

## **O USO DO INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER PARA PROMOVER ARGUMENTAÇÃO NO DISCURSO DE ALUNOS DO ENSINO MÉDIO.**

**Nelson Barrelo Junior<sup>1</sup>, Anna Maria Pessoa de Carvalho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>USP/Faculdade de Educação/Lapef, [nbarrelo@usp.br](mailto:nbarrelo@usp.br)

<sup>2</sup>USP/Faculdade de Educação/Lapef, [ampdcarv@usp.br](mailto:ampdcarv@usp.br)

### **Resumo**

*Este artigo apresenta parte de uma pesquisa sobre como se desenvolve o processo argumentativo dos alunos sobre o conceito de fóton e interpretações da Mecânica Quântica (MQ) para a natureza da luz. Fizemos revisão da literatura sobre a importância da inserção de Física Moderna e Contemporânea (FMC) na escola média, das abordagens da MQ quanto à natureza da luz, e das bases teóricas que alicerçam a análise da argumentação em sala de aula. Transcrevemos falas e gestos de quatro aulas, de turmas do terceiro ano do ensino médio de escola pública, de uma sequência de ensino que objetivava investigar a natureza e o comportamento da luz, utilizando o experimento de Mach-Zehnder. Foram analisadas as aulas que sistematizavam as discussões e os registros escritos finais dos alunos. Os dados possibilitaram verificar a ocorrência de indicadores de alfabetização científica, a estrutura do discurso oral dos alunos e apropriação de conceitos de FMC.*

**Palavras-chave:** Ensino e aprendizagem; Física; Argumentação em sala de aula; Física moderna e contemporânea.

### **Introdução**

Nossa pesquisa partirá da proposta apresentada por Brockington (2005) – a discussão da dualidade onda-partícula – cujo curso elaborado compõe-se de aproximadamente 52 aulas, divididas em onze temas designados blocos de conteúdo, a serem ministrados ao longo de um ano letivo, iniciando-se na abordagem do uso dos modelos no cotidiano e na física e concluindo com uma análise e discussão da dualidade onda-partícula. O curso tem sido aplicado desde 2004 por professores da rede pública estadual interessados na inclusão de Física Moderna e Contemporânea no Currículo Escolar que participam de um grupo de pesquisa junto ao Laboratório de Pesquisa e Ensino de Física (Lapef) da Faculdade de Educação da USP.

Propusemos uma alteração do décimo bloco desta sequência, com a inclusão da montagem e exploração de um interferômetro de Mach-Zehnder e do uso de uma simulação de computador, em substituição de uma encenação teatral que visa uma analogia pessoa-fóton.

Esta pesquisa objetiva identificar como ocorre a argumentação dos alunos sobre o conceito de fóton durante um conjunto de atividades de laboratório de investigação, com a construção e exploração de um interferômetro e com outras de experimentação de pensamento e, também, verificar se, durante essas atividades, os alunos se apropriam das interpretações da Mecânica Quântica sobre a natureza e o comportamento da luz. Os referenciais teóricos que embasam tal pesquisa devem versar sobre Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio, a natureza

e o comportamento da luz e, finalmente, a argumentação em sala de aula e o discurso dos estudantes como forma de verificação de aprendizagem.

### **Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**

Diversos autores têm apontado para a necessidade de inserção de FMC no currículo de Física da escola média.

Os *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio* (PCNEM) afirmam que

as novas tecnologias de comunicação e da informação permeiam o cotidiano independente do espaço físico, e criam necessidades de vida e convivência que precisam ser analisadas no espaço escolar. A televisão, o rádio, a informática, entre outras, fizeram com que os homens se aproximassem por imagens e sons de mundos antes inimagináveis. (BRASIL, 1999, p. 132).

Enquanto no PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+), tais ideias são reforçadas e delineiam-se os caminhos a serem seguidos no ensino de Física:

A presença do conhecimento de Física na escola média ganhou um novo sentido a partir das diretrizes apresentadas nos PCNEM. Trata-se de construir uma visão da Física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. (BRASIL, 2002, p. 1).

Também Gil-Pérez et al. (1988), Gil-Pérez, Senent e Solbes (1987), Barojas (1988), Gil e Solbes (1993) e Cuppari et al. (1997) já apontavam a necessidade de uma atualização curricular que incorporasse o conhecimento de Física Moderna e Contemporânea (FMC).

