

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA ATIVA PARA O ENSINO DA DUALIDADE ONDA PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO

Marina Valentim Barros

Doutora em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo/USP. Professora da Universidade Federal de Catalão/UFCAT/Unidade Acadêmica Especial de Educação/UAEE. E-mail: marinote@ufcat.edu.br

Marcelo Alves Barros

Doutor em Educação pela Universidade de São Paulo/USP. Professor do Instituto de Física da USP de São Carlos/IFSC. E-mail: mbarros@ifsc.usp.br

Resumo: O trabalho a seguir apresenta uma discussão sobre a implementação de uma metodologia ativa, o *Peer Instruction*, como estratégia instrucional em sala de aula para promover a aprendizagem do conceito de onda partícula no Ensino Médio, utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder. A metodologia do *peer instruction* consiste em apresentar questões conceituais sobre o assunto da aula contando com duas votações dos estudantes, uma individual e outra após a interação entre os pares, em que se discute entre os colegas o assunto do teste. A pesquisa apresenta o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder assim como detalhes da sequência didática aplicada. São mostrados também no trabalho, o resultado estatístico dos testes aplicados, com a porcentagem de respostas antes e após a instrução por pares. Sugere-se o *Peer Instruction* como uma alternativa metodológica para o ensino de tópicos de Física Quântica no Ensino Médio, dando espaço a uma discussão conceitual da matéria, permitindo uma melhor compreensão sobre o tema.

Palavras-chave: Ensino de Física Quântica; Metodologia Ativa; *Peer Instruction*.

TEACHING WAVE-PARTICLE DUALITY BY AN IMPLEMENTATION OF AN ACTIVE METHODOLOGY

Abstract: The following work presents the implementation of an active methodology, the peer instruction, as an instructional strategy in the classroom to promote the learning of the wave-particle concepts using the Mach-Zehnder interferometer among high school students. The methodology of the peer instruction consists of presenting conceptual questions on the subject of the class with two votes from the students, one individual and the other after the interaction between peers, in which the subject of the test is discussed among colleagues. The research presents the functioning of the Mach-Zehnder interferometer as well as details of the applied didactic sequence. Also shown in the work are the statistical results of the applied tests, with the percentage of responses before and after instruction by peers. Peer instruction is

suggested as a methodological alternative for teaching quantum at the secondary level, giving rise to a conceptual discussion of quantum among peers, allowing a better understanding of the topic.

Keywords: Teaching Quantum Physics, Active Methodology, Peer Instruction.

INTRODUÇÃO

Desde as décadas finais do século XX e ao longo deste início do século XXI, o Brasil e vários outros países têm orientado seus currículos no desenvolvimento de habilidades e competências. Nessas situações, as escolas e os professores têm sido solicitados a modificar aquilo que normalmente fazem atualizando suas práticas de ensino. Possibilitar também que o cidadão comum tenha compreensão de novas tecnologias é tarefa da escola e, principalmente, do Ensino Médio, já que na realidade brasileira é o último contato acadêmico da maior parte da população com os conteúdos científicos relacionados à Física. Mesmo os estudantes que terão acesso ao ensino superior, somente uma parte deles se dedicará a uma formação científica e tecnológica, reforçando ainda mais a importância desses conteúdos serem apresentados na formação dos estudantes (HADZIDAKI; KALKANIS; STAVROU, 2000; SALES *et al.*, 2008).

Apesar dos avanços e impactos da Ciência dos séculos XX e XXI em nossas vidas podemos afirmar que o currículo de Física tem-se mantido praticamente inalterado em relação à introdução de temas atuais, apesar das inúmeras tentativas de aproximação de conteúdos inovadores para a sala de aula. Entre os diversos temas de importância necessários para transformar o ensino de Física tradicionalmente oferecido por nossas escolas em um ensino que contemple o desenvolvimento da Física Moderna e Contemporânea destacamos a Mecânica Quântica, pois atualmente é considerada uma teoria fundamental na compreensão de uma variedade de fenômenos que têm grande utilidade na tecnologia moderna e com inúmeras aplicações no cotidiano das pessoas (GRECA; FREIRE JÚNIOR, 2003; GRECA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2001; MORAIS; GUERRA, 2013; POSPIECH, 2003; SALES *et al.*, 2008).

No Brasil, um movimento de reforma curricular nacional tem apontado a necessidade da promoção de uma educação compatível com a rápida aceleração da produção do

conhecimento científico e da compreensão das novas tecnologias da informação que influenciam os modos de produção da sociedade. Os *PCNEN* (BRASIL, 1999), os *PCNEM+* (BRASIL, 2002) e a *BNCC* (2018) foram consequência desse movimento por mudanças curriculares e na forma de organização do sistema de ensino de todo país. Em síntese, recentemente a escola em geral e, em particular, o ensino de Física tem sofrido mudanças do ponto de vista das novas demandas impostas pela sociedade. Pesquisas sobre aprendizagem em Física têm estabelecido que os alunos desenvolvam habilidades de raciocínio complexas de forma mais eficazes quando estão ativamente envolvidos com o material que eles estão estudando (MAZUR, 1997, SKOLOFF e THORTON, 2006; SANTOS e SASAKI, 2015).

A tendência mais atual no país é buscar a atualização do currículo com a realização de pesquisas educacionais, o desenvolvimento de materiais didáticos e cursos de formação inicial e continuada de professores com o objetivo de introduzir tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Desse modo, a formação de professores deveria se conformar com um aprofundamento desses conteúdos de modo a permitir ao professor enfrentar a demanda dos alunos e da sociedade em geral pela introdução destes tópicos. Em particular, as dificuldades de se ensinar tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio são enormes e, às vezes, até mesmo intransponíveis. Entre elas podemos destacar:

- i) a mudança conceitual que o conteúdo da Mecânica Quântica exige em relação à Física Clássica (GRECA; HERSCOVITZ, 2011; HÉRAUD *et al.*, 2017; JOHANSSON *et al.*, 2018; KE; LEVRINI; FANTINI, 2013; ZANOTELLO; CAMARGO, 2020);
- ii) a complexidade matemática presente no formalismo matemático (GRECA; FREIRE JÚNIOR, 2003; HÉRAUD *et al.*, 2017; JOHANSSON *et al.*, 2018; MORAIS; GUERRA, 2013; POSPIECH, 2000);
- iii) a formação inadequada dos professores que não se encontram preparados para ensinar os conceitos quânticos fundamentais (MORAIS; GUERRA, 2013; OSTERMANN; MOREIRA, 2001; SOUZA *et al.*, 2020)e;
- iv) a construção de sequências didáticas de ensino de mecânica quântica adequadas ao ensino médio (BROCKINGTON & PIETROCOLA, 2005; AZEVEDO, ANDRADE & PIETROCOLA, 2006; BROCKINGTON, SIQUEIRA e PIETROCOLA, 2007).

