Areté
Revista Amazônica de Ensino de Ciências

INVARIANTES OPERATÓRIOS SOBRE O COMPORTAMENTO DA LUZ NO EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA

OPERATIVE INVARIANTS CONCERNING THE BEHAVIOR OF LIGHT IN THE DOUBLE-SLIT EXPERIMENT

INVARIANTES OPERATORIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ EN EL EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA

Bianca Cintra de Carvalho*
Luciano Carvalhais Gomes**

RESUMO

Este estudo investiga quais invariantes operatórios sobre o comportamento da luz no experimento da dupla fenda podem ser identificados nas produções de estudantes da terceira série do Ensino Médio em diferentes momentos de uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula. Trata-se de uma pesquisa qualitativa desenvolvida em sala de aula, em uma escola particular do Paraná, com 43 estudantes de 16 a 18 anos. A sequência didática teve duração de 22 horas-aula. O recorte analítico considerou produções escritas e representações gráficas referentes a três momentos, com 40, 43 e 35 respostas, respectivamente. A análise, fundamentada na Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, partiu da identificação das regras de ação para a inferência de teoremas-em-ação e conceitos-em-ação. As interpretações e categorias foram discutidas pela pesquisadora e seu orientador e estabelecidas por consenso. Inicialmente, predominaram invariantes associados a representações retilíneas da luz. No momento intermediário, essas interpretações permaneceram majoritárias, embora tenham sido identificadas respostas híbridas e ondulatórias. Na reaplicação final, 31 das 35 respostas (88,57%) apresentaram invariantes compatíveis com difração e interferência. As comparações são descritivas, considerando-se a variação no número de respondentes e a ausência de análise longitudinal pareada.

Palavras-chave: Teoria dos Campos Conceituais. Invariantes operatórios. Dualidade onda-partícula. Experimento da dupla fenda. Ensino de Física.

ABSTRACT

This study investigates which operative invariants concerning the behavior of light in the double-slit experiment can be identified in third-year high school students' productions at different stages of a teaching sequence on wave-particle duality. This qualitative classroom-based study was conducted at a private school in Paraná, Brazil, with 43 students aged 16 to 18. The teaching sequence comprised 22

* Doutora em Educação para a Ciência e a Matemática pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professora de Física do Colégio Santa Cruz, Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: biancacintra1992@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2624-759X.

** Doutor em Educação para a Ciência e a Matemática pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professor do Departamento de Física e do Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: lcgomes2@uem.br. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2005-9224

https://doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v26.n40.3819 ISSN 1984-7505

class-hours. The analytical corpus included written responses and graphical representations from three stages, with 40, 43, and 35 responses, respectively. Based on Vergnaud's Conceptual Fields Theory, the analysis first identified rules of action and then inferred the corresponding theorems-in-action and concepts-in-action. Interpretations and categories were discussed by the researcher and her advisor and established by consensus. At the initial stage, operative invariants associated with rectilinear representations of light predominated. At the intermediate stage, these interpretations remained prevalent, although hybrid and wave-based responses were also identified. In the final administration, 31 of 35 responses (88.57%) presented operative invariants compatible with diffraction and interference. Comparisons between stages are descriptive because the number of respondents varied and no paired longitudinal analysis was performed.

Keywords: Conceptual Fields Theory. Operative invariants. Wave-particle duality. Double-slit experiment. Physics education.

RESUMEN

Este estudio investiga qué invariantes operatorios sobre el comportamiento de la luz en el experimento de la doble rendija pueden identificarse en las producciones de estudiantes del último año de Educación Secundaria en diferentes momentos de una secuencia didáctica sobre la dualidad onda-partícula. Se trata de una investigación cualitativa desarrollada en una escuela privada de Paraná, Brasil, con 43 estudiantes de 16 a 18 años. La secuencia tuvo una duración de 22 horas de clase. El recorte analítico consideró producciones escritas y representaciones gráficas de tres momentos, con 40, 43 y 35 respuestas, respectivamente. El análisis, fundamentado en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, partió de reglas de acción para inferir teoremas-en-acción y conceptos-en-acción. Las interpretaciones y categorías fueron discutidas por la investigadora y su orientador y establecidas por consenso. Inicialmente predominaron invariantes asociados con representaciones rectilíneas de la luz. En el momento intermedio también se identificaron respuestas híbridas y ondulatorias. En la aplicación final, 31 de 35 respuestas (88,57%) presentaron invariantes compatibles con difracción e interferencia. Las comparaciones son descriptivas debido a la variación de participantes y a la ausencia de análisis longitudinal pareado.

Palabras clave: Teoría de los Campos Conceptuales. Invariantes operatorios. Dualidad onda-partícula. Experimento de la doble rendija. Enseñanza de la Física.

1 INTRODUÇÃO

A inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio tem sido discutida no campo do Ensino de Física tanto pela necessidade de aproximar o currículo escolar dos conhecimentos científicos desenvolvidos a partir do século XX quanto pela presença desses conhecimentos em diferentes tecnologias e fenômenos da sociedade contemporânea (Camargo, 1996; Ostermann, 2000; Brockington, 2005; Silva, 2023).

Apesar disso, pesquisas apontam dificuldades para a inserção da FMC na Educação Básica, relacionadas, entre outros fatores, à formação dos professores, à reduzida carga horária da disciplina, à disponibilidade de materiais didáticos, às condições para a realização de

atividades experimentais e à própria organização curricular (Ostermann; Moreira, 2000; Oliveira; Vianna; Gerbassi, 2007; Monteiro; Nardi; Bastos Filho, 2009; Amorim et al., 2016). Nesse contexto, um dos desafios não consiste apenas em selecionar conteúdos de FMC, mas também em compreender como os estudantes interpretam as situações propostas e quais conhecimentos mobilizam para atribuir sentido aos fenômenos estudados.

Entre os temas que podem contribuir para a problematização de conceitos da Física Quântica encontra-se o experimento da dupla fenda, particularmente por possibilitar a discussão de comportamentos associados à difração e à interferência e por sua relação com a problemática da dualidade onda-partícula.

Segundo Pessoa Jr. (1997, p. 28, grifo do autor), “o que caracteriza a teoria quântica de maneira essencial é que ela é a teoria que atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares”.

Situações envolvendo a dupla fenda podem, assim, colocar os estudantes diante de fenômenos que não são adequadamente interpretados apenas pela mobilização de esquemas construídos em contextos clássicos de partículas ou de propagação retilínea da luz.