Diversos outros autores – como Ostermann e Moreira (2000); Borckington (2005); Karam, Cruz e Coimbra (2007); etc. – sinalizam neste sentido e analisam os tópicos de Física Moderna abordados nas aulas e nos livros dedicados à escola de ensino médio. Muitos trabalhos se debruçam sobre a proposição de sequências didáticas de temas de Física Moderna.

Ostermann e Moreira (2000) apresentam uma extensa revisão da literatura sobre “Física Moderna e Contemporânea no ensino médio”, em que consultam artigos em revistas, livros didáticos, dissertações, teses, projetos e navegações pela internet que abordam o tema.

Valadares e Moreira (1998) trazem sugestões de como promover a inserção de tópicos de Física Moderna que se relacionem com o cotidiano dos alunos. Priorizam experimentos de baixo custo e ensejam a compreensão de princípios que fundamentam tecnologias atuais. Nesse trabalho, os autores consideram o efeito fotoelétrico, o laser e a emissão de corpo negro para enfoque.

### **O interferômetro de Mach-Zehnder**

Para estudarmos interferência de radiação – seja luz, elétrons ou nêutrons –, podemos utilizar o experimento de dupla fenda. No entanto, este arranjo apresenta desvantagens para um enunciado quantitativo, pois a “partícula” pode apresentar-se em muitos pontos no plano de observação, tornando complicada a descrição matemática do fenômeno. Por isso, é mais apropriado o uso de um interferômetro que, de modo geral, é um dispositivo para medir superposição de ondas,

interferência, com bastante precisão. Nessas montagens, a luz pode tomar, no mínimo, dois caminhos diferentes e as ondas que chegam por esses dois caminhos são sobrepostas, ocorrendo as interferências – destrutiva ou construtiva.

O arranjo experimental desenvolvido, em 1896, pelo físico tcheco Ludwig Mach e pelo físico suíço Ludwig Zehnder, de maneira independente, tem sua estrutura bastante simples, como mostram as figuras. São necessários quatro espelhos, dos quais dois refletem toda a luz incidente sobre eles e dois, denominados “semiespelhos” ou “semirrefletores”, refletem exatamente a metade da luz que incide sobre eles, deixando a outra metade atravessá-los, como mostra a figura 1:

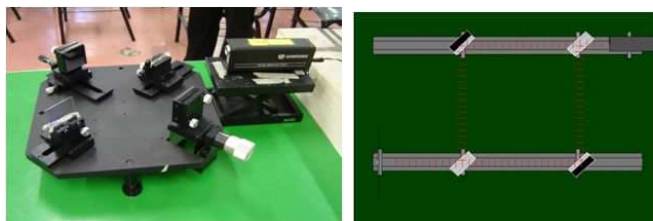


FIGURA 1 – a) Interferômetro real clássico; e b) Representação do MZ, composto por uma fonte, dois semiespelhos e dois espelhos.

Em nossa pesquisa, utilizamos as quatro interpretações para as observações no interferômetro de Mach-Zehnder, propostas por Montenegro e Pessoa Jr (2003), que podem ser resumidas da seguinte maneira (Quadro 1):

	Interpretação
<b>1. Ondulatória</b>	O fóton se divide em dois “meio-fótons” no primeiro semiespelho do interferômetro. Os dois “meio-fótons” se recombinam no segundo semiespelho, assim como as ondas, produzindo o padrão de interferência observado na saída do interferômetro.
<b>2. Corpuscular</b>	O fóton é uma partícula e nunca se divide. Assim, um fóton segue um único caminho, bem determinado, no interior do interferômetro. No semiespelho o fóton pode ser refletido ou transmitido com a mesma probabilidade.
<b>3. Dualista realista</b>	O fóton é composto de duas partes: uma partícula e uma onda associada. Assim, a partícula é como um “surfista” viajando sobre a onda e só pode estar onde existe onda. A onda pode se dividir e se recombinar nos semiespelhos, produzindo interferência. Com isso, após o registro de muitos fótons, o padrão de interferência pode ser observado na saída do interferômetro.
<b>4. Complementaridade</b>	O fóton se manifesta ora como onda, ora como partícula, mas nunca como onda e partícula ao mesmo tempo. O arranjo experimental é que determina a “cara” do fóton. Se observarmos o padrão de interferência, interpretamos o fóton como onda. Se pudermos determinar o caminho seguido pelo fóton no interior do interferômetro, dizemos que o fóton se comporta como partícula.