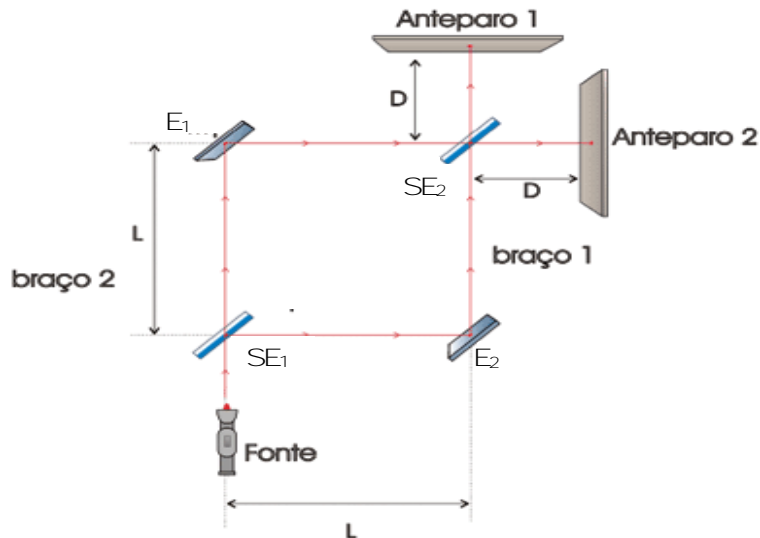
Como fica evidente a partir destes trabalhos realizar a transposição didática destes tópicos para a sala de aula constitui-se em um dos maiores desafios do ensino devido, por um lado, aos condicionantes históricos e epistemológicos relacionados a este campo do conhecimento e, por outro, ao próprio sistema escolar caracterizado por uma tradição didática que deve necessariamente ser questionada. Certamente, este movimento de renovação curricular está apenas no início e muitas pesquisas serão necessárias para que seja possível compreender mais adequadamente esta temática. Neste sentido, buscamos aproximar as situações de ensino em sala de aula empregando uma metodologia ativa de aprendizagem, o *peer instruction* ou instrução pelos colegas que aproxima os alunos com o processo de construção do conhecimento na Ciência, tais como: o levantamento e teste de hipóteses, resolução de problemas, análise e classificação dos resultados coletados, discussão entre os grupos e síntese integrativa.

Especificamente, o objetivo deste trabalho consiste em utilizar o método *peer instruction* como estratégia instrucional em sala de aula para promover a aprendizagem do conceito de onda partícula utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder entre alunos do Ensino Médio. Há a incorporação de duas inovações nesse trabalho: uma metodológica e outra curricular. A curricular, ao propor ensino de tópicos de mecânica quântica à estudantes do ensino médio e a metodológica por utilizar uma metodologia ativa de ensino, o *peer instruction*. A escolha da metodologia reforça uma necessidade, que é de modificação de sala de aula, engajando o estudante no processo de aprendizagem. Pretende-se nesse artigo apresentar o interferômetro de Mach-Zehnder, a metodologia utilizada, a sequência de ensino e os resultados obtidos na aplicação dos testes.

O FUNCIONAMENTO DO INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

Nesta seção, vamos apresentar o princípio de funcionamento do Interferômetro de Mach-Zehnder. Este aparato consiste em uma fonte de luz monocromática e coerente, dois espelhos E_1 e E_2 que são 100% refletores, dois semi espelhos SE_1 e SE_2 que dividem o feixe de luz, transmitindo 50% da luz incidente e refletindo os outros 50% e dois anteparos 1 e 2. O esquema do Interferômetro de Mach-Zehnder está ilustrado na figura 1, a seguir.

Figura 1- Esquema do interferômetro Mach Zehnder

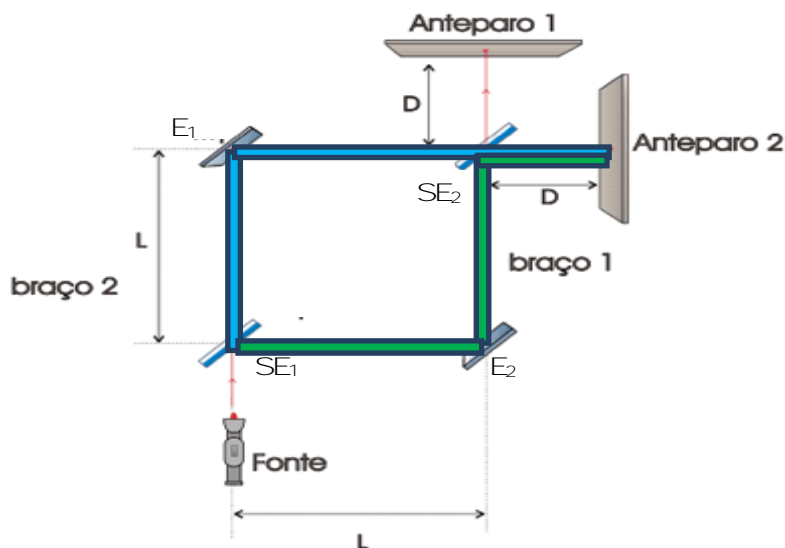


Fonte: Adaptado de RICCI; OSTERMANN e PRADO (2007).

Quando a fonte laser é ligada são formadas figuras de interferências anelares nos dois anteparos 1 e 2. As figuras formadas são complementares entre si, ou seja, onde há interferência construtiva (regiões claras) em um anteparo existe no local correspondente do outro anteparo interferência destrutiva (regiões escuras). As figuras de interferências são formadas pela superposição dos feixes que chegam ao anteparo 1 e 2, como será explicado detalhadamente a seguir. Para facilitar o entendimento do funcionamento do interferômetro foram feitas duas marcações, uma azul e outra verde, na ilustração do interferômetro (figura 2), para mostrar quais os caminhos que os dois feixes de luz percorrem até atingir os anteparos. Para facilitar, nomearemos de T a transmissão e R a reflexão que acontece nos espelhos e semi espelhos.

A marcação em azul ilustra o feixe que é transmitido pelo semi espelho SE_1 (T) que segue até o espelho E_1 , onde sofre reflexão total (R). Após a reflexão no espelho E_1 , o feixe é transmitido pelo semi espelho SE_2 (T) e atinge o anteparo 2 com a seguinte configuração (TRT). O outro feixe (marcado de verde) sofre reflexão no semi espelho SE_1 (R), reflexão total no espelho E_2 (R) e outra reflexão no semi espelho SE_2 (R), atingindo a anteparo 2 com a seguinte configuração (RRR). O padrão de interferência no anteparo 2 é então TRT(feixe azul)/RRR(feixe verde).

Figura 2- Esquema do interferômetro Mach Zenhder



Fonte: Adaptado de RICCI; OSTERMANN e PRADO (2007).

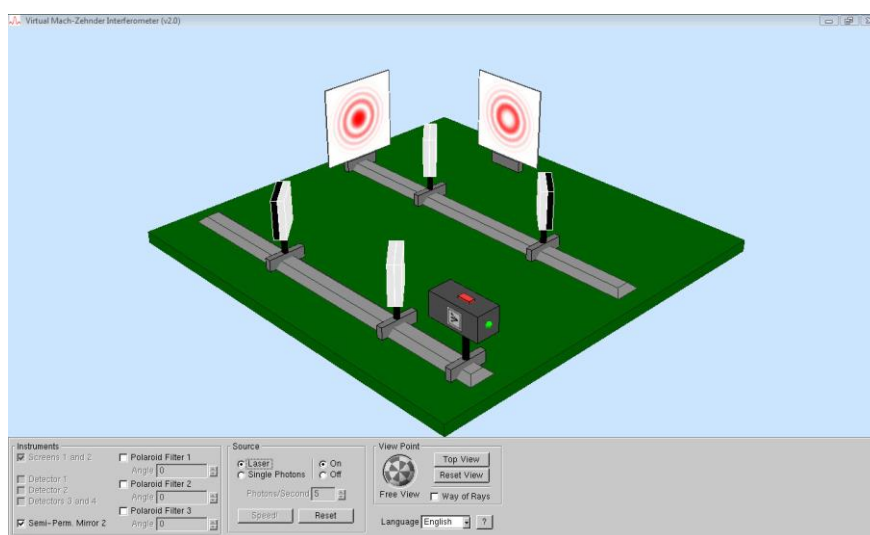
Para esclarecer a formação do padrão de interferência nos anteparos, leva-se em conta que uma reflexão em um espelho semi refletor introduz um deslocamento de fase na luz correspondente a um quarto de comprimento de onda da mesma. Dessa forma, o feixe marcado de azul ficará com uma defasagem de um quarto de comprimento de onda, já que sofreu apenas uma reflexão no espelho E_1 . Dessa forma, o feixe marcado de verde fica com uma defasagem de três quartos de comprimento de onda em relação ao feixe original, já que sofreu três reflexões. Esses dois feixes chegam ao anteparo 2 com defasagem entre eles de dois quartos de comprimento de onda ($\frac{2\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$), o que caracteriza uma interferência destrutiva no centro do anteparo.