Pesquisas recentes reforçam a pertinência de abordagens conceituais, históricas, epistemológicas e experimentais para a discussão da Física Quântica. Carvalho et al. (2023) destacam cuidados relacionados à linguagem e ao emprego de analogias clássicas na abordagem da dualidade onda-partícula; Menelli et al. (2023) apresentam uma proposta experimental destinada ao Ensino Médio; Lima, Heidemann e Becker (2024) investigam possibilidades de aprendizagem de Mecânica Quântica em ações de divulgação científica; e Bøe e Viefers (2023) evidenciam a complexidade envolvida na articulação de explicações fenomenológicas, conceituais e epistemológicas acerca do comportamento ondulatório de entidades quânticas. Trabalhos como o de Lima, Cavalcanti e Ostermann (2021) também mostram a relevância de problematizações epistemológicas e históricas na abordagem da dualidade onda-partícula.

Entretanto, entre os estudos aqui mobilizados, a investigação dos conhecimentos implícitos que orientam as ações e representações dos estudantes diante da situação da dupla fenda, examinados especificamente por meio dos conceitos-em-ação e teoremas-em-ação da Teoria dos Campos Conceituais, não constitui o foco central das análises. Interessa-nos avançar da simples identificação de respostas corretas ou incorretas para a compreensão das regras de

ação e dos invariantes operatórios que sustentam as interpretações produzidas pelos estudantes.

A Teoria dos Campos Conceituais (TCC), proposta por Gérard Vergnaud, oferece elementos para essa análise porque concebe a aprendizagem de um conceito em relação a um conjunto de situações, esquemas, invariantes operatórios e formas de representação. Conceitos-em-ação e teoremas-em-ação podem permanecer implícitos durante a resolução de problemas, e sua identificação nas justificativas e representações permite examinar aspectos da conceitualização que não se reduzem ao domínio de definições formais.

Diante dessas considerações, formula-se a seguinte questão de pesquisa: Quais invariantes operatórios sobre o comportamento da luz no experimento da dupla fenda podem ser identificados nas produções de estudantes da terceira série do Ensino Médio em diferentes momentos de uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula?

Assim, o objetivo deste trabalho é identificar e analisar os conceitos-em-ação e teoremas-em-ação relacionados ao comportamento da luz no experimento da dupla fenda, inferidos a partir das produções de estudantes da terceira série do Ensino Médio em diferentes momentos de uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula.

A contribuição específica do estudo reside na utilização da TCC como instrumento teórico-metodológico para explicitar os conhecimentos que sustentam as interpretações dos estudantes diante dessa situação física. Mais do que verificar a presença de uma classificação da luz como onda ou partícula, procura-se compreender como os estudantes organizam suas explicações e em quais condições mobilizam invariantes operatórios pertinentes, ou não, ao comportamento da luz na situação considerada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Teoria dos Campos Conceituais, desenvolvida por Gérard Vergnaud, constitui uma teoria psicológica da conceitualização que busca compreender os processos pelos quais os sujeitos constroem e desenvolvem conhecimentos ao enfrentarem diferentes situações (Vergnaud, 1993; Moreira, 2002; Zanella, 2016).

Vergnaud (1982; 1993) representa um conceito pela relação entre três conjuntos: S, conjunto de situações que conferem significado ao conceito; I, conjunto dos invariantes

operatórios mobilizados nos esquemas; e R, conjunto das representações simbólicas utilizadas para representar o conceito, suas propriedades e as situações às quais ele se relaciona. A conceitualização, portanto, não decorre da apreensão isolada de uma definição, mas da interação entre situações, conhecimentos e representações.

A noção de situação ocupa posição central na TCC. Uma mesma pessoa pode mobilizar diferentes recursos diante de problemas distintos, assim como um conceito pode exigir diferentes esquemas para ser empregado em variadas classes de situações. A diversidade de situações assume, desse modo, papel relevante no desenvolvimento conceitual.

Associada à noção de situação encontra-se a de esquema, definido por Vergnaud (1996, p. 201, tradução nossa) como "[...] uma organização invariante da conduta para uma determinada classe de situações". Entre os componentes dos esquemas encontram-se metas e antecipações, regras de ação, invariantes operatórios e possibilidades de inferência.

As regras de ação, frequentemente reconstruídas por relações do tipo "se... então", orientam a atividade do sujeito e permitem selecionar informações e estabelecer relações consideradas pertinentes à situação. No presente trabalho, elas assumem particular importância porque constituem o ponto inicial da identificação analítica dos invariantes operatórios.

Os invariantes operatórios correspondem aos conhecimentos contidos nos esquemas e são constituídos por conceitos-em-ação e teoremas-em-ação (Vergnaud, 1993; 2012). Vergnaud diferencia essas duas categorias da seguinte maneira:

> Um teorema-em-ação é **uma proposição considerada como verdadeira sobre o real**; um conceito-em-ação é **uma categoria de pensamento considerada como pertinente**. Assim, em um exemplo de proporcionalidade [...], f(λx) = λf(x) é um teorema-em-ação e o fator λ é um conceito-em-ação (Vergnaud, 1996, p. 202, grifo do autor, tradução nossa).

Conceitos-em-ação e teoremas-em-ação não equivalem, respectivamente, a conceitos e teoremas científicos formalizados. Os teoremas-em-ação correspondem a proposições que o sujeito toma como verdadeiras ao agir, enquanto os conceitos-em-ação correspondem às categorias consideradas pertinentes para selecionar informações e interpretar uma situação. Ambos podem permanecer implícitos e não necessariamente correspondem aos conhecimentos cientificamente aceitos.

Essa distinção é particularmente relevante para a análise realizada neste artigo. A simples ocorrência de determinado termo científico na resposta do estudante não foi considerada evidência suficiente da mobilização do conceito-em-ação correspondente. Palavras como onda, interferência, refração ou difração foram interpretadas em articulação com a justificativa e com a representação produzida.

Assim, as produções escritas e gráficas são tomadas como indícios dos invariantes operatórios mobilizados em situação, e não como manifestações diretas e inequívocas de estruturas cognitivas internas. A identificação analítica procura reconstruir a regra de ação subjacente à resposta e, a partir dela, inferir o teorema-em-ação e o conceito-em-ação. Quando a produção não oferece elementos suficientes para sustentar essa inferência, a resposta é classificada como indefinida.

A pertinência de um invariante operatório deve, ainda, ser considerada em relação à situação. Um esquema associado à propagação retilínea da luz pode ser produtivo em diversas situações de Óptica Geométrica e tornar-se insuficiente quando empregado sem considerar condições em que difração e interferência se tornam relevantes. A análise não pretende, portanto, simplesmente classificar concepções como “certas” ou “erradas”, mas investigar quais conhecimentos orientam as interpretações dos estudantes e sua pertinência diante das situações físicas propostas.

