

UMA PROPOSTA DE INTRODUÇÃO À FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO POR MEIO DO FENÔMENO DE TUNELAMENTO QUÂNTICO

A proposal to introduce modern physics in high school through the tunnelling phenomenon

Alípio Dias dos Santos Correia [alipiodyascorreia@gmail.com]

*Colégio da Polícia Militar de Vitória da Conquista - CPM Eraldo Tinoco
Rua Brasília, 273, Bairro Kadija – CEP: 45065-405 – Vitória da Conquista – BA*

Cristina Porto Gonçalves [critpg2003@yahoo.com.br]

Luizdarcy Matos Castro [darcy_castro2005@yahoo.com.br]

*Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB)
Estrada do Bem Querer, Km 04 – CEP: 45031-300 – Vitória da Conquista – BA*

Recebido em: 12/05/2022

Aceito em: 22/11/2022

Resumo

O trabalho se refere a uma síntese da dissertação de mestrado, por mim elaborada, no âmbito do programa nacional de pós-graduação do Mestrado Nacional Profissional de Ensino em Física (MNPEF), e tem como objetivo apresentar uma proposta educacional para a introdução de conceitos de Física Moderna no Ensino Médio, abordando um tema da Física Quântica, o fenômeno de tunelamento quântico, cuja proposição consiste em um modelo composto por uma sequência didática e um experimento óptico, compondo um Produto Educacional. O experimento permite ilustrar o fenômeno de tunelamento quântico a partir do fenômeno da reflexão interna total frustrada, explorando a similaridade entre eles. Tal experimento foi construído com materiais de baixo custo, de fácil montagem e manuseio, podendo ser apresentado em sala de aula, sem a necessidade particular de um laboratório. A proposta educacional, baseada na analogia, estabelece a correlação do tunelamento quântico, fenômeno estudado na Física Quântica, com a reflexão interna total frustrada ou penetração de barreira óptica, fenômeno estudado na Física Clássica. A sequência didática, fundamentada na aprendizagem significativa crítica de Marco Antonio Moreira, se encarrega da construção da analogia entre os referidos fenômenos, possibilitando a compreensão dos mesmos, propiciando ao aluno perceber que o fenômeno quântico tem o seu análogo clássico. Outrossim, o aluno perceberá que há uma diferença de perspectiva de mundo entre os fenômenos macroscópicos e aqueles que são tratados na Física Moderna, no micromundo. A proposta foi aplicada em duas turmas do terceiro ano do Ensino Médio de um Colégio da Polícia Militar do interior da Bahia e os resultados refletiram a importância de uma aula que explora as similaridades dos fenômenos, os quais são apresentados numa sequência didática que rompe com as abordagens tradicionais, tendo como base a analogia. Esse recurso pedagógico auxiliará o professor no ensino e permitirá ao aluno compreender os fenômenos tratados na Física Moderna, a partir da analogia com os fenômenos estudados na Física Clássica.

Palavras-chave: Analogia. Física Moderna. Física Quântica. Aprendizagem significativa.

Abstract

The work refers to a synthesis of the master's thesis prepared by me within the scope of the national graduate program Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), and aims to present an educational proposal on the introduction of concepts of Modern Physics in High School, addressing a subject of Quantum Physics, the quantum tunneling effect with a proposition that consists in a model composed of a didactic sequence and of an optical experiment, composing an Educational Product.