A figura 3 ilustra uma imagem do simulador¹ utilizado nessa pesquisa com as figuras de interferência formadas nos anteparos (PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009). Um mesmo tipo de análise mostra que no anteparo 1, não há defasagem entre os feixes de onda formando, no centro do anteparo, uma interferência construtiva (região clara ilustrada na figura 3). No regime quântico, a intensidade do feixe de fótons é diminuída a tal ponto que

¹ Foi utilizado o software *Doppelspalt* de distribuição gratuita encontrado para download no endereço eletrônico www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html.

podemos obter apenas um único fóton emitido por vez (regime monofotônico) e, neste caso, ao invés dos padrões de interferência clássicos teremos as probabilidades de detectarmos cada fóton nos respectivos anteparos, pois neste caso, haverá apenas duas posições possíveis dos fótons serem detectados, ou seja, anteparo 1 ou anteparo 2. O simulador oferece a possibilidade da contagem do número de fótons detectados nos anteparos 1 e 2, dessa maneira sabe-se em qual anteparo o fóton foi encontrado.

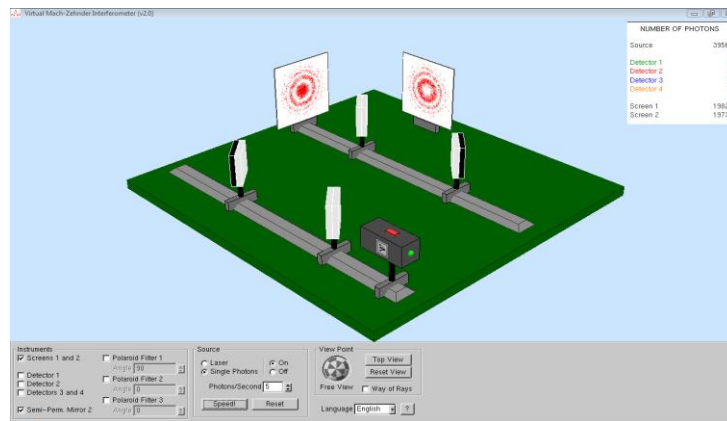
Figura 03- Tela do simulador do interferômetro de Mach-Zehnder no regime clássico



Fonte: PEREIRA; OSTERMANN e CAVALCANTI (2009).

Neste trabalho nos interessa particularmente o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder no regime quântico para abordar em sala de aula um dos conceitos fundamentais da Mecânica Quântica: a dualidade onda partícula. Para observarmos o comportamento dualístico do fóton utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder devemos, primeiramente, observar que quando um único fóton emitido pela fonte alcança um dos anteparos, isso é contabilizado numericamente pelo simulador. À medida que os pontos nos quais os fótons se acumulam aumentam gradativamente surge, então, um padrão de interferência quântica evidenciando o comportamento ondulatório (figura 4).

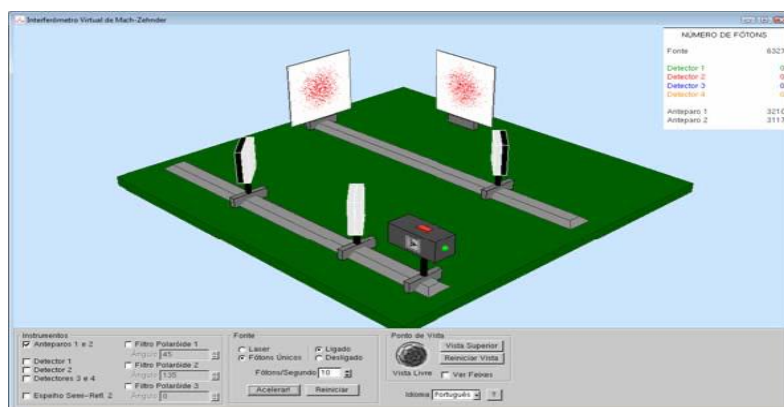
Figura 04- Tela do simulador do interferômetro no regime quântico monofotônico



Fonte: PEREIRA; OSTERMANN e CAVALCANTI (2009).

Uma possibilidade que o simulador oferece é a retirada do semi espelho SE_2 , dessa forma, o padrão de interferência quântica desaparecerá e não mais será possível detectar manchas claras e escuras sobre os anteparos (figura 5). Neste caso, cada anteparo registrará um fóton correspondente de acordo com o fato de ele ter ou não atingido o alvo percorrendo um dos braços e atingido o anteparo 2 ou o outro o braço e atingido o anteparo 1. Assim, a probabilidade é de que 50% dos fótons emitidos seja transmitido pelo primeiro semi espelho SE_1 , e os outros 50 % sejam refletidos pelo semi espelho SE_1 . Então apenas 50% dos fótons emitidos incidirão sobre cada um dos anteparos, evidenciando o comportamento corpuscular.

Figura 05- Tela do simulador do interferômetro de Mach-Zehnder ilustrando a destruição da interferência com a retirada do semi espelho S_2



Fonte: OSTERMANN *et al.* (2009).

METODOLOGIA DE PESQUISA: O *PEER INSTRUCTION*

As aulas baseadas no método *peer instruction* são estruturadas inicialmente a partir de uma breve exposição oral do professor sobre uma parte do conteúdo, enfatizando tópicos essenciais ao assunto da aula acompanhada por um teste conceitual de múltipla escolha, para ser respondido pelos estudantes em classe, a partir do que eles estudaram como tarefa de leitura² previamente antes da aula. As tarefas de leitura podem ser realizadas no formato de vídeos, textos ou questionários. É então apresentado aos estudantes testes conceituais, usualmente de múltipla escolha, para serem respondidos sem nenhuma interação com o colega. Após pensar por dois minutos, em média, os estudantes escolhem a sua resposta individual. Os testes apresentados na sequência didática dessa pesquisa eram estritamente conceituais, sem a presença do formalismo matemático da quântica. As questões utilizadas em salas de aulas que se utilizam do *peer instruction* devem ser elaboradas seguindo algumas recomendações: testes conceituais, não óbvios para os estudantes, claros e concisos; abordar um conceito por vez (por questão) e motivarem discussões entre os alunos (SCHELL, 2012).

Para elaborar esses testes, o professor deve se basear nas dificuldades dos estudantes, nos erros mais comuns e nas concepções alternativas (ROSENBERG; LORENZO; MAZUR, 2006; SCHELL, 2012a). Uma sugestão para se formular um bom teste e com alternativas de respostas bem elaboradas é propor inicialmente a pergunta (o conceito) como uma questão aberta, recolher as respostas e identificar por meio delas os erros mais comuns, as concepções e as dificuldades dos alunos. A partir disso, o professor deve elaborar as alternativas de resposta. Os testes devem conter perguntas que não podem ser resolvidas baseando-se em uma equação matemática, ou seja, não devem ser de fácil solução, aplicando-se uma fórmula ou equação. Devem promover boas discussões entre os estudantes e uma melhora no entendimento dos alunos sobre o conteúdo da disciplina.

Para responder ao teste conceitual pela primeira vez, o estudante escolhe a sua resposta sem haver nenhum diálogo com o colega. Para isso foi utilizado o aplicativo gratuito

² No caso dessa pesquisa, as leituras foram trechos retirados do livro *Alice no País do Quantum* (GILMORE, 1998)

Socrative³, disponibilizado gratuitamente para estudantes e professores que pode ser instalado em *smartphones*, *tablets* e computadores. O aplicativo permite que o professor verifique as respostas dos alunos em sala em tempo real dessa maneira, o professor pode verificar as alternativas escolhidas simultaneamente à resposta do aluno. O uso do aplicativo permite que os estudantes participem anonimamente ou que se identifiquem; garante a participação de todos presentes que pode ser verificada pelo educador; envolve o aluno ativamente, já que todo o tempo esse deve escolher respostas e manipular seu equipamento eletrônico e fornece feedback imediato ao professor permitindo que ele verifique a porcentagem de erros e acertos. Outro ponto importante do *feedback* a partir do uso deste dispositivo eletrônico é que o professor poderá ser capaz de localizar na sala de aula quais são os alunos com dúvidas, quem são aqueles que marcaram a alternativa correta e aqueles que erraram o teste conceitual.