3 METODOLOGIA

3.1 Contexto, participantes e delineamento

Este artigo apresenta um recorte de uma investigação qualitativa mais ampla desenvolvida em sala de aula, com observação participante e implementação de uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula, sendo a pesquisadora, a primeira autora, também professora de Física da turma. A atuação simultânea como professora e pesquisadora demandou cuidados para reduzir possíveis interferências decorrentes dessa dupla posição. Durante a produção dos dados, buscou-se evitar a indução das respostas, de modo que as intervenções da professora se concentrassem no esclarecimento das situações e na proposição de questionamentos, sem fornecer indícios das respostas consideradas cientificamente

adequadas. Embora várias atividades envolvessem discussões em grupos ou duplas, os estudantes produziram registros individuais. Além disso, quando as atividades integraram a avaliação escolar, a nota foi vinculada à participação e à qualidade da argumentação, e não à correção conceitual das respostas. A investigação mais ampla também recorreu a diferentes fontes de dados, observação participante, registros escritos e gravações de áudio, como estratégia de triangulação.

O estudo foi realizado em um colégio particular localizado no município de Nova Esperança, no noroeste do Paraná. A escolha do contexto esteve vinculada à inserção profissional da pesquisadora na instituição, onde ministrava a disciplina de Física para a turma investigada, caracterizando uma seleção vinculada à acessibilidade ao campo, sem pretensão de representatividade estatística.

A turma era constituída por 44 estudantes. Um deles não concordou em participar da investigação, de modo que o conjunto de participantes da pesquisa foi composto por 43 estudantes, sendo 29 do sexo feminino e 14 do sexo masculino, com idades entre 16 e 18 anos. A participação na pesquisa não constituía condição para a participação nas aulas e atividades didáticas. Foram incluídos no corpus da investigação os estudantes da turma que concordaram voluntariamente em participar da pesquisa e, quando menores de idade, apresentaram o consentimento dos responsáveis e seu próprio assentimento. As produções do estudante que não concordou em participar não foram incorporadas aos dados da pesquisa.

Os estudantes já haviam estudado, na segunda série do Ensino Médio, conteúdos relacionados a ondas mecânicas e eletromagnéticas e aos fenômenos de reflexão, interferência e difração, também com a primeira autora como professora de Física. Esses conhecimentos foram retomados no início da sequência didática.

3.2 Aspectos éticos

A realização da investigação no colégio foi autorizada pela instituição, inclusive para a utilização das aulas destinadas à revisão de conteúdos no desenvolvimento da sequência didática e da pesquisa. A pesquisa foi apreciada e aprovada pelo Comitê Permanente de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Estadual de Maringá (COPEP/UEM), conforme Parecer nº 3.268.473 e Certificado de Apresentação para Apreciação Ética (CAAE) nº

10626119.3.0000.0104. Antes do início da investigação, os estudantes foram informados sobre seus objetivos e procedimentos e sobre o caráter voluntário da participação. Para os menores de idade, foram utilizados os respectivos termos de consentimento dos responsáveis e de assentimento dos estudantes. Foram preservadas as identidades da instituição e dos participantes.

3.3 Sequência didática e constituição dos dados

A sequência didática foi desenvolvida entre 7 de outubro e 28 de novembro de 2019, totalizando 22 horas-aula, distribuídas em três horas-aula semanais, com duração de 50 minutos cada. O Quadro 1 apresenta a organização cronológica da sequência, indicando os objetivos principais, os conteúdos e situações abordados e os recursos e instrumentos empregados em cada etapa.

Quadro 1 – Organização da sequência didática

Data	Duração	Objetivo principal	Conteúdos/situações	Recursos e instrumentos
07/10/2019	1 aula	Apresentar a pesquisa e organizar a participação dos estudantes	Procedimentos da investigação e organização dos grupos	Orientações sobre a pesquisa, gravações e atividades
10/10/2019	2 aulas	Identificar conhecimentos mobilizados pelos estudantes antes da sequência	Partículas, ondas, luz, fóton, elétron e dupla fenda	Questionário inicial, adaptado de Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009)
17/10/2019	2 aulas	Retomar o conceito de onda e suas características	Ondas, representação, propagação e reflexão	Telefone de copos, desenhos dos estudantes, animações e simulador PhET
21/10/2019	1 aula	Retomar fenômenos ondulatórios relevantes para a dupla fenda	Reflexão; interferência construtiva e destrutiva	Simulador PhET e vídeo de ondas na água
24/10/2019	2 aulas	Comparar o comportamento de partículas e ondas em situações de fenda	Partículas, ondas mecânicas, distribuição de frequências e dupla fenda	Atividade adaptada de Fanaro (2009), simulador Doppelspaltversuch e vídeo com ondas na água
28/10/2019	1 aula	Analisar o fenômeno da difração	Difração de ondas mecânicas em uma e duas fendas	Situações-problema, representações gráficas e vídeo experimental

Data	Duração	Objetivo principal	Conteúdos/situações	Recursos e instrumentos
31/10/2019	2 aulas	Comparar partículas e ondas e analisar o comportamento da luz na dupla fenda	Difração, interferência, dupla fenda com ondas e luz	Vídeos, animação didática, desenhos, atividade intermediária sobre a dupla fenda e experimento de difração com fio de cabelo
04/11/2019	1 aula	Introduzir a discussão histórica sobre a natureza da luz	Modelos corpuscular e ondulatório até o século XIX	Exposição dialogada e material histórico
07/11/2019	2 aulas	Prosseguir a discussão histórica e retomar processos de eletrização	Natureza da luz e eletrização	Exposição dialogada e experimento com eletroscópio de folhas
11/11/2019	1 aula	Introduzir o problema do efeito fotoelétrico	Interação entre luz e matéria; descarga do eletroscópio	Eletroscópio de folhas e diferentes fontes luminosas
14/11/2019	2 aulas	Discutir os resultados do experimento e introduzir a explicação quântica	Efeito fotoelétrico, quantum e fóton	Resultados experimentais, vídeos e discussão orientada
18/11/2019	1 aula	Aprofundar a análise do efeito fotoelétrico	Frequência, intensidade, energia e efeito fotoelétrico	Experimentos, simulador e exercícios
25/11/2019	1 aula	Problematizar diferentes interpretações sobre a natureza da luz	Dualidade onda-partícula e interpretações da Mecânica Quântica	Texto Louis de Broglie e a natureza da luz e questões norteadoras
28/11/2019	3 aulas	Sistematizar as discussões sobre dualidade e identificar os invariantes no momento final	Dualidade onda-partícula, comportamento de fótons e elétrons	Texto didático, simuladores, vídeos e questionário final

Fonte: Produção dos autores (2019).