The experiment allows to illustrate the phenomenon of quantum tunneling from the phenomenon of frustrated total internal reflection by exploring the similarity between them. This experiment was built with low-cost, easily assembled and easily handling material, it can be reproduced in a classroom, not requiring a dedicated laboratory. The educational proposal, based on the analogy, establishes the correlation between the quantum tunneling, a phenomenon studied in Quantum Physics, and the frustrated total internal reflection or optical barrier penetration, a phenomenon studied in Classical Physics. The didactic sequence, grounded in the critical meaningful learning by Marco Antonio Moreira, is responsible for building the analogy between the phenomena, permitting the comprehension thereof, and enabling the student to notice that the quantum phenomenon has its classical equivalent. Likewise, the student may also notice that there is a difference of world perspective between macroscopic phenomena and those that are dealt by Modern Physics: the micro-world. The proposal was implemented for two groups in the third year of High School of a unit of Colégio da Polícia Militar in an inland city of the state of Bahia. Results reflect the importance of a class that explores the similarities of phenomena, which are presented in a didactic sequence that brakes with the traditional approaches, based on analogy. This pedagogic resource shall assist the teacher in instructing and permits the student to comprehend the phenomena dealt by Modern Physics from the analogy with the phenomena studied in Classical Physics.

Keywords: Analogy. Modern Physics. Quantum Physics. Meaningful learning.

1 Introdução

A inserção de conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio tem se tornado uma necessidade para atender as demandas científicas e tecnológicas que o mundo contemporâneo exige, embora muitas dificuldades se apresentem nesse intento. Sobre esse tema, a literatura apresenta um considerável número de pesquisas que corroboram a importância da introdução do ensino de Física Moderna nesta etapa da Educação Básica e as dificuldades encontradas no processo de ensino e aprendizagem. No IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Rezende Junior e Cruz (2003, p. 1) afirmam que “Física é, sem dúvida, um exemplo bem-sucedido de construção do conhecimento humano, que busca dar sua contribuição para um contínuo avanço tecnológico bem como para a formação científica e cultural do homem moderno”. Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) apresentam em seu trabalho “Dificuldades dos professores em introduzir a Física Moderna no Ensino Médio: A necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos”, as justificativas de alguns pesquisadores para a introdução da FMC (Física Moderna e Contemporânea) na Educação Básica, enfatizando as dificuldades encontradas nesse processo.

As análises e interpretações dos fenômenos estudados na Física Moderna, nem sempre obedecem a mesma lógica que é utilizada para a compreensão dos fenômenos estudados na Física Clássica. Por essa razão, a inclusão de conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio tem representado um grande desafio em consequência das dificuldades pedagógicas encontradas na prática docente. Sobre as dificuldades no ensino de Mecânica Quântica, Pantoja (2011, p. VI) afirma que “A investigação de conceitos estruturantes facilitadores da aprendizagem deste ramo do conhecimento é de suma importância, sobretudo dadas as dificuldades de aprendizagem observadas, maiores nesta área do que em muitas da Física Clássica”. Na tentativa de vencer tais obstáculos, professores têm lançado mão de estratégias pedagógicas, inclusive utilizando sequências didáticas com base nas analogias. Porém, essa tarefa não é fácil e nem sempre bem-sucedida, dadas as dificuldades que o professor encontra em estabelecer analogias que possibilitem correspondência entre os fenômenos estudados na Física Clássica e na Física Moderna. Por outro lado, em sua abordagem, os livros didáticos se limitam à apresentação de conceitos e equações, não estabelecendo comparações entre os fenômenos estudados e os já conhecidos pelos alunos, o que compromete a apreensão do conteúdo. Outrossim, a falta de experimentos didáticos nessa área da Física faz com que as aulas tenham na oralidade seu único recurso didático, restando ao professor, como alternativa,

desenvolver estratégias pedagógicas que possam provocar o aluno a abstrações e comparações que venham facilitar a compreensão dos fenômenos (COSTA; BARROS, 2015; GASPAR; MONTEIRO, 2017).

Discussões sobre temas relacionados a fenômenos estudados na Física Moderna são recorrentes e estão presentes nos livros, nas mídias e no entretenimento (GILMORE, 1998). O fato de os conceitos desse ramo da Física fazerem parte da realidade contemporânea, estando presentes tanto no entretenimento quanto nas tecnologias acessíveis à sociedade, o aluno identifica alguns conceitos que lhes são familiares. Sendo assim, para que a sequência didática tenha êxito, o conhecimento prévio dos alunos deve ser levado em consideração, por propiciar uma aprendizagem crítica e significativa.