As principais desvantagens da utilização dessa tecnologia são a necessidade de uma rede wifi na escola e uma preparação prévia do professor para entender o funcionamento do aplicativo, para garantir um domínio da tecnologia. Caso a escola não ofereça essa tecnologia, a opção é fazer cartões de resposta (chamados de *flahscards*), em que estão desenhadas as opções de respostas com cores diferenciadas. É importante que a escolha das alternativas pelos estudantes seja feita por meio desses dois métodos (cartão de resposta ou eletronicamente) e não oralmente ou por uma votação, em que os alunos levantem as mãos, para que não ocorra interferência entre as repostas dos colegas.

O quadro 1, a seguir faz um resumo dos tempos de duração de cada fase e das etapas da aplicação dos testes conceituais. A principal modificação trazida por essa metodologia diz respeito à transformação da postura do aluno em sala de aula. O estudante com as discussões dos testes conceituais tem a oportunidade de falar e não ficar somente escutando, como em uma aula tradicional. Quando ele defende a sua opinião e argumenta com seus colegas, há um aumento considerável do número de respostas corretas. O estudante se sente responsável pelo processo de aprendizagem, contribuindo para uma melhora do seu processo. O professor nessa aula tem um papel de mediador da discussão, deve escutar a opinião dos alunos e fazer perguntas que auxiliem na instrução pelos colegas.

O principal aspecto do uso do método *peer instruction* é a mudança do papel do professor que passa de um transmissor de conteúdo (“sábio no palco”) para um facilitador,

³ O aplicativo Socrative é disponibilizado gratuitamente no endereço da web: <https://www.socrative.com>.

que auxilia os estudantes nas atividades, interagindo com eles e com suas questões. Neste sentido, o emprego desta metodologia ativa de aprendizagem é uma mudança de posição em relação ao ensino: é deslocar a atenção dada ao professor e colocar a atenção no estudante e no aprendizado.

Conforme sabemos, as aulas expositivas demandam muito tempo e com frequência muitos tópicos não são devidamente abordados pelo professor em sala de aula. A principal modificação trazida por essa metodologia diz respeito à transformação da postura do aluno em sala de aula. O estudante com as discussões dos testes conceituais tem a oportunidade de falar e não ficar somente escutando, como em uma aula tradicional. Quando ele defende a sua opinião e argumenta com seus colegas, há um aumento considerável do número de respostas corretas. O estudante se sente responsável pelo processo de aprendizagem, contribuindo para uma melhora do seu processo. O professor nessa aula tem um papel de mediador da discussão, deve escutar a opinião dos alunos e fazer perguntas que auxiliem na instrução pelos colegas.

Quadro 1- Esquema da aplicação do teste *peer instruction* (CROUCH et al., 2007, p.6-7)

1. O teste é colocado aos alunos	1 minuto
2. É dado tempo para os estudantes pensarem	1- 2 minutos
3. Os estudantes escolhem o cartão ou gravam no aparelho eletrônico- <i>clicker</i> a resposta correta.	
4. Os estudantes discutem sua resposta com o vizinho	2- 4 minutos
5. Os estudantes gravam no aparelho eletrônico ou escolhem o cartão com sua resposta revisada.	
6. <i>Feedback</i> das respostas ao professor.	
7. Explicação da resposta correta pelo professor	2 minutos ou mais

Fonte: CROUCH *et al.* (2007).

Conforme sabemos, as aulas expositivas demandam muito tempo e com frequência muitos tópicos não são devidamente abordados pelo professor em sala de aula. A principal modificação trazida por essa metodologia diz respeito à transformação da postura do aluno em

sala de aula. O estudante com as discussões dos testes conceituais tem a oportunidade de falar e não ficar somente escutando, como em uma aula tradicional. Quando ele defende a sua opinião e argumenta com seus colegas, há um aumento considerável do número de respostas corretas. O estudante se sente responsável pelo processo de aprendizagem, contribuindo para uma melhora do seu processo. O professor nessa aula tem um papel de mediador da discussão, deve escutar a opinião dos alunos e fazer perguntas que auxiliem na instrução pelos colegas.

Além disso, queremos destacar que o *peer instruction* não é a única metodologia de ensino possível de ser empregada em sala de aula nestas mesmas condições, pois existem inúmeras outras metodologias ativas que contribuem para a melhoria da aprendizagem em sala, dentre elas podemos citar brevemente: ensino híbrido, gamificação, aprendizagem baseada em grupos, aprendizagem baseada em projetos, aprendizagem baseada em problemas, dentre outras.

Os sujeitos da pesquisa

A sequência didática foi aplicada por um professor em formação inicial do Curso de Licenciatura em Ciências Exatas do Instituto de Física da USP de São Carlos, durante a realização de um minicurso de 8h para estudantes do Ensino Médio de uma escola pública. O referido professor já havia realizado uma disciplina obrigatória, denominada Estrutura da Matéria, na qual entrou em contato com os conceitos fundamentais sobre Mecânica Quântica.

O minicurso

O tema do minicurso abordou o interferômetro Mach-Zehnder utilizando-se do simulador virtual *Doppelspalt* com o propósito de discutir os conceitos fundamentais sobre dualidade onda partícula no Ensino Médio. As atividades tinham como propósito permitir que os alunos comesçassem a estabelecer relações sobre a dualidade onda partícula, fornecendo explicações que estivessem na direção do conhecimento científico. Houve uma etapa prévia de um semestre de preparação do futuro professor de familiarização e transposição deste conteúdo para o Ensino Médio com a elaboração de roteiros de aulas, utilização de

simuladores computacionais, elaboração de testes conceituais e implementação da metodologia em um grupo-piloto de 20 alunos de uma escola pública do município de São Carlos.

A sequência didática que incluía a atividade com o interferômetro de Mach-Zehnder foi apresentada aos estudantes durante um minicurso que teve duração total de oito horas, dividido em 4 horas no período da manhã e 4 horas no período da tarde. O minicurso foi realizado no campus da USP- São Carlos para alunos dos três anos do ensino médio oriundos de escolas públicas, voluntários à pesquisa. Foi organizado em um laboratório de física da Universidade (USP-São Carlos) com os estudantes participantes distribuídos nas bancadas (totalizando quatro bancadas), com até 5 alunos por bancada, totalizando 19 alunos presentes ao minicurso.

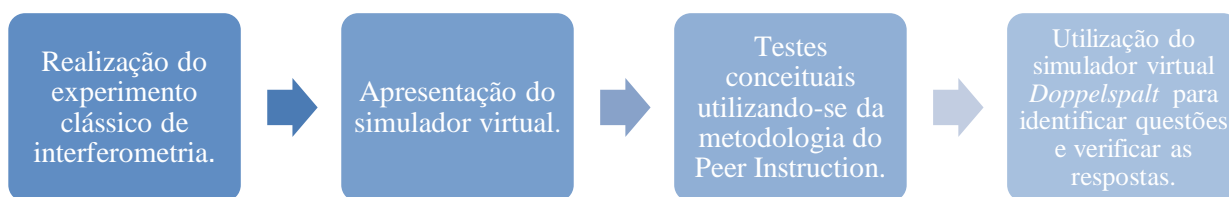
Os conteúdos abordados na sequência foram: i) o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder, ii) a destruição do padrão de interferência nos detectores D_1 e D_2 com a retirada do semi espelho S_2 , iii) a detecção de fótons no detector D_1 emitidos em regime monofotônico com a retirada do semi espelho SE_2 , iv) a detecção de fótons no detector D_2 emitidos em regime monofotônico com a retirada do semi espelho SE_2 e, finalmente, v) a detecção de fótons nos detectores D_1 ou D_2 emitidos em regime monofotônico com a presença do semi espelho SE_2 .