Na investigação mais ampla, os dados foram constituídos por questionários, atividades escritas, registros de áudio e observação participante. As discussões dos estudantes foram gravadas em diferentes momentos e posteriormente transcritas, utilizando-se os códigos A1 a A43 para os participantes e P para a professora-pesquisadora. Para o recorte analisado neste artigo, foram consideradas principalmente as produções escritas e as representações gráficas diretamente relacionadas às situações envolvendo o comportamento da luz no experimento da dupla fenda. O questionário inicial foi discutido pelos estudantes em grupos, mas cada participante produziu seu registro individual. Nas atividades intermediárias relacionadas à dupla

fenda, os estudantes puderam discutir as situações em duplas. O questionário final foi respondido individualmente.

O questionário inicial utilizou situação adaptada de Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009). Outras situações empregadas na sequência dialogaram com atividades apresentadas por Fanaro (2009). Para subsidiar as discussões históricas e epistemológicas sobre a natureza da luz, foi elaborado um texto didático, *Louis de Broglie e a natureza da luz*, inspirado na entrevista imaginária proposta por Medeiros (2005) e nas discussões apresentadas por Martins e Rosa (2014) e Pessoa Jr. (2003). A animação utilizada na sequência permitiu comparar o comportamento esperado de projéteis clássicos com o comportamento ondulatório na dupla fenda, destacando a formação de padrões de difração e interferência no segundo caso. As situações efetivamente consideradas no recorte analítico são sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Situações consideradas no recorte analítico

Momento	Instrumento	Situação analisada	Fonte
Inicial	Questionário inicial	"Qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, observada no anteparo? Justifique fisicamente sua resposta."	Adaptado de Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009).
Intermediário	Questão 2	"O que acontece com a luz ao passar por duas fendas (da mesma ordem de grandeza do seu comprimento de onda)? Represente, por meio de desenho, a propagação da luz após atravessar as fendas. Justifique fisicamente sua resposta."	Adaptado de Fanaro (2009).
Intermediário	Questão 3	"Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo visto de frente após a fonte ser ligada, na situação em que há duas fendas."	Adaptado de Fanaro (2009).
Final	Reaplicação	Reaplicação da questão do momento inicial.	Dados da pesquisa.

Fonte: Produção dos autores (2019).

3.4 Recorte analítico e procedimento de categorização

Foram considerados três momentos diretamente relacionados ao objeto deste artigo: o questionário inicial, a atividade intermediária referente à dupla fenda e a reaplicação da questão ao final da sequência. O corpus do primeiro momento foi constituído por 40 respostas; no momento intermediário, foram analisadas 43 respostas; e, no momento final, 35 respostas.

A análise fundamentou-se na Teoria dos Campos Conceituais. Para cada produção, considerou-se não apenas a terminologia empregada, mas a relação entre a justificativa, a representação e a regra de ação que podia ser reconstruída a partir da produção. Para cada resposta, identificou-se uma unidade de significado relacionada à maneira pela qual o estudante organizava sua interpretação da situação. A partir dessa unidade, buscou-se reconstruir uma regra de ação, geralmente expressa na forma “se... então”, e, em seguida, inferir o teorema-em-ação e o conceito-em-ação correspondentes. As regras decisórias utilizadas na categorização são exemplificadas no Quadro 3.

Quando a produção não apresentava elementos suficientes para reconstruir de maneira fundamentada uma regra de ação e, consequentemente, inferir um teorema-em-ação e um conceito-em-ação, a resposta era classificada como indefinida. Essa classificação não se restringiu a respostas sem justificativa: também foi aplicada quando o estudante empregava termos ou descrições cuja articulação não permitia identificar uma relação explicativa suficientemente consistente, como exemplificado no Quadro 3.

A identificação e a categorização dos invariantes operatórios foram realizadas pela pesquisadora em conjunto com seu orientador. As interpretações e categorias foram discutidas entre ambos, e as decisões classificatórias foram estabelecidas por consenso. Não foi empregado procedimento de codificação independente nem calculado índice estatístico de concordância entre avaliadores.

A presença isolada de terminologia científica não foi utilizada como critério suficiente de categorização. Os termos empregados pelos estudantes foram considerados em articulação com as justificativas e representações produzidas.

Quadro 3 – Exemplos do procedimento de identificação e categorização dos invariantes

Evidência empírica	Unidade de Significado	Regra de ação reconstruída	Teorema-em-ação inferido	Conceito-em-ação inferido	Regra decisória
A1: "A luz se propaga em linha reta, logo só atravessará as fendas, fazendo o desenho de somente duas linhas no anteparo. Já que independentemente do ângulo a luz se propaga em linha reta."	Propagação retilínea da luz após a passagem pelas fendas	Se a luz se propaga em linha reta, então atravessa as fendas mantendo trajetórias retilíneas até o anteparo.	T1: Um feixe de luz não pode se encurvar, logo, ele sempre se propagará em linha reta.	C1: Um feixe de luz é uma entidade física rígida, inflexível, como se fossem flechas (ou pequenas partículas) lançadas pela fonte luminosa.	Classificar como C1/T1 quando a justificativa e/ou representação organizar o comportamento da luz exclusivamente por trajetórias retilíneas, sem admitir espalhamento após as fendas.
A12: "Por se tratar da luz, tal que esta possua uma dualidade onda-partícula, quando atravessar uma dupla fenda a luz se comportará como onda sofrendo difração e interferência, gerando franjas claras e escuras."	Comportamento ondulatório associado à difração, interferência e formação de franjas	Se a luz atravessa a dupla fenda apresentando comportamento ondulatório, então ocorre difração/interferência e formam-se franjas claras e escuras.	T4: Um feixe de luz pode se encurvar, logo, ele pode sofrer interferência construtiva (cristas) e interferência destrutiva (vale).	C2: Um feixe de luz é uma onda.	Classificar como C2/T4 quando a justificativa relacionar de modo articulado o comportamento ondulatório da luz à difração e/ou interferência e à formação do padrão no anteparo.

https://doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v26.n40.3819 ISSN 1984-7505

Evidência empírica	Unidade de Significado	Regra de ação reconstruída	Teorema-em-ação inferido	Conceito-em-ação inferido	Regra decisória
A37: "A luz passa pelo anteparo ou melhor pela fenda e refringi (reflete) em mais de dois pontos no anteparo pelo fato de sua partícula se espalhar."	A resposta reúne referências a refração/reflexão, partícula e espalhamento, sem estabelecer relação explicativa suficientemente e coerente entre esses elementos	Não foi possível reconstruir de maneira suficientemente fundamentada uma regra de ação.	Não inferido	Não inferido	Classificar como indefinida quando, mesmo havendo resposta e terminologia física, os elementos apresentados não permitem reconstruir uma relação causal/regra de ação suficientemente e consistente para sustentar a inferência de um teorema-em-ação e de um conceito-em-ação.