Quadro 1 – Interpretações da Mecânica Quântica na experiência com interferômetro de Mach-Zehnder.

### A argumentação em sala de aula

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) apregoam que a escola é um dos poucos lugares em que os alunos têm a possibilidade de contato com o conhecimento físico formal e de compreensão do mundo (BRASIL, 1999). Assim, torna-se mais relevante o aprendizado de conhecimentos científicos pelos alunos de modo que possam expressar suas opiniões e ter uma visão mais crítica e atuante no mundo.

Segundo Sasseron e Carvalho (2008a),

apesar da grande importância da ciência em nossa cultura, e sendo o objetivo da escola básica a formação de cidadãos que possam interagir com o mundo em que vivem, a ciência que é apresentada nas escolas não reflete nenhum dos aspectos da ciência como desenvolvimento humano, muito ao contrário a tradição do ensino científico, quer no curso fundamental, quer no médio, obriga os alunos a memorizar *os conhecimentos já comprovados*, que não são usados nem nas próprias classes de ciências. Essa dicotomia entre o que é ciência e como ela está sendo ensinada, desde os primeiros anos do ensino fundamental até o final do curso médio, tem levado os pesquisadores em ensino de Ciência, assim como os planejadores de currículo, a uma reflexão do processo de alfabetização, ou enculturação, científica, tecnológica e ambiental, apontada na literatura atual como condição fundamental para que os indivíduos participem de forma crítica e consciente na sociedade contemporânea.

As autoras reiteram essa relevância dada à ciência em nossa sociedade, embora tal importância não se traduza na forma como ela é ensinada.

O conceito de 'enculturação científica', apresentado por Driver e Newton (1997), se faz presente somente quando o aluno consegue compreender e utilizar parte da linguagem, dos métodos e das práticas da cultura científica que, com a cultura que já possui, criam novas visões de mundo e ampliam as que já possuíam, ou seja, quando ele consegue se apropriar da cultura científica (DRIVER; NEWTON; OSBORNE, 1999; MORTIMER; MACHADO, 1996; CAPECCHI; CARVALHO, 2000; CAPECCHI; CARVALHO; SILVA, 2002; CAPECCHI, 2004; CARMO, 2006).

Mortimer (1994 apud CARMO, 2006) propõe que o ensino de ciências leve o aluno a adquirir novos conhecimentos e cultura sem eliminar os que já possuía e, a partir dessa nova situação, saber utilizar o que for mais adequado de acordo com o contexto.

Lemke (1998a, 1998b) ressalta, como característica do aprendizado de ciências, a apropriação, pelo aluno, do discurso científico. A utilização apropriada da linguagem da ciência, de acordo com o contexto, indica um crescimento em relação a seu discurso anterior em vez da simples substituição.

Para Sasseron e Carvalho (2008a), a linguagem argumentativa é uma das principais características do processo de construção de Ciências. Recorrem a estudos apresentados por Latour e Woolgar (1997) e a Latour (2000), que apontam a presença da linguagem argumentativa tanto em laboratórios quanto durante a apresentação de trabalhos, sejam em congressos ou em artigos publicados. Segundo estes últimos, é através da argumentação que os cientistas convencem os outros sobre a importância de seus trabalhos, a verdade do que dizem e a necessidade de investimentos no financiamento de seus projetos.

Essa capacidade de argumentação segue um padrão estudado por Toulmin (1958/2006), onde descreveu a argumentação na prática. Este autor apresenta a estrutura básica que compõe a argumentação e quais são as relações que existem entre seus componentes, enquanto Rivard e Straw (2000) obtêm conclusões precisas sobre o efeito que a escrita e a fala podem trazer à aprendizagem:

A fala é importante para compartilhar, clarificar e partilhar idéias científicas entre os pares enquanto fazem questões, levantam hipóteses, explicam e formulam idéias; juntos, todos parecem ser importantes mecanismos durante as discussões. O uso da escrita parece ser importante para refinar e consolidar estas novas idéias com os conhecimentos prévios. Estas duas modalidades parecem ser dialéticas: a fala é social, divergente e produtiva, enquanto a escrita é pessoal, convergente e reflexiva. Além disso, a escrita parece aumentar a fixação do conhecimento co-construído ao longo do tempo. (p. 588 apud SASSERON, 2008, p. 49).