ANÁLISE DOS DADOS

Apresentamos a seguir, os resultados das atividades realizadas com alunos do Ensino Médio de uma escola pública de São Carlos referente à parte que envolve ao funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder. A parte do minicurso correspondente ao experimento de Mach-Zehnder iniciou-se com um experimento clássico contando com um espelho, um semi espelho, polaroides e um feixe de laser. A demonstração tinha objetivo de apresentar aos estudantes a função desses objetos (semi espelhos, laser e polaroides), que eram desconhecidos da maioria deles. Foi usado também um simulador, o software *Doppelspalt* de distribuição gratuita para apresentar aos alunos a montagem do interferômetro, ilustrando os espelhos, semi espelhos e polaroides. A simulação foi mostrada por meio da projeção da imagem do computador em uma tela. Ao apresentar o simulador, foi feita uma

correspondência entre os espelhos, semi espelhos e feixe de laser do experimento montado na sala e os presentes no simulador virtual. Após a apresentação do simulador, os testes conceituais foram aplicados. Durante toda a aula foi utilizado o simulador juntamente com a metodologia do *peer instruction* com objetivos variados como: o de ilustrar as questões apresentadas nos testes, esclarecer a resposta das questões e auxiliar na explicação do professor. A seguir apresentamos uma tabela descritiva de como ocorreu o funcionamento do *peer instruction* (figura 7).

Figura 7- Esquema da sequência didática do interferômetro Mach-Zenhdler



Fonte: Autores.

A tabela 01 a seguir vem acompanhada do tempo médio de cada etapa, assim como as atividades e ações desenvolvidas pelo professor ao aplicar a metodologia. A seguir são apresentados os testes acompanhados de dois gráficos que indicam o resultado das votações antes e após o *peer instruction* (a barra marcada de preto indica a afirmativa correta).

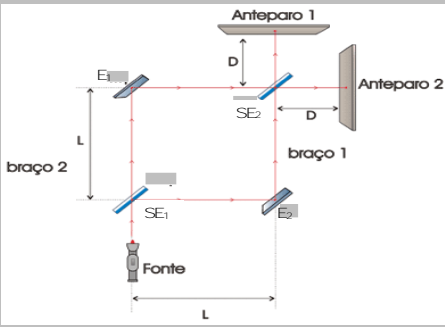
Tabela 01: Funcionamento *peer instruction* na sequência didática

Tempo (duração)	Atividade desenvolvida	Ação do professor
2:20 min	Apresentação da primeira questão, seguida das respostas individuais dos alunos.	O professor aguarda na frente da sala até o término das respostas individuais; verifica por meio do aplicativo <i>Socrative</i> as porcentagens de respostas e confere se todos os estudantes responderam.
4:50 min	Discussão entre os colegas no grupo após a resposta individual.	O professor aproxima-se de grupos variados de alunos e auxilia na discussão entre os colegas.
7:30 min	Fechamento da questão pelo professor.	O professor realiza uma explicação sobre a questão para toda a sala, indicando a resposta correta.

Fonte: Os autores.

O primeiro teste ocorreu após a professora mostrar o padrão de interferência formado nos anteparos por meio do simulador virtual. O teste era sobre o porquê da formação do padrão de interferência nos anteparos (figura 8).

Figura 8- O funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder



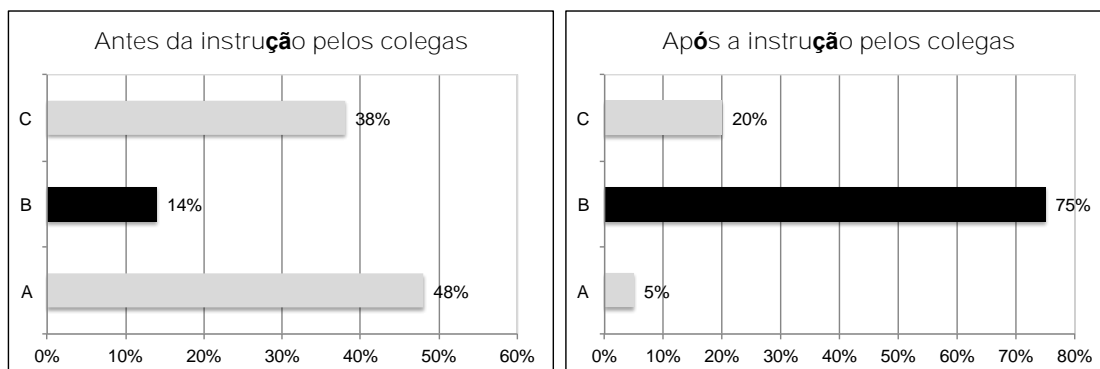
Episódio 1: O funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach-Zehnder é montado de acordo com o esquema ilustrado na figura em que E_1 e E_2 são espelhos 100% refletor e S_1 e S_2 são espelhos semi-refletor (que refletem e transmitem 50% da luz incidente sobre eles). Se a fonte emitir luz plana polarizada (laser) será formada no detector D_1 e no detector D_2 figuras de interferência. Isso ocorre porque a luz sofre:

- múltiplas interferências até chegar aos anteparos.
- superposição entre os feixes que seguem caminhos diferentes.
- reflexões nos espelhos e nos semi espelhos.

Fonte: Os autores.

Gráficos 1 e 2- Porcentagem de erros e acertos das respostas aos testes, antes da instrução pelos colegas e depois da instrução pelos colegas

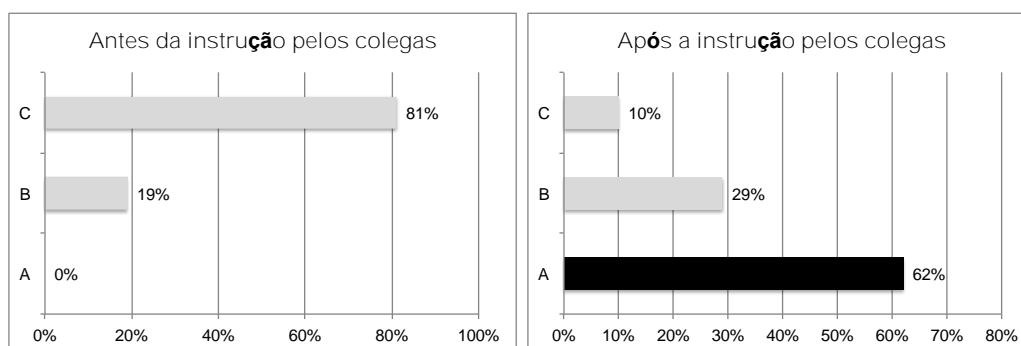


Fonte: Os autores.

Como opções de resposta os alunos tinham a letra A, que justificava o padrão formado pelas múltiplas interferências sofridas até chegar nos anteparos, como se a interferência fosse acontecendo pelo caminho até atingir o anteparo. Essa alternativa obteve 48% de respostas após a primeira votação, em que cada estudante faz a sua escolha individual. A alternativa C justifica o fenômeno da interferência com as reflexões nos espelhos e semi espelhos, apesar das reflexões ocorrerem elas não justificam o padrão formado nos anteparos, que ocorre devido a superposição dos feixes provocadas pelo semi espelho SE_2 . Houve um aumento percentual de 61% no número de acertos da questão, em relação a primeira votação (gráficos 1 e 2). Antes da instrução pelos colegas, os alunos, na sua maioria (86%), pensavam que o padrão de interferência era formado pelas múltiplas reflexões que aconteceriam antes de chegar aos anteparos (alternativa A) e pelas reflexões nos espelhos e semi espelhos (alternativa C). Os estudantes atribuíam o padrão de interferência formado ao que acontecia no caminho até os anteparos e não a superposição dos feixes. Após a discussão entre pares, há a convergência para resposta correta que indica a superposição entre os feixes como causadora do padrão de interferência. Mesmo após a discussão, 20% dos alunos ainda acreditam que o motivo da formação da interferência se deve as reflexões nos espelhos e semi espelhos.

