202010.pdf>
- Koponen, I. T. (2007). Models and modelling in Physics Education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. *Science & Education*, 16(7), 751–773. <https://doi.org/10.1007/s11191-006-9000-7>
- Kostinski, A. B. (2001). On the extinction of radiation by homogeneous but spatially correlated random medium. *Journal of the Optical Society of America A*, 19(12), 2521–2525. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.19.002521>
- Maltese, A. V., Tai, R. H., & Sadler, P. M. (2010). The Effect of High School Physics Laboratories on Performance in Introductory College Physics. *The Physics Teacher*, 48(5), 333–337. <https://doi.org/10.1119/1.3393070>
- Montinho, M., Petrucci, D., Ure, J. E., Aleman, A., & Pérez, S. M. (2011). Una propuesta de trabajos prácticos de laboratorio que favorece el aprendizaje de conceptos. *Ciência & Educação*, 17(4), 823–833. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132011000400004>
- Palacios, F. J., Cazorla, F. N., & Cervantes, A. M. (1989). Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11(3), 273–286. <https://doi.org/10.1080/0950069890110304>
- Parreira, J. E., & Dickman, A. G. (2020). Objetivos das aulas experimentais no ensino superior na visão de professores e estudantes da engenharia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0096>
- Pompea, M., Dokter, F., Walker, E., & Sparks, T. (2007). Education and Training in Optics and Photonics 2007. https://spie.org/Documents/ETOP/2007/ETOP2007_Proceedings.pdf
- Qing, X. R., Bethany, R. W., & Steven, J. P. (2018) Student Difficulties with boundary conditions in the context of electromagnetic waves. *Physical Review Physics Education Research*, 14(2), 1–14. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.020126>

- Silveira, F. L., & Ostermann, F. (2002). A insustentabilidade da proposta indutivista de “descobrir a lei a partir de resultados experimentais”. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19, 7–27. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10052>
- Trumper, R. (2003). The Physics Laboratory — A Historical Overview and Future Perspectives. *Science & Education*, 12(7), 645–670. <https://doi.org/10.1023/A:1025692409001>
- Vergnaud, G. (1993). Teoria dos campos conceituais. 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro.
- Vergnaud, G. (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior (Amsterdam)*, 17(2), 167–181. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(99\)80057-3](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(99)80057-3)
- Vergnaud, G. (2012). Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance. *Investigações em Ensino de Ciências (Porto Alegre)*, 17(2), 287–304. <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/187/127>
- Weber R., Heidemann, L. A., & Veit, E. A. (2020). Atenuação da luz em meios materiais: uma atividade de modelagem envolvendo três experimentos didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, e20200229. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0229>
- Weber R. (2021). 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 (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul). Lume — Repositório Digital da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/225236>
- Weber, R., Heidemann, L. A., & Veit, E. A. (2021). Um experimento didático potencialmente instigante envolvendo a reflexão da luz em um caso aparentemente misterioso. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43, e20200486. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0486>
- Yalcin, M., Altun, A., Turgut, U., & Aggöl, F. (2009). First Year Turkish Science Undergraduates’ Understandings and Misconceptions of Light. *Science & Education*. 18(8), 1083–1093. <https://doi.org/10.1007/s11191-008-9157-3>
- Yin, R. K. (2005). Estudo de caso: planejamento e métodos (3ª ed.). Bookman.
- Yin, R. K. (2011). Qualitative research from start to finish. The Guilford Press.

Notas

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 construção do conhecimento.

2 Para Vergnaud, um teorema-em-ação é uma proposição tida como verdadeira sobre o real.

3 Assumimos que os modelos científicos são sistemas hipotético-dedutivos na medida em que, a partir das hipóteses assumidas (p. ex., idealizações), deduzem-se relações que vão muito além da aplicação de regras lógicas, pois são dirigidas pelos objetivos, pelos conhecimentos prévios e pela criatividade de quem modela, ou seja, dependem do processo de modelagem, envolvendo avanços e retrocessos.

4 Por exemplo, conceitos da MDC+ como “modelos científicos”, “referentes”, “contrastação empírica”, “evidência experimental”, “controle de variáveis”, “modelo teórico auxiliar” e “teoria geral” são mobilizados em todos os EM.

5 Link para o documento: http://www.if.ufrgs.br/gpef/modelagem/optica/protocolos_EMs_otica.pdf.

6 Conforme mencionado, os estudantes tinham liberdade para escolher os experimentos realizados, desde que autorizados pela professora.

7 O Estudante 6 teve dificuldades conceituais sobre a Lei de Beer-Lambert e suas investigações não trouxeram resultados significativos.

8 Para medir o espectro de absorção, faz-se necessário incidir luz de espectro contínuo na amostra. Importar lista0