Jiménez-Aleixandre e Diaz de Bustamante (2003) afirmam que o discurso dos alunos nas aulas de ciências contribui para uma compreensão mais geral dos processos de aprendizagem das ciências. Nesse trabalho, os pesquisadores apresentam alguns resultados obtidos com a aplicação de um projeto de Ciências chamado RODA (Raciocínio, Discussão e Argumentação), e a ênfase na análise dos dados recai sobre a argumentação.

Os autores analisam os argumentos utilizados em sala de aula, tanto por seu conteúdo quanto por sua estrutura, e, uma vez que muitos dos temas científicos analisados neste trabalho não são inéditos para os alunos, sua atenção recai sobre o modo como se apresentam as justificativas sob o ponto de vista dos estudantes.

O modelo de Toulmin (2006), já citado, tem sido adaptado e vem sendo amplamente utilizado em estudos na área de pesquisa em Educação, apresentando-se como um importante e eficiente instrumento de análise na investigação sobre a argumentação dos alunos em aulas e situações de ensino de Ciências.

Driver e Newton (1997), Jiménez-Aleixandre, Reigosa Castro, Álvarez-Pérez (1998), Capecchi e Carvalho (2000), Capecchi, Carvalho e Silva (2002), Villani e Nascimento (2003), Capecchi (2004), Carmo (2006) e muitos outros pesquisadores têm se valido desse modelo de Toulmin em seus trabalhos e investigações, de forma a contribuir significativamente para sua consolidação como um importante instrumento de análise adaptado a diversas situações de ensino.

Finalmente, Sasseron (2008) sugere em sua pesquisa a existência de convergência entre as diversas classificações propostas pelos autores mencionados. Agrupa as habilidades listadas por eles em três blocos e os denomina de *Eixos Estruturantes da Alfabetização Científica*.

Nesta pesquisa, *na identificação da argumentação dos alunos*, consideraremos os indicadores apresentados por Sasseron (2008), abaixo:

<b>Indicador</b>	<b>Explicação</b>
<b>Seriação de informações</b>	Lista ou relação de dados não necessariamente ordenados.
<b>Organização de informações</b>	Ocorre quando as informações são arrançadas.
<b>Classificação das informações</b>	Caracteriza-se pela ordenação dos elementos trabalhados e ocorre quando se busca o estabelecimento de características para os dados.
<b>Levantamento de hipóteses</b>	Suposições acerca de um tema.
<b>Teste de hipóteses</b>	Colocação à prova das suposições anteriormente levantadas.
<b>Justificativa</b>	Garantia para uma afirmação/proposição proferida.
<b>Previsão</b>	Associação de acontecimento para predição de uma ação e/ou fenômeno.
<b>Explicação</b>	Relacionamento entre informações e hipóteses já levantadas. Normalmente acompanhada de justificativa e previsão.

**Quadro 2 – Indicadores propostos por Sasseron (2008).**

### **A sequência didática**

A sequência de ensino tem como base aquela proposta por Brockington (2005) em sua dissertação de mestrado. São promovidas alterações surgidas das discussões no grupo de professores, em 2006, e foi desenvolvida em parceria com a

Dra. Maria Beatriz Fagundes, que, na época, desenvolvia um projeto de pesquisa de pós-doutorado na FEUSP.

A sequência, descrita em Barrelo (2010), permite ao professor optar pela realização completa, ou não, de todos os episódios temáticos, a fim de ajustar seu cronograma de aulas ao calendário escolar, iniciando-se com a leitura e a discussão do texto que confronta a teoria ondulatória e a corpuscular da luz. A atividade 2 apresenta de forma expositiva (apresentação em multimídia) o interferômetro de Mach-Zehnder (MZ), retoma a analogia da aula anterior e a relaciona com o MZ. Mostra as interpretações para um só fóton, bem como as limitações de cada uma delas para explicar os resultados experimentais. A atividade 3 parte da leitura e discussão do texto sobre dualidade onda-partícula, e, em seguida, pede-se aos alunos que respondam às questões. Espera-se que os alunos percebam que não existe uma resposta certa, mas que é necessária uma argumentação que justifique sua escolha. As aulas 5 e 6 da sequência didática são dedicadas à manipulação do interferômetro e ao uso da simulação de computador.