A segunda questão sobre o interferômetro foi apresentada em sequência aos estudantes, logo após a explicação da questão sobre o porquê da formação do padrão de interferência. Nesse teste (figura 9) há uma pergunta sobre o que acontecerá com as figuras de interferência com a retirada do semi espelho SE_2 . Ao retirar o semi espelho SE_2 , há uma destruição no padrão de interferência nos anteparos 1 e 2 (alternativa correta A), já que não há a superposição de feixes. O semi espelho SE_2 possibilita uma nova reflexão e transmissão de cada um dos feixes que percorrem caminhos diferentes no simulador. As outras alternativas da questão indicam que o padrão de interferência aparecerá em apenas um dos anteparos ou permanecerá o mesmo.

Gráfico 3 e 4 - Porcentagem de erros e acertos das respostas ao teste antes da instrução pelos colegas e depois da instrução pelos colegas



Fonte: Os autores.

O próximo teste conceitual apresentado aos alunos foi sobre a detecção de fótons, emitidos um a um, no anteparo 1 (figura 10). O simulador permite a escolha do número de fótons emitidos por segundo permitindo também acelerar a emissão, para não se demorar horas como diz o enunciado da questão.

Figura 10- Detecção de fótons no anteparo 1 em regime monofotônico

Episódio 3: Detecção de fótons no anteparo 1 em regime monofotônico

Se, no experimento descrito acima, a intensidade da luz emitida pela fonte fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido e cada vez (regime monofotônico), a uma taxa de um fóton por segundo, pode-se afirmar que, após algumas horas, o anteparo 1 (detector 1) indicaria:

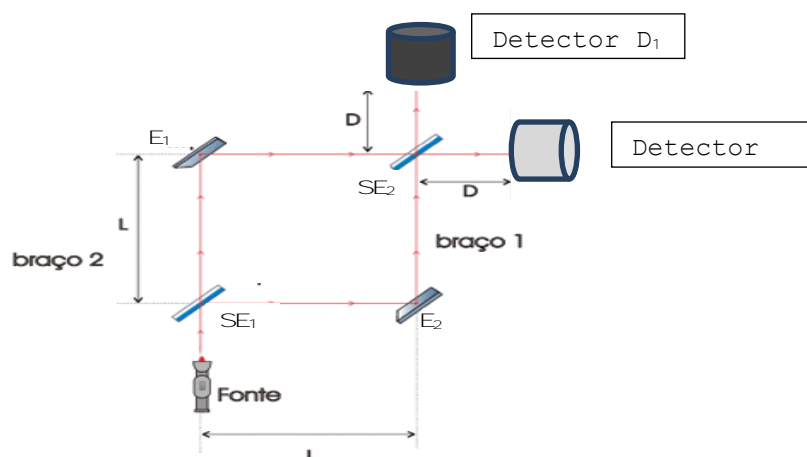
- (a) todos os fótons emitidos. (b) a grande maioria dos fótons emitidos.
 (c) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
 (d) uma pequena minoria dos fótons emitidos. (e) nenhum dos fótons emitidos.

Fonte: Os autores.

O simulador *Doppelspalt* permite substituir os anteparos 1 e 2 por detectores denominados D_1 e D_2 respectivamente, que possuem contadores para determinar quantos fótons que chegam a cada um dos anteparos e estão localizados no ponto central da tela (figura 11). Os detectores funcionam contando os fótons que incidem em um determinado

local, quando o fóton incide libera um quantum de energia e é detectado pelo aparelho. Nessa questão a fonte emite fótons e todos eles serão acusados pelo detector D_1 , já que o ponto central desse detector corresponde a um máximo de interferência, enquanto no detector D_2 a probabilidade de detecção é nula já que corresponde a um ponto de interferência destrutiva. O fóton nesse experimento tem evidenciado um comportamento ondulatório (OSTERMANN *et al.*, 2009).

Figura 11- Esquema do interferômetro Mach Zehnder adaptado

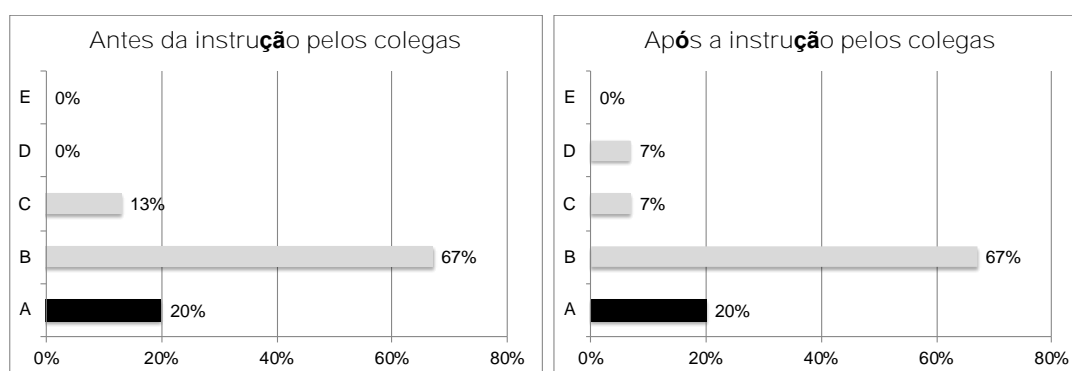


Fonte: Adaptado de RICCI; OSTERMANN; PRADO (2007).

Antes da discussão entre os pares a resposta que obteve a maior porcentagem foi a alternativa B, em que um dos detectores, o D_1 , seria responsável por detectar todos os fótons. Isso permanece após a interação entre os alunos, não necessariamente os mesmos alunos escolheram B como alternativa correta, mas sim a mesma quantidade de alunos. As respostas das letras A e B permanecem da mesma forma com a mesma porcentagem de respostas corretas. A modificação que ocorreu nesse teste, após a instrução pelos colegas foi da escolha da letra D, que diz que o detector D_1 detectaria alguns fótons. Uma suposição para a escolha das alternativas é que não há entendimento por parte dos alunos do comportamento ondulatório do fóton, eles consideram apenas o caráter de partícula. Após a coleta de dados, ocorreu a execução do simulador em que é mostrado todos os fótons detectados em D_1 . Há

uma explicação com analogia ao experimento com o laser e o padrão de interferência exibido na tela.

Gráfico 5 e 6 - Porcentagem de erros e acertos das respostas ao teste antes da instrução pelos colegas e depois da instrução pelos colegas



Fonte: Os autores.

O próximo teste (figura 12) foi sobre a detecção de fótons com a retirada do semi espelho SE_2 . O semi espelho SE_2 é o responsável pelo acontecimento da interferência nos anteparos, já que ele coloca os fótons em uma superposição de estados. Ao retirar o semi espelho 2 (SE_2), o padrão de interferência é destruído e metade dos fótons são detectados no anteparo 1 (detector D_1) e a outra metade detectada no anteparo 2 (detector D_2). O padrão de interferência é destruído, o fóton que percorre o caminho assinalado anteriormente na figura 4 de cinza claro chega ao anteparo 2 e o fóton que percorre o caminho cinza escuro chega ao anteparo 1, já que no semi espelho SE_1 há uma probabilidade de 50% do fóton ser transmitido e 50% refletido. Nessa situação é evidenciado o caráter corpuscular do fóton.