Fonte: Produção dos autores (2019).

O Quadro 3 tem função de explicitar e tornar rastreável o procedimento analítico; não constitui uma etapa adicional de categorização. As formulações de C1, C2, T1 e T4 reproduzem as categorias construídas na análise do corpus deste artigo.

3.5 Tratamento da variação no número de respondentes

Como os conjuntos analisados apresentam quantitativos distintos, 40, 43 e 35 respostas, e não foi construída uma matriz longitudinal pareada A1–A43, as comparações realizadas neste artigo possuem caráter descritivo. Diferenças entre frequências ou percentuais nos diferentes momentos indicam diferenças nas distribuições das categorias identificadas nos respectivos conjuntos de respostas e não são interpretadas como trajetórias individuais dos mesmos estudantes.

4 ANÁLISE E RESULTADOS

4.1 Momento inicial

No primeiro momento analisado, o corpus foi constituído por 40 respostas. Em 21 delas (52,5%), foram identificados o conceito-em-ação (1) e o teorema-em-ação (1), sintetizados no Quadro 4.

Quadro 4 – Invariantes operatórios identificados em 21 das 40 respostas ao questionário inicial (52,5%)

Conceito-em-ação (1)	Teorema-em-ação (1)
Um feixe de luz é uma entidade física rígida, inflexível, como se fossem flechas (ou pequenas partículas) lançadas pela fonte luminosa.	Um feixe de luz não pode se encurvar, logo, ele sempre se propagará em linha reta.

Fonte: Produção dos autores (2019).

As respostas desse grupo foram organizadas a partir da regra de ação segundo a qual, se a luz se propaga retilineamente, sua passagem pelas duas fendas produziria regiões iluminadas apenas nas direções determinadas por elas. Como exemplo representativo, A1 justificou:

> A1: A luz se propaga em linha reta, logo só atravessará as fendas, fazendo o desenho de somente duas linhas no anteparo. Já que independentemente do ângulo a luz se propaga em linha reta.

Alguns estudantes desse grupo utilizaram termos como onda, dispersão, reflexão ou refração. Entretanto, a utilização isolada dessa terminologia não foi considerada suficiente para inferir outros invariantes operatórios, pois as justificativas permaneciam organizadas pela regra

de propagação retilínea. A categorização considerou, portanto, a relação entre a terminologia empregada, a justificativa e a representação construída, e não apenas a ocorrência de palavras associadas à Ondulatória.

Em outras 17 respostas (42,5%), identificou-se o mesmo conceito-em-ação, mas associado a outro teorema-em-ação, apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Invariantes operatórios identificados em 17 das 40 respostas ao questionário inicial (42,5%)

Conceito-em-ação (1)	Teorema-em-ação (2)
Um feixe de luz é uma entidade física rígida, inflexível, como se fossem flechas (ou pequenas partículas) lançadas pela fonte luminosa.	Um feixe de luz é fortemente pressionado, ao passar por uma fenda, logo, ele se abrirá (como se fosse um leque) e se propagará em linha reta, iluminando todo o anteparo.

Fonte: Produção dos autores (2019).

Uma resposta representativa dessa categoria foi apresentada por A38:

> A38: Quando o feixe de luz atravessar a parede através das fendas irá se espalhar por todo o anteparo, assim iluminando tudo.

Embora nesse segundo conjunto seja admitido um espalhamento da luz após as fendas, a regra de ação mobilizada não incorpora os fenômenos de difração e interferência requeridos pelas condições físicas apresentadas na situação. A diferença em relação ao primeiro conjunto situa-se, portanto, no teorema-em-ação empregado, enquanto o conceito-em-ação inferido permanece o mesmo.

Nas duas respostas restantes (5,0%), os registros não forneceram elementos suficientes para reconstruir a regra de ação e inferir os invariantes operatórios. Elas foram, portanto, classificadas como indefinidas. Não se atribui a ausência de justificativa a desconhecimento conceitual, dificuldade de interpretação ou qualquer outra causa específica, pois os dados não permitem estabelecer essa explicação.

Em síntese, 38 das 40 respostas (95,0%) foram associadas ao conceito-em-ação (1), embora sustentadas por dois teoremas-em-ação distintos. Esse resultado evidencia o predomínio, no conjunto inicial, de interpretações organizadas pela propagação retilínea do feixe luminoso. Esse predomínio não implica considerar a propagação retilínea como conhecimento “errado” em si. Trata-se de um modelo pertinente em determinadas situações da

Óptica Geométrica; a questão analítica reside em sua mobilização como explicação suficiente para uma configuração em que difração e interferência precisam ser consideradas.

4.2 Momento intermediário

Na Questão 2 do instrumento intermediário foram analisadas 43 respostas. Dessas, 17 (39,5%) apresentaram o primeiro padrão representacional; 14 (32,6%), o segundo; oito (18,6%), uma configuração intermediária; três (aproximadamente 7,0%), uma representação associada ao comportamento ondulatório; e uma resposta não forneceu justificativa suficiente. As Figuras 1 a 4 apresentam exemplos das configurações encontradas.