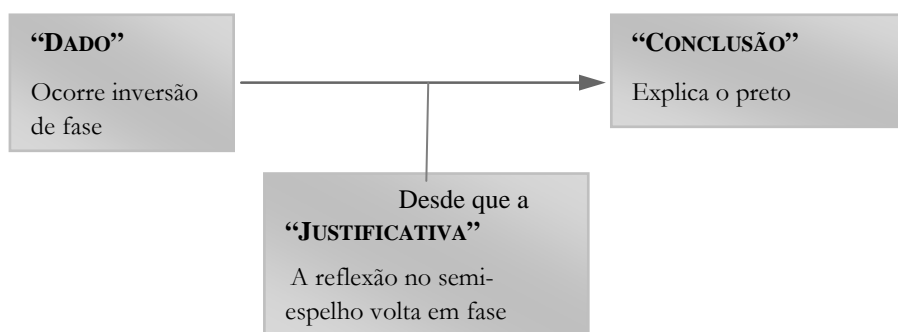
### As argumentações dos alunos

Foram feitas as transcrições de todas as aulas gravadas das duas turmas. Os registros escritos dos alunos estão catalogados. A pesquisa completa encontra-se em Barrelo (2010). Neste artigo, evidenciaremos alguns aspectos relevantes dos registros orais e escritos dos alunos. Procuraremos mostrar como os alunos estruturam seus argumentos, retomando, para isso, os referenciais teóricos citados anteriormente. Enfatizaremos a forma como os argumentos são explicitados (TOULMIN, 2006; LAWSON, 2000, 2002). Também verificaremos as operações epistemológicas envolvidas para a apresentação dos argumentos, como proposto por Jiménez-Aleixandre, Bugallo Rodrigues e Duschl (2000), e a ocorrência dos indicadores de alfabetização científica sugeridos por Sasseron (2008) e Sasseron e Carvalho (2008c).

O professor inicia a aula retomando a anterior e, em seguida, projeta na parede as imagens de interferência obtidas pelo interferômetro real e na simulação. Encontramos, entre os turnos 04 e 18, apenas respostas simples, de afirmação ou negação, sem justificativa, classificando-as como argumentações de nível 0, conforme Driver e Newton (1997).

turno	Falas transcritas	Indicadores AC / Breve Análise
33	Bruna: (09:00) O que você tá falando é a explicação do preto, é isso?	
35	Bruna: Tem inversão de fase, porque a parte que reflete no semiespelho tá ...	
37	Bruna: numa fase diferente da que parte que passou direto	Explicação O.E.: plausibilidade

Nos turnos 33, 35 e 37, percebe-se que a aluna Bruna consegue dar uma **explicação** para o que deve ocorrer – tem inversão porque as fases são diferentes. Sua argumentação é de nível 4, com uso do operador epistemológico **plausibilidade**, porque integra a fala anterior do professor à observação e acrescenta uma justificativa para o fenômeno. Pelo padrão proposto por Toulmin, sua fala pode ser assim estruturada (Figura 2):



Entre os turnos 055 e 066 os alunos são inquiridos a comparar duas imagens distintas. Na primeira, forma-se a figura padrão de interferência, e, na segunda, tem-se uma mancha circular formada por pontinhos. O professor solicita a uma aluna que faça a comparação entre as duas imagens apresentadas e se há relação entre elas.

Destacamos as falas do aluno Lucas, nos turnos 064 e 066:

TURNO	FALAS TRANSCRITAS	INDICADORES AC / BREVE ANÁLISE
064	Lucas: Então, nos primeiros círculos as duas se encontram, os dois raios estão juntos (12:37)	Explicação O.E.: plausibilidade
065	Professor: Pessoal!	
066	Lucas: Enquanto que na outra figura como tem um detector ele impede a passagem de um dos caminhos de chegar no anteparo, então só tem um caminho que o fóton pode passar. Por isso, ele não forma a figura. (12:52)	Explicação O.E. plausibilidade

Suas afirmações também indicam uma **explicação** – na primeira imagem, os dois raios (de luz) se encontram e formam a figura padrão de interferência, enquanto na segunda não se forma porque o fóton tem apenas um caminho para passar.

Sua argumentação é de nível 3, pois são afirmações apoiadas por justificativas:

“[Se] *tem dois caminhos*, [então] *os raios se encontram e*, [portanto], *formam a figura padrão.*”

“[Se] *um detector impede a passagem do fóton*, [então] *apenas um caminho é fornecido*, [portanto] *não forma a figura.*”

No turno 99, o professor solicita aos alunos que reparem em suas fichas de anotação, nas quatro possíveis interpretações quanto à natureza da luz. E aula, até o seu final, transcorre com a discussão sobre estas.