Figura 12- Episódio 4: A detecção de fótons no anteparo 1 (detector D1) emitidos em regime monofotônico com a retirada do semi espelho SE_2

Episódio 4 :A detecção de fótons no anteparo 1 (detector D1) emitidos em regime monofotônico com a retirada do semi espelho SE_2

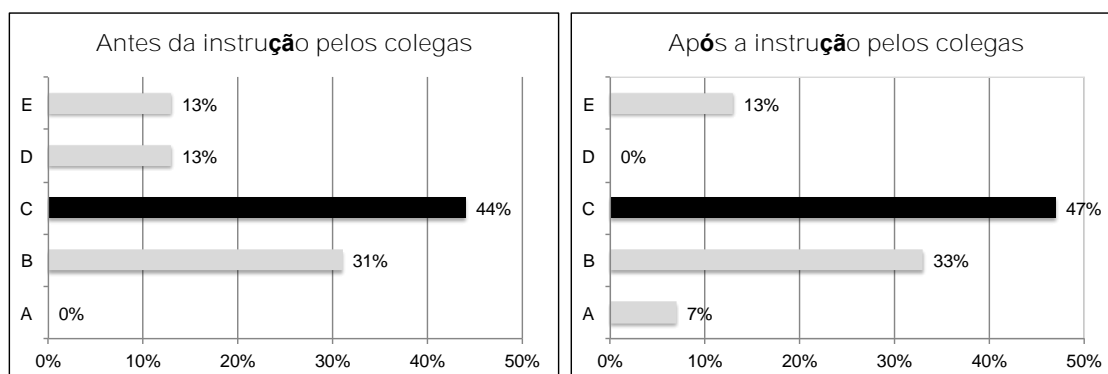
Suponha que, ainda em regime monofotônico, o espelho semi refletor SE_2 fosse retirado do experimento. Pode-se afirmar que, após algumas horas, o detector D_1 indicaria:

- (a) todos os fótons emitidos. (b) a grande maioria dos fótons emitidos.
 (c) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
 (d) uma pequena minoria dos fótons emitidos. (e) nenhum dos fótons emitidos.

Fonte: Os autores.

O gráfico 7 a seguir aponta o número de respostas corretas antes da instrução pelos colegas e o gráfico 8, após a instrução pelos colegas. O aumento do número de respostas corretas é de apenas 3%, deve-se ressaltar que a alternativa B (a grande maioria dos fótons emitidos) teve um aumento de 2% do número de repostas corretas, após a interação entre os pares. A alternativa D teve uma redução no número de escolhas, ficando sem nenhum voto após a realização do *peer instruction*. Da mesma forma do teste anterior, parte significativa dos estudantes, em torno de 30% que escolheram a alternativa B, desconhecem a função do semi espelho SE_2 , que é a de colocar os fótons em uma superposição de estados.

Gráfico 7 e 8 - Porcentagem de erros e acertos das respostas ao teste antes da instrução pelos colegas e depois da instrução pelos colegas



Fonte: Os autores.

O último teste apresentado (figura 13) é sobre a detecção de um único fóton nos anteparos 1 e 2, ou nos detectores D_1 ou D_2 colocados no lugar dos anteparos 1 e 2 (figura 7 acima). A alternativa correta (letra D) afirma que o fóton tem 50% de chance de ser detectado em D_1 e 50% de chance de ser detectado em D_2 . Essa questão evidencia o caráter probabilístico da quântica e a questão das superposições de estado do fóton.

Figura 13- Episódio 5 A detecção de fótons nos anteparos 1 e 2 (detectores D_1 ou D_2) emitidos em regime monofotônico com a presença do semi espelho SE_2

Episódio 5 A detecção de fótons nos anteparos 1 e 2 (detectores D_1 ou D_2) emitidos em regime monofotônico com a presença do semi espelho SE_2

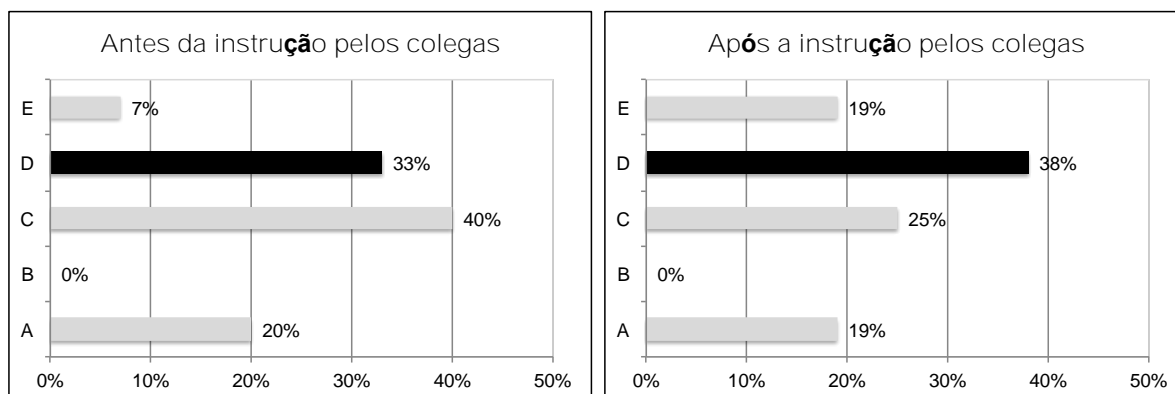
Se no arranjo experimental descrito com presença de SE_2 , a fonte emitisse um único fóton, pode-se afirmar que:

- a) o fóton seria detectado com certeza no anteparo 1 (detector D_1).
- b) o fóton seria detectado com certeza no anteparo 2 (detector D_2).
- c) a metade do fóton seria detectada em cada anteparo simultaneamente.
- d) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado no anteparo 1 ou 2.
- e) o fóton não seria detectado no anteparo 1 nem no anteparo 2.

Fonte: Os autores.

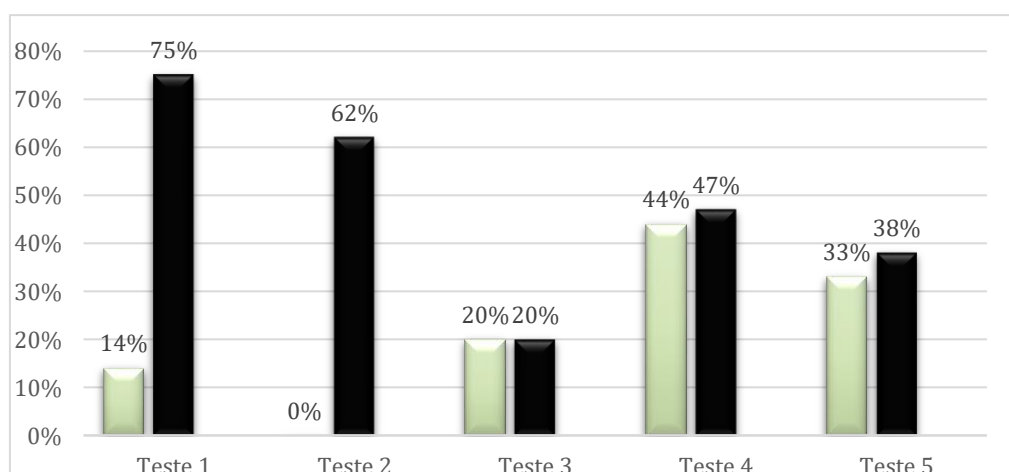
No gráfico 9 temos uma porcentagem de 40% dos alunos que marcaram a C como resposta correta, de que a metade do fóton seria detectada em cada detector, como se o fóton pudesse ser divisível. A alternativa B não foi escolhida em nenhuma das alternativas. Após a instrução pelos colegas, há um aumento de 5% no número de alunos que escolheram a resposta correta e uma diminuição de 15% do número de alunos que acreditavam que o fóton era divisível. Ocorre também após a interação entre os pares um aumento de 12% na escolha da alternativa E, em que o fóton não seria detectado em nenhum dos detectores.