Sobre a aprendizagem significativa Marco Antonio Moreira (2000, p. 30) diz:

Sabemos que a aprendizagem significativa caracteriza-se pela interação cognitiva entre o novo conhecimento e o conhecimento prévio. Nesse processo, que é não-literal e não-arbitrário, o novo conhecimento adquire significados para o aprendiz e o conhecimento prévio fica mais rico, mais diferenciado, mais elaborado em termos de significados, e adquire mais estabilidade. [...]. Sabemos, também, que o conhecimento prévio é, isoladamente, a variável que mais influencia a aprendizagem. Em última análise, só podemos aprender a partir daquilo que já conhecemos. David Ausubel já nos chamava atenção para isso em 1963. Hoje, todos reconhecemos que nossa mente é conservadora, aprendemos a partir do que já temos em nossa estrutura cognitiva. Como dizia ele, já nessa época, se queremos promover a aprendizagem significativa é preciso averiguar esse conhecimento prévio e ensinar de acordo.

Tendo em vista o contexto científico e tecnológico atual, cuja base teórica não é de fácil assimilação pelos alunos do Ensino Médio, é conveniente a utilização de uma abordagem didática baseada nas analogias, para que ocorra a internalização dos conceitos estudados na Física Moderna, a partir de conceitos conhecidos da Física Clássica. Daí a necessidade de se considerar as similaridades ou equivalência entre os fenômenos conhecidos e o fenômeno a ser estudado. Outrossim, pela impossibilidade da interação direta com o fenômeno estudado, o raciocínio, a indução e a dedução ficam comprometidos. Em razão disso, a utilização de experimentos para que se estabeleça a interação do sujeito com o objeto de estudo torna-se importante. Sobre as analogias em sala de aula, os autores Martins, Ogborn e Kress (1999) apresentam a relevância da linguagem no processo do ensino e aprendizagem de Ciências, enfatizando a importância das metáforas, analogias e outros recursos de imaginação nas situações de ensino.

Diante do exposto, faz-se necessária a elaboração de recursos educacionais, capazes de produzir a compreensão de forma cognitiva, significativa e crítica dos fenômenos estudados na Física Moderna.

O objetivo alcançado nessa proposta educacional foi mostrar, por meio do fenômeno de tunelamento quântico, que há uma diferença de perspectiva de mundo entre os fenômenos macroscópicos, aqueles que são vivenciados no dia a dia no nosso mundo, cuja descrição de seus sistemas é bem-sucedida pelas teorias clássicas, e aqueles que são abordados na Física Moderna, e que são tratados com modelos matemáticos estatísticos.

Para atender a essa demanda, o Produto Educacional desenvolvido consistiu numa sequência didática, que rompeu com o modo tradicional de aulas, ao estabelecer analogia entre o fenômeno de reflexão interna total frustrada, tratado na Física Clássica, e o fenômeno de tunelamento quântico, estudado na Física Quântica. Para tanto, foi utilizado um experimento óptico, o qual permitiu ilustrar o tunelamento quântico a partir da reflexão interna total frustrada, explorando a similaridade entre os dois fenômenos. Esse recurso pedagógico auxiliou o professor no ensino e permitiu ao aluno compreender o fenômeno quântico. Assim sendo, a compreensão do tunelamento quântico, a partir da analogia com a reflexão interna total frustrada, consistiu no problema de pesquisa, que foi respondido.

O fato de a aprendizagem ter sido processada com a formação de novos conceitos construídos nos alicerces pré-existentes, favoreceu uma aprendizagem significativa e crítica, implicando num

realinhamento da escala de valores, já que o aluno foi colocado diante de uma nova leitura da Natureza, a qual o levou a compreender que o mundo perceptível que o cerca está relacionado com os sentidos do corpo humano, e difere do mundo revelado por meio das teorias da Física Moderna.