Figura 1 – Exemplo de resposta associada a C1/T1

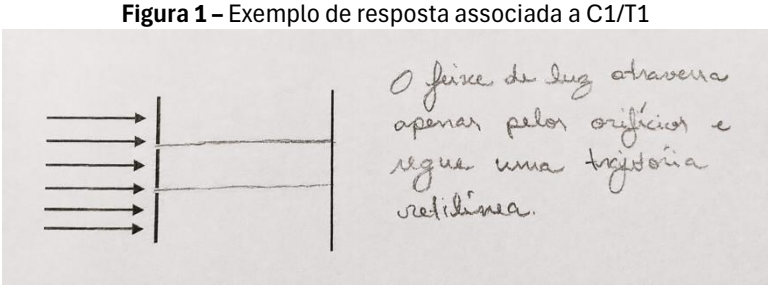


Figura 2 – Exemplo de resposta associada a C1/T2

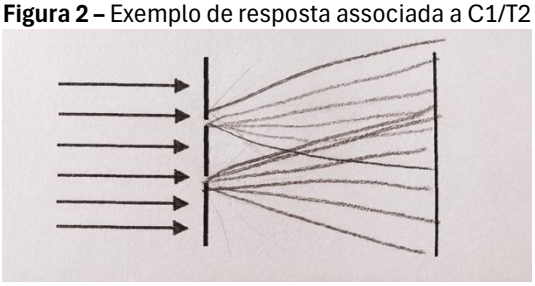


Figura 3 – Exemplo de resposta associada a C1/T3

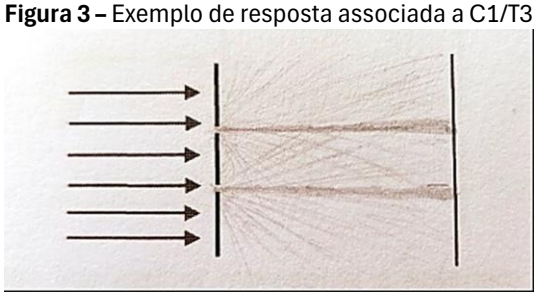
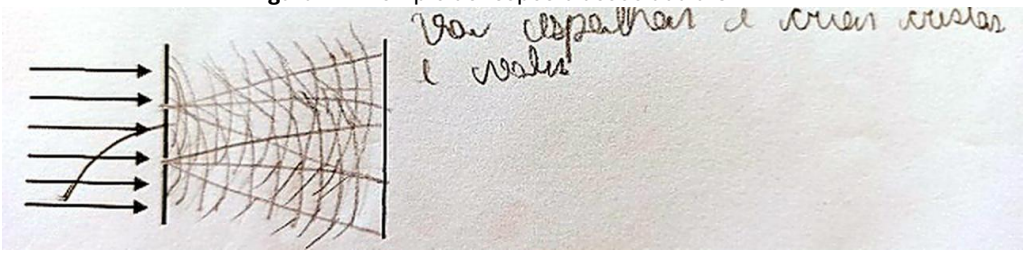


Figura 4 – Exemplo de resposta associada a C2/T4



Fonte das Figuras 1 a 4: Produção dos autores (2019).

Nas 17 respostas correspondentes à Figura 1 foram identificados C1/T1; nas 14 respostas correspondentes à Figura 2, C1/T2. Em oito respostas (18,6%), identificou-se o conceito-em-ação (1) associado ao teorema-em-ação (3), sintetizado no Quadro 6.

Quadro 6 – Invariantes operatórios identificados em 8 das 43 respostas à Questão 2 (18,6%)

Conceito-em-ação (1)	Teorema-em-ação (3)
Um feixe de luz é uma entidade física rígida, inflexível, como se fossem flechas (ou pequenas partículas) lançadas pela fonte luminosa.	Alguns raios de luz encostam nas extremidades da fenda, logo, ao contrário dos demais que passam diretamente em linha reta até o anteparo, eles se desviam, se propagando em linha reta até o anteparo.

Fonte: Produção dos autores (2019).

Esse teorema-em-ação introduz um elemento distinto dos dois anteriores: a possibilidade de desvio de alguns raios nas extremidades das fendas. Contudo, a regra de ação ainda organiza a propagação após o desvio por trajetórias retilíneas.

Nas três respostas correspondentes à Figura 4, foram identificados o conceito-em-ação (2) e o teorema-em-ação (4), apresentados no Quadro 7. A redação do quadro preserva as categorias inferidas das produções dos estudantes; no texto analítico, prefere-se a expressão comportamento ondulatório da luz para evitar uma leitura ontológica simplificada.

Quadro 7 – Invariantes operatórios identificados em 3 das 43 respostas à Questão 2 (7,0%)

Conceito-em-ação (2)	Teorema-em-ação (4)
Um feixe de luz é uma onda.	Um feixe de luz pode se encurvar, logo, ele pode sofrer interferência construtiva (cristas) e interferência destrutiva (vale).

Fonte: Produção dos autores (2019).

Considerando as categorias da Questão 2, 39 das 43 respostas (90,7%) foram associadas ao conceito-em-ação (1), distribuídas entre T1, T2 e T3; três respostas (7,0%) foram associadas ao conceito-em-ação (2); e uma permaneceu indefinida.

Na Questão 3, 27 respostas (62,8%) foram associadas ao primeiro padrão representacional; oito (18,6%), ao segundo; e oito (18,6%), ao terceiro. As Figuras 5 a 7 apresentam exemplos desses padrões.

Figura 5 – Exemplo de representação associada a C1/T1

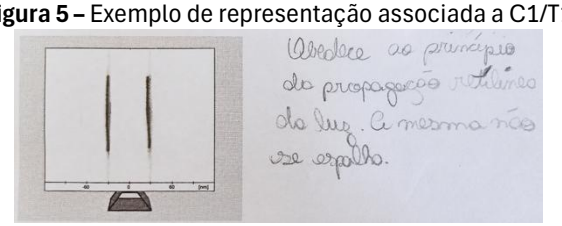


Figura 6 – Exemplo de representação associada a C1/T3

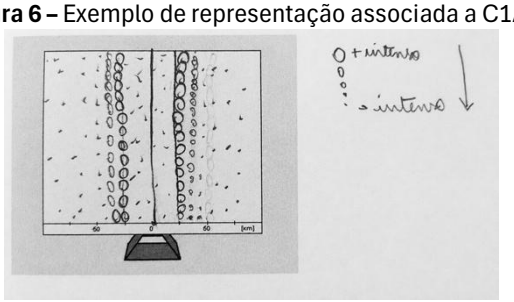


Figura 7 – Exemplo de representação associada a C2/T4



Fonte das Figuras 5 a 7: Produção dos autores (2019).

As 27 primeiras respostas foram associadas a C1/T1; oito, a C1/T3; e oito, a C2/T4. Dessa forma, nessa situação, 35 respostas (81,4%) foram associadas a C1 e oito (18,6%) a C2.

A diferença entre as Questões 2 e 3 do mesmo instrumento é relevante à luz da TCC: a proporção de respostas relacionadas a C2 varia de 7,0% para 18,6%, evidenciando que a configuração dos invariantes identificados pode variar em função da situação proposta. As respostas intermediárias mostram, portanto, que as interpretações associadas à propagação retilínea predominavam no conjunto analisado, mas coexistiam com formas híbridas e com respostas compatíveis com o comportamento ondulatório da luz.

Não se conclui que as atividades realizadas até aquele momento tenham sido "insuficientes" ou que tenha ocorrido "mudança significativa", pois não foi realizado teste de significância e o delineamento não permite estabelecer causalidade.