Entre os turnos 100 e 135, o professor vai apresentando aos alunos o nome das interpretações e solicita aos mesmos que associem a esse nome a característica da luz.

Para os alunos Vitor e Beatriz, conforme os turnos 140, 142, 144, 146 e 147, a **explicação** para a interpretação da Complementaridade sobre a natureza da luz “*depende de como se olha para ela*” (turno 144).

TURNO	FALAS TRANSCRITAS	INDICADORES AC / BREVE ANÁLISE
140	Vitor: Tipo... (21:06) microscopicamente é uma partícula, macroscopicamente ela é uma onda	Explicação
141	Professor: Ta. Segundo o Vitor, se a gente olhar lá no	

	microscópio... Microscópio não, se olhar no mundo dos micro, né? Se for pensar nela lá, enquanto natureza mesmo, na sua formação ela é?	
142	Vitor: Partícula.	
143	Professor: Partícula. Mas se a gente observar de fora, no macroscópico, é isso? Aí ela é onda. Pode ser isso?	
144	Beatriz: 21:48 depende de como se olha.	
145	Professor: Pra você isso é complementaridade?	
146	Beatriz: É?	
147	Vitor: Sim.	

A aluna Bruna discorda e afirma no turno 150:

TURNOS	FALA TRANSCRITA	INDICADOR AC / BREVE ANÁLISE
150	Bruna: Porque aí ela ta sendo duas coisas ao mesmo tempo. Complementaridade é quando ela ta sendo ora uma coisa ora outra.	Explicação

Ela mostra entendimento dos conceitos até então estudados e apresenta uma **explicação** para não concordar com os colegas.

Pelo padrão de Toulmin, a fala da aluna pode ser assim estruturada:

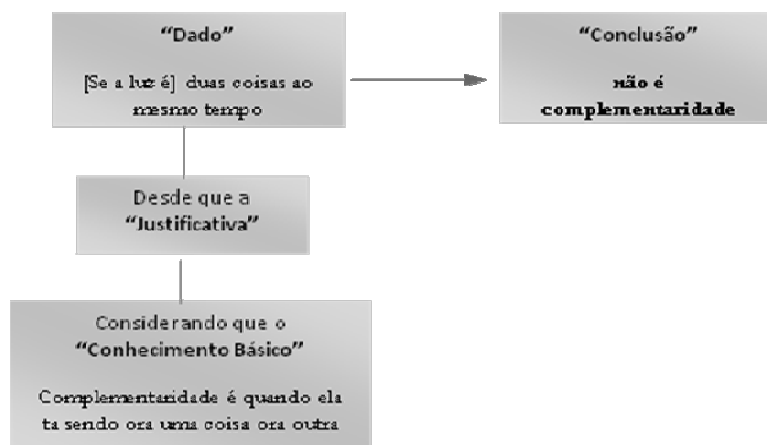


Figura 3: Padrão de Toulmin para a fala da aluna Bruna

E Bruna reforça sua **explicação** no turno 152:

TURNOS	FALA TRANSCRITA	INDICADOR AC / BREVE ANÁLISE
152	Bruna: Não. Porque o que eu to falando... No micro... Olha, no mesmo momento quando você analisa no micro ela é partícula e no macro ela é onda. Você ta pensando no mesmo momento, então na mesma coisa ela ta sendo duas coisas ao mesmo tempo, no mesmo momento ela ta sendo duas coisas ao mesmo tempo. Mas pra ser complementar no momento "x" ela ta sendo uma coisa e no momento "y" ela ta sendo outra, entendeu?	Explicação

Foram coletados diversos registros escritos dos alunos ao longo do curso.

Segundo Pessoa Junior (2003), "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. Esta é uma versão 'geral' da dualidade onda-partícula", que, procuramos evidenciar se os alunos concebem essa percepção da dualidade. Nossa análise se restringirá ao questionário abaixo (Quadro 3) aplicado às turmas na última aula.