Gráfico 9 e 10 - Porcentagem de erros e acertos das respostas ao teste antes da instrução pelos colegas e depois da instrução pelos colegas



Fonte: Os autores.

Gráfico 11 - Porcentagem de erros e acertos das respostas aos testes antes da instrução pelos colegas (claro) e depois da instrução pelos colegas (escuro).



Fonte: Os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou uma sequência didática sobre o interferômetro de Mach Zehnder utilizando-se da metodologia do *peer instruction*. São apresentados os resultados de cinco testes aplicados a alunos do ensino médio de escolas públicas do município de São

Carlos (gráfico 11). O gráfico indica que, excetuando o teste 4, houve convergência para a resposta correta após o *Peer Instruction*.

Esses resultados apontam que as discussões realizadas entre colegas aumentaram significativamente o número de respostas corretas dos estudantes para os testes sobre o interferômetro de Mach Zehnder. Os motivos que levaram a esse aumento são: a interação entre os pares permite que os estudantes esclareçam as dificuldades com os colegas caso existam opiniões diversas; as dificuldades dos estudantes que aprenderam os conceitos recentemente são semelhantes e de mesmo nível apresentando um nível cognitivo diferente do professor que lida com o assunto há mais tempo; não há constrangimento entre colegas ao perguntar e discutir um conhecimento com o outro, o que difere um pouco da interação entre professor e aluno; e; as discussões dão mais clareza sobre o processo de aprendizagem e melhora a compreensão de conceitos físicos já que os alunos argumentam e discutem conceitos científicos entre si. Sayer, Marshman e Singh (2016) também apontam que como esse aprendizado por meio da instrução pelos colegas está inserido em um contexto social, os alunos têm mais facilidade de recordar e recuperar o que foi discutido em sala. Sugere-se o *peer instruction* como uma alternativa metodológica para o ensino de quântica no nível médio, já que esse método dá espaço a uma discussão conceitual da quântica, permitindo uma melhor compreensão sobre o tema.

REFERÊNCIAS

CROUCH, Catherine H *et al.* Peer Instruction : Engaging Students One-on-One , All At Once **Research-Based Reform of University Physics**, n. 1, p. 1–55, 2007.

FANARO, Maria De Los Angeles; ARLEGO, Marcelo; OTERO, Maria Rita. El método de caminos múltiples de Feynman como referencia para introducir los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica en la escuela secundaria. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, p. 233–260, 2007.

FANARO, Maria De Los Angeles; OTERO, Maria Rita; ARLEGO, Marcelo. Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school : a proposed conceptual structure. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, p. 37–64, 2009.

GILMORE, Robert. *Alice no País do Quantum*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

GRECA, Ileana Maria; FREIRE JÚNIOR, Olival. Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? **Science & Education**, v. 12, p. 541–557, 2003.

GRECA, Ileana Maria; HERSCOVITZ, Victoria E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 5, n. 1, p. 1–17, 2011.

GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antonio; HERSCOVITZ, Victoria E. Uma Proposta para o Ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. 444–457, 2001.

HADZIDAKI, Pandora; KALKANIS, George; STAVROU, Dimitrios. Quantum mechanics: a systemic component of the modern physics paradigm. **Physics Education**, v. 35, n. 6, p. 386–392, 2000.

HÉRAUD, Jean Loup *et al.* Representing the Quantum Object Through Fiction in Teaching: The Ontological Contribution of Gamow's Narrative as Part of an Introduction to Quantum Physics. **Science and Education**, v. 26, n. 3–4, p. 299–322, 2017.

JOHANSSON, Anders *et al.* “Shut up and calculate”: the available discursive positions in quantum physics courses. **Cultural Studies of Science Education**, v. 13, n. 1, p. 205–226, 2018.

KALKANIS, George; HADZIDAKI, Pandora; STAVROU, Dimitrios. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. **Science Education**, v. 87, n. 2, p. 257–280, 24 mar. 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/sce.10033>>. Acesso em: 3 maio 2014.

KE, Jiun-Liang; MONK, Martin; DUSCHL, Richard. Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models. **International Journal of Science Education**, v. 27, n. 13, p. 1571–1594, jan. 2005. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500690500186485>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

LEVRINI, Olivia; FANTINI, Paola. Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. **Science & Education**, v. 22, n. 8, p. 1895–1910, 24 mar. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11191-013-9587-4>>. Acesso em: 6 abr. 2014.

LOBATO, Teresa; GRECA, Ileana María. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. **Ciência e Educação**, v. 11, n. 1, p. 119–132, 2005.

MAZUR, Eric. **Confessions of a converted lecturer**. . Estados Unidos: UNIL, Lausanne: UnilTV. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=ZpNjem3p0Ak%3E>>. , 2012

MCKAGAN, S. B. *et al.* A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect. **American Journal of Physics**, v. 77, n. 1, p. 87, 2009. Disponível em:

<<http://link.aip.org/link/AJPIAS/v77/i1/p87/s1&Agg=doi>>. Acesso em: 11 abr. 2014.

MORAIS, Angelita; GUERRA, Andreia. História e a filosofia da ciência : caminhos para a inserção de temas física moderna no estudo de energia na primeira série do Ensino Médio.

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 1, p. 1502-1-15-2-9, 2013.

MÜLLER, Rainer; WIESNER, Hartmut. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 200–209, 2002. Disponível em:

<<http://link.aip.org/link/AJPIAS/v70/i3/p200/s1&Agg=doi>>. Acesso em: 1 out. 2014.

OLSEN, Rolf V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 6, p. 565–574, jun. 2002.

Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500690110073982>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

OSTERMANN, Fernanda *et al.* Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 3, p. 1094–1116, 2009.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antônio. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense Ensino Física**, v. 18, n. 2, p. 135–151, 2001.

PEREIRA, Alexsandro; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio. On the use of a virtual Mach–Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. **Physics Education**, v. 44, n. 3, p. 281–291, 1 maio 2009. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0031-9120/44/i=3/a=008?key=crossref.7e79da808a9db485d957d44f2e40b5e8>>.

POSPIECH, Gesche. Philosophy and Quantum Mechanics in Science Teaching. **Science & Education**, v. 12, p. 559–571, 2003.

POSPIECH, Gesche. Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics.

Physics Education, v. 35, n. 6, p. 393–399, 20 nov. 2000. Disponível em:

<<http://stacks.iop.org/00319120/35/i=6/a=303?key=crossref.19039728d15c2ed5bddc279ba821f7b6>>.

RICCI, Trieste Freire; OSTERMANN, Fernanda; PRADO, Denise. O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder : uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 79–88, 2007.

SALES, Gilvandenys Leite *et al.* Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, p. 3501–11, 2008.

SAYER, Ryan; MARSHMAN, Emily; SINGH, Chandralekha. Case study evaluating Just-In-Time Teaching and Peer Instruction using clickers in a quantum mechanics course. **Physical Review Physics Education Research**, v. 12, p. 1–23, 2016.

SCHELL, Julie. **6 Big Ideas about Flipped Classrooms**. Disponível em: <<http://blog.peerinstruction.net/2012/11/16/5-big-ideas-about-flipped-classrooms/>>.

SOUZA, Rafaelle da Silva *et al.* Contributos ao ensino de mecânica quântica a partir da análise da complexidade de questões presentes no ENADE à luz da Taxonomia de Bloom revisada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, n. 4, p. 1–15, 2020.

ZANOTELLO, Marcelo; CAMARGO, Leiana. Uma Análise da Constituição de Saberes Relativos ao Ensino de Física Quântica em um Curso de Licenciatura. **Ciência & Educação**, v. 16, n. e20006, p. 1–16, 2020.