4.3 Momento final

Após o momento intermediário, a sequência prosseguiu com discussões históricas sobre a natureza da luz, efeito fotoelétrico, quantum, fóton e dualidade onda-partícula. No momento final, 35 estudantes responderam individualmente à questão reaplicada. Entre essas respostas,

31 (88,57%) foram associadas ao conceito-em-ação (2) e ao teorema-em-ação (4); uma (2,86%) foi associada à interpretação retilínea; e três (8,57%) foram classificadas como indefinidas.

Nas respostas associadas a C2/T4, os estudantes relacionavam a situação da dupla fenda à interferência e, em diferentes registros, à difração e à formação de franjas. Os exemplos de A29 e A12 ilustram essa articulação:

> A29: A luz quando passa pela fenda se comporta como onda e ao se difratar sofre interferência formando as franjas.
> A12: Por se tratar da luz, tal que esta possua uma dualidade onda-partícula, quando atravessar uma dupla fenda a luz se comportará como onda sofrendo difração e interferência, gerando franjas claras e escuras.

O aspecto analiticamente relevante não é apenas a utilização do termo onda, mas a articulação entre a configuração física e propriedades como difração e interferência. São essas relações, em conjunto com as representações, que sustentam a inferência dos invariantes operatórios.

A distribuição final difere daquela observada no primeiro momento: inicialmente, 38 das 40 respostas foram associadas a C1; ao final, 31 das 35 respostas foram associadas a C2/T4. Essa comparação, entretanto, não significa que 88,57% dos estudantes tenham individualmente modificado seus invariantes operatórios, pois os conjuntos de respondentes não são idênticos e não foi realizada análise longitudinal pareada. O resultado que os dados sustentam é que a distribuição das categorias no conjunto final difere da distribuição encontrada no conjunto inicial.

Da mesma maneira, não é possível atribuir o resultado final isoladamente às atividades históricas, epistemológicas ou a qualquer outro componente particular da sequência. As atividades foram desenvolvidas de forma cumulativa e articulada.

4.4 Síntese dos resultados

A Tabela 1 sintetiza a distribuição dos invariantes operatórios nos diferentes momentos analisados.

Tabela 1 – Distribuição dos invariantes operatórios nos momentos analisados

Momento	n	Distribuição das respostas
Questionário inicial	40	21 (52,5%) – C1/T1; 17 (42,5%) – C1/T2; 2 (5,0%) – indefinidas

Momento	n	Distribuição das respostas
Atividade intermediária – Questão 2	43	17 (39,5%) – C1/T1; 14 (32,6%) – C1/T2; 8 (18,6%) – C1/T3; 3 (7,0%) – C2/T4; 1 (2,3%) – indefinida
Atividade intermediária – Questão 3	43	27 (62,8%) – C1/T1; 8 (18,6%) – C1/T3; 8 (18,6%) – C2/T4
Questionário final	35	31 (88,57%) – C2/T4; 1 (2,86%) – C1/T1; 3 (8,57%) – indefinidas

Fonte: Produção dos autores (2019).

Considerados em conjunto, os três momentos evidenciam diferentes formas de organização das interpretações dos estudantes diante da dupla fenda. Inicialmente, predominam invariantes fundamentados em representações retilíneas. Nas situações intermediárias, essas interpretações continuam majoritárias, mas coexistem com configurações híbridas e ondulatórias. No momento final, predomina, no conjunto das respostas disponíveis, a mobilização de invariantes compatíveis com a interpretação do comportamento da luz em termos de difração e interferência.

À luz da TCC, esses resultados reforçam o caráter situacional da conceitualização. Um mesmo conceito-em-ação pode estar associado a diferentes teoremas-em-ação, e a mobilização dos invariantes depende das características das situações enfrentadas. Por essa razão, os resultados não são interpretados como uma sequência linear de substituição de uma "concepção corpuscular" por uma "concepção ondulatória", mas como diferentes configurações do conhecimento mobilizado diante das situações propostas.

5 CONSIDERAÇÕES

O estudo buscou identificar e analisar conceitos-em-ação e teoremas-em-ação relacionados ao comportamento da luz no experimento da dupla fenda, inferidos a partir das produções de estudantes da terceira série do Ensino Médio em diferentes momentos de uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula. No momento inicial, predominaram invariantes associados a representações retilíneas; nas atividades intermediárias, essas interpretações coexistiram com configurações híbridas e ondulatórias; e, no momento final, 31 das 35 respostas analisadas (88,57%) apresentaram C2/T4, compatível com uma interpretação da dupla fenda em termos de difração e interferência.

Essas diferenças devem ser interpretadas nos limites do delineamento. Como o número e a composição dos respondentes variaram e não foi realizada análise longitudinal pareada, os resultados não permitem reconstruir trajetórias individuais de mudança, permanência ou transição. Tampouco é possível atribuir as diferenças a uma atividade específica, pois o percurso articulou ondas, partículas, difração, interferência, história da natureza da luz, efeito fotoelétrico e dualidade onda-partícula sem isolar o efeito de cada componente. Além disso, a ausência de um grupo de comparação não permite separar as diferenças observadas de outros fatores concomitantes ao desenvolvimento da sequência, incluindo possíveis efeitos de maturação ou de outras experiências escolares ocorridas no período.

A pesquisa foi realizada em uma única escola e com uma única turma, não permitindo generalizações diretas para outros contextos. A primeira autora atuava simultaneamente como docente e pesquisadora, condição que favoreceu o acompanhamento contínuo das atividades, mas que também pode ter influenciado as interações e o processo interpretativo.

A identificação dos invariantes operatórios possui natureza inferencial. A categorização foi realizada pela pesquisadora em conjunto com seu orientador mediante discussão e consenso, sem codificação independente seguida do cálculo de índice de concordância. Além disso, as condições de produção das respostas não foram idênticas: o questionário inicial envolveu discussão em grupos seguida de registro individual; as situações intermediárias permitiram discussão em duplas; e o questionário final foi respondido individualmente. A reaplicação de uma questão conhecida pode ainda ter produzido algum efeito de familiaridade com o instrumento.

Apesar dessas limitações, a análise evidencia a utilidade da Teoria dos Campos Conceituais para explicitar conhecimentos que podem permanecer implícitos nas justificativas e representações dos estudantes. A TCC permite ultrapassar a simples identificação da terminologia científica empregada e examinar as regras de ação e proposições que sustentam as respostas.

No campo do Ensino de Física, a dupla fenda mostrou-se um contexto produtivo para explicitar diferentes maneiras de interpretar o comportamento da luz e discutir os limites de determinados esquemas em situações nas quais difração e interferência precisam ser consideradas.