1- Preencha o quadro, sistematizando as quatro interpretações para a natureza da luz:				
	Ondulatória	Corpuscular	Complementaridade	Dualista-realista
A luz é...				
Explicação da experiência do interferômetro				

**Quadro 3** – Questionário de sistematização – aula 11.

A Tabela 3 sintetiza as respostas promovidas pelos estudantes:

1.a – “ A luz é...”	N. de alunos	Percentual da turma
Todas as respostas corretas (A)	09	30
Todas as respostas parcialmente corretas (B)	0	0
Todas as respostas incorretas (C)	0	0
Somente respostas corretas (A) ou parcialmente corretas (B)	15	50
Somente respostas corretas (A) ou incorretas (C)	03	10
Somente respostas parcialmente correta (B) ou incorreta (C)	0	0
Respostas corretas (A), parcialmente corretas (B) e incorretas (C)	03	10
Total de alunos	30	100

**Tabela 3** – Síntese das respostas para as interpretações da MQ sobre a natureza da luz.

Foram feitas análise de cada uma das questões. Posteriormente, comparamos os registros escritos com as falas dos alunos que participaram ativamente das discussões orais.

Ao analisamos as falas dos alunos na aula 10 ,verificamos a participação efetiva de oito alunos da turma nas discussões orais.

Como exemplo, podemos citar que o aluno André, também responde de forma satisfatória às questões e suas falas se concentraram no início da aula (turnos 10 a 15), onde tenta classificar as informações sobre as imagens obtidas no experimento.

É interessante notar que sua fala foi complementada pela aluna Bruna (a partir do turno 17) e as melhores respostas escritas de André referem-se às questões que remetem a esse episódio da aula.

Bruna é a estudante com maior articulação na aula 10. Participou de maneira eficaz dos debates, auxilia e contesta nas falas dos colegas e demonstra bom entendimento das questões suscitadas. Sua escrita é condizente com suas locuções e consegue produzir registros corretos e bem elaborados.

## Considerações finais

Nesta pesquisa, procuramos identificar como ocorre a argumentação dos alunos sobre o conceito de fóton durante a aplicação de um conjunto de atividades experimentais investigativas, envolvendo a montagem e exploração de um interferômetro, e o uso de uma simulação de computador. Este trabalho objetivou também verificar se os alunos se apropriaram das interpretações da Mecânica Quântica sobre a natureza e o comportamento da luz.

A substituição de uma analogia pela montagem e manipulação do experimento de Mach-Zehnder e a posterior utilização de uma simulação de computador possibilitaram aos alunos a compreensão das dificuldades em se enquadrar a luz segundo os modelos clássicos de onda e partícula.

A sequência das aulas, com laboratório de investigação, análise e discussão das observações, criou condições para enculturação científica, como apontam as análises dos discursos dos estudantes.

A análise demonstra que as interações discursivas entre os alunos, e sua mediação pelo professor, possibilitam que os mesmos tornem-se mais críticos, participativos e aproximem-se das discussões da ciência moderna.

Os indicadores de alfabetização científica e a estrutura de argumento presentes nas falas dos alunos corroboram para essa afirmação. Cerca de 30% dos alunos participou ativamente das discussões em sala. Na análise de suas alocações percebe-se a incidência desses indicadores.

A análise da aula 10 mostrou que as falas dos estudantes, inicialmente monossilábicas, foram se aprimorando e transformando em estruturas melhor elaboradas à medida que o debate se instalou em sala. Também os indicadores de alfabetização científica fizeram-se mais presentes nessas condições.

Apesar de os tópicos apresentados serem habitualmente pensados para estudantes de graduação em Física, nossa pesquisa revela um alto índice de compreensão dos estudantes. Para as questões relativas às interpretações da Mecânica Quântica sobre a natureza da luz, cerca de 80% da classe apresenta respostas corretas ou parcialmente corretas.

A explicação para a experiência do interferômetro é dada de forma satisfatória por 70% dos alunos. Nossos dados indicam que, a despeito deste entendimento, para muitos estudantes o fenômeno da interferência é corpuscular.

Fazendo a verificação entre os registros escritos e as falas daqueles que mais discorrem em sala de aula, podemos afirmar que a participação nas discussões é fator contribuinte para o aprendizado e o entendimento dos conceitos. Todos os alunos que participaram efetivamente dos debates em sala apresentaram registros escritos com percentual elevado de acertos das questões. Não se pode afirmar que a não participação efetiva nas discussões impossibilite ou dificulte tal juízo. Mesmos os alunos que pouco, ou nada, disseram nas aulas analisadas, em sua maioria, obtiveram resultados bastante satisfatórios.

A análise das aulas e dos registros escritos nos permite afirmar que a proposta de ensino foi validada e contribui sobremaneira para a inserção de tópicos de FMC no ensino médio, tornando a Física mais atraente para os jovens estudantes e os aproxima do conhecimento científico por trás das inovações tecnológicas.