Do ponto de vista didático, os resultados sugerem a pertinência de oferecer aos estudantes uma variedade de situações que lhes permita explicitar, confrontar e discutir os conhecimentos mobilizados. Mais do que apresentar a luz simplesmente como "onda" ou "partícula", torna-se relevante problematizar em quais condições determinados modelos, conceitos e representações são pertinentes para interpretar os fenômenos físicos.

Estudos futuros podem ampliar a investigação em diferentes contextos escolares, desenvolver análises longitudinais pareadas e incorporar procedimentos adicionais de validação das categorias interpretativas.

REFERÊNCIAS

AMORIM, R.; SANTOS, O.; CRUZ, A. R.; SANTOS, F. C. A inserção de conceitos de física moderna em sala de aula e as dificuldades encontradas por professores. **Scientific Electronic Archives**, v. 9, n. 1, p. 14-21, 2016. https://doi.org/10.36560/912016212.

BØE, M. V.; VIEFERS, S. Secondary and University Students' Descriptions of Quantum Uncertainty and the Wave Nature of Quantum Particles. **Science & Education**, v. 32, n. 2, p. 297-326, 2023. https://doi.org/10.1007/s11191-021-00297-w.

BROCKINGTON, J. G. de O. **A realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio. 2005.** 268 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CAMARGO, A. J. **A introdução da física moderna no 2º grau: obstáculos e possibilidades**. 1996. 218 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Disponível em: http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/76468. Acesso em: 25 ago. 2025.

CARVALHO, A. T. G.; PIMENTEL, R. F.; CARVALHO, R. S.; LABURÚ, C. A linguagem, a epistemologia e o ensino conceitual da dualidade onda-partícula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, e20220339, 2023. https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0339.

FANARO, M. de los A. **La enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media**. 2009. 265 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências) – Universidad de Burgos, Burgos, 2009. https://doi.org/10.36443/10259/109.

LIMA, N.; CAVALCANTI, C.; OSTERMANN, F. Concepções de dualidade onda-partícula: uma proposta didática construída a partir de trechos de fontes primárias da Teoria Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, e20200270, 2021. https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0270.

LIMA, N. W.; HEIDEMANN, L. A.; BECKER, M. H. T. É possível promover aprendizado sobre Mecânica Quântica em projetos de divulgação científica? Análise estatística sobre a potencialidade de um curso de extensão virtual. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, e20240062, 2024. https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0062.

MARTINS, R. A.; ROSA, P. S. **História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

MEDEIROS, A. Entrevista com Einstein: dos mistérios da Física Clássica ao nascimento da Teoria Quântica. **Física na Escola**, v. 6, n. 1, p. 88-94, 2005. Disponível em: https://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol06-Num1/entrevista1.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

MENELLI, W.; NASCIMENTO, J. O.; PASSAMAI JUNIOR, J. L.; PASSOS, C. A. C. Abordagem experimental para Ensino Médio sobre o princípio da dualidade onda-partícula da luz. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 18, n. 4, p. 683-701, 2023. Disponível em: https://www.fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/1338/1079. Acesso em: 24 ago. 2025.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. Dificuldades dos professores em introduzir a Física Moderna no Ensino Médio: a necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos. *In*: NARDI, R. (org.). **Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores**. São Paulo: Editora UNESP; Cultura Acadêmica, 2009. p. 145-159. Disponível em: https://books.scielo.org/id/g5q2h/pdf/nardi-9788579830044-10.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o Ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 7-29, 2002. Disponível em: https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/569. Acesso em: 24 ago. 2025.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007. https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000300016.

OSTERMANN, F. **Tópicos de Física Contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de Física**. 2000. 441 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/149956. Acesso em: 24 ago. 2025.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000. Disponível em: https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/600. Acesso em: 24 ago. 2025.

PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física. **Revista Electrónica de**

Enseñanza de las Ciencias, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009. Disponível em: https://reec.uvigo.es/volumenes/volumen08/ART5_Vol8_N1.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

PESSOA JR., O. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, p. 27-48, mar. 1997. Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19_27.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003. v. 1.

SILVA, V. M. S. **Inserção da dualidade onda-partícula no ensino médio por meio de abordagens histórica e experimental**. 2023. 82 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática - PPGECEM) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2023. Disponível em: https://repositorio.uepb.edu.br/handle/123456789/74069. Acesso em: 24 ago. 2025.

VERGNAUD, G. Cognitive and Developmental Psychology and Research in Mathematics Education: Some Theoretical and Methodological Issues. **For the Learning of Mathematics**, v. 3, n. 2, p. 31-41, nov. 1982. Disponível em: https://flm-journal.org/Articles/55FB50C29A82BFB73E20A186E102.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. In: **SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA DO RIO DE JANEIRO**, 1., 1993, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Projeto Fundão – Instituto de Matemática – UFRJ, 1993. p. 1-26.

VERGNAUD, G. Algunas ideas fundamentales de Piaget en torno a la didáctica. **Perspectivas: Revista Trimestral de Educación Comparada**, v. 26, n. 1, p. 195-207, mar. 1996.

VERGNAUD, G. Forme operatoire et forme predicative de la connaissance. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 17, n. 2, p. 287-304, 2012. Disponível em: https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/187. Acesso em: 24 ago. 2025.

ZANELLA, M. S. **Tarefas de modelagem matemática nos anos iniciais do Ensino Fundamental: um estudo com alunos alemães e brasileiros**. 2016. 273 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência e a Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

COMO CITAR - ABNT
CARVALHO, Bianca Cintra de; GOMES, Luciano Carvalhais. Invariantes operatórios sobre o comportamento da luz no experimento da dupla fenda. **Areté - Revista Amazônica de Ensino de Ciências**, Manaus, v. 26, n.40, *e*26006, jan./dez., 2026. https://doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v26.n40.3819

COMO CITAR - APA
Carvalho, B.C de; Gomes, L.C. (2026) Invariantes operatórios sobre o comportamento da luz no experimento da dupla fenda Areté - Revista Amazônica de Ensino de Ciências, *26*(40), *e*26006. https://doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v26.n40.3819

LICENÇA DE USO
Licenciado sob a Licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International* (CC BY-NC 4.0). Esta licença permite compartilhar, copiar, redistribuir o manuscrito em qualquer meio ou formato. Além disso, permite adaptar, remixar, transformar e construir sobre o material, desde que seja atribuído o devido crédito de autoria e publicação inicial neste periódico.

HISTÓRICO
Submetido: 12 de janeiro de 2025.
Aprovado: 15 de dezembro de 2025.
Publicado: 25 de fevereiro de 2026.