Ressaltamos que a sequência de ensino embute uma visão de que não existe apenas uma verdade científica. A discussão das quatro interpretações sobre a natureza e o comportamento da luz e a indagação aos alunos sobre o porquê de tantas teorias (questão 2 do registro escrito) visam levar o aluno a compreender que são possíveis várias interpretações para um mesmo fenômeno.

### Referências

- BAROJAS, J. (Ed.). *Cooperative networks in physics education*. New York: American Institute of Physics, 1988. (AIP Conference Proceedings, 173).
- BARRELO JUNIOR, N. *Argumentação no discurso oral e escrito de alunos do ensino médio em uma sequência didática de Física Moderna*. 2010. 176 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Educação – Universidade de São Paulo, 2010.
- BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio*. Brasília: Ministério da Educação, 1999.
- \_\_\_\_\_. Ministério da Educação e Cultura. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais + ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. linguagens códigos e sua tecnologias*. Brasília: MEC, 2002.
- BROCKINGTON, G. *A realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio*. 2005. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CAPECCHI, M. C. V. M.; CARVALHO, A. M. P. Argumentação em uma aula de conhecimento físico com crianças na faixa de oito a dez anos. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 2, p. 171-189, 2000.
- CARVALHO, A. M. P.; SASSERON, L. H. *As diversas linguagens do ensino de ciências*. São Paulo: no prelo, 2010.
- CARVALHO, A. M. P.; VANNUCCHI, A. O currículo de física: inovações e tendências nos anos noventa. *Investigações em ensino de ciências*, Instituto de Física, UFRGS, v. 1, n. 1, p. 3-19, 1996. Disponível em: <http://www.cienciamao.if.usp.br/tudo/exibir.php?midia=ienci&cod=ocurrículodefisicainovac>. Acesso em: 05 fev. 2009.
- CUPPARI, A. et al. Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. *Physics Education*, Bristol, v. 32, n. 5, p. 302-308, Sept. 1997.
- DRIVER, R.; NEWTON, P. Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. In: ESERA Conference, Roma, 1997. *Anais...* Roma: ESERA, 1997.
- DRIVER, R.; NEWTON, P.; OSBORNE, J. The place of argumentation in the pedagogy of school science. *International Journal of Science Education*, v. 21, n. 5, p. 556-576, 1999.
- GIL-PÉREZ, D. et al. La resolución de problemas de lápiz y papel: como actividad de investigación. *Investigación en la Escuela*, n. 3, p. 3-19, 1988.

- GIL-PÉREZ, D.; SENENT, F.; SOLBES, J. La introducción a la física moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, n. extra, p. 209-210, set. 1987.
- GIL-PÉREZ, D.; SOLBES, J. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journey of Science Education*, London, v. 15, n. 3, p. 255-260, 1993.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M. P.; DÍAZ DE BUSTAMANTE, J. Discurso de aula y argumentación en la clase de ciencias: cuestiones teóricas y metodológicas. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 21, n. 3, p. 359-370, 2003.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M. P.; BUGALLO RODRÍGUEZ, A.; DUSCHL, R. A. Doing the lesson or doing science: argument in high school genetics. *Science Education*, v. 84, p. 757-792, 2000.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M. P.; REIGOSA CASTRO, C.; ÁLVAREZ-PÉREZ, V. Argumentación en el laboratorio de física. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 6., 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: EPEF, 1998.
- KARAM, R. A. S.; CRUZ, S. M. S. C.; COIMBRA, D. Relatividades no ensino médio: o debate em sala de aula. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 105-114, 2007.
- MONTENEGRO, R. L.; PESSOA JR, O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. *Investigações em ensino de ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 107-126, 2002.
- NASCIMENTO, S. S.; VIEIRA, R. D. Contribuições e limites do padrão de argumento de Toulmin aplicado em situações argumentativas de sala de aula de ciências. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Porto Alegre, v. 8, n. 2, 2008 [On-line].
- 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 [On-line].
- 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*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, 2000. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5\\_n1\\_a2.htm](http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5_n1_a2.htm)>. Acesso em: 20 jun. 2008.
- PESSOA JR., O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- SASSERON, L. H. *Alfabetização científica no ensino fundamental: estrutura e indicadores deste processo em sala de aula*. 2008. Tese (Doutorado) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- TOULMIN, S. E. *Os usos do argumento*. 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2006.