Dois trabalhos acadêmicos pronunciam-se sobre a analogia entre um fenômeno clássico e um fenômeno quântico a partir de um experimento óptico: “Reflexão Interna Total Frustrada ou Penetração de Barreira Óptica” de Márcia Regina Moreira Leão (2005) e “Uma Demonstração Simples Sobre a Analogia Clássica do Efeito de Tunelamento Quântico” de Cleidilane de Oliveira Sena, Glaura Caroen Azevedo de Oliveira e Petrus Alcantara Júnior (2005). Em ambos os trabalhos, os autores buscam estabelecer a analogia entre os fenômenos de reflexão interna total frustrada e o fenômeno do tunelamento quântico.

A aplicação da sequência didática e o uso do experimento óptico proporcionaram uma interação maior entre os alunos e entre estes e o professor, resultando em discussões enriquecedoras, o que proporcionou uma aprendizagem bem-sucedida. A sequência didática teve como fundamento o uso das analogias para a introdução da Física Moderna no Ensino Médio, tendo como subsídios artigos publicados em revistas especializadas em Ensino de Física, em publicações de autores da Educação, tendo como pressuposto teórico principal a “aprendizagem significativa crítica” de Marco Antônio Moreira.

A sequência didática foi aplicada na apresentação dos conteúdos durante as aulas, conforme descrito na seção 4.2, seguindo os planos de aulas, que consistiram em aulas expositivas, aplicação de questionários, seções 4.2.1 e 4.2.5, atividades experimentais, conforme descrito na seção 4.2.4, e vídeos exibidos, seção 4.2.2 (DESPERTANDO, 2015; PARA NÃO ESQUECER, 2015).

2 Fundamentação Teórica

As aulas seguiram uma sequência didática que romperam com a forma tradicional de aulas, tendo como base a teoria da aprendizagem significativa crítica (MOREIRA, 2011), enfatizando a importância das analogias no processo de aprendizagem. Foi feita uma analogia entre os fenômenos de tunelamento quântico e reflexão interna total frustrada utilizando um experimento óptico. Tal experimento permitiu a visualização de uma barreira óptica sendo transposta por raios de luz que, por analogia, foi comparado a uma barreira de potencial sendo transposta por partículas, evento que se verifica no fenômeno quântico.

A seguir, são abordados os conteúdos necessários para a aplicação do produto educacional.

2.1 A aprendizagem significativa crítica na visão de Marco Antonio Moreira

Em uma releitura da teoria clássica da aprendizagem significativa de David Ausubel, Marco Antonio Moreira postula que a aprendizagem não deve ser apenas crítica, mas também significativa, para atender as mudanças rápidas e drásticas que ocorrem na sociedade contemporânea (MOREIRA 2010). Conforme esse entendimento, Moreira destaca o papel fundamental da linguagem e da interação social na aprendizagem, enfatizando o aspecto crítico na aquisição do conhecimento.

Segundo Moreira (2011), a aprendizagem significativa consiste na interação do novo conhecimento com o conhecimento prévio, processo natural de aprendizagem, no qual o aluno não substitui o conhecimento leigo pelo científico, conservando assim sua cultura, mantendo a sua postura crítica, sem se aculturar diante de novos conceitos e perspectivas. Nesse processo, o novo conhecimento adquire significado para o aprendiz e o conhecimento prévio fica mais organizado, adquire novo significado e estabilidade cognitiva. A esse conhecimento prévio, específico e relevante, David Ausubel chamava de subsunção ou ideia-âncora.

Aprendizagem significativa crítica “é aquela perspectiva que permite ao sujeito fazer parte de sua cultura e, ao mesmo tempo, estar fora dela” (MOREIRA, 2000, p. 7). Dessa forma, o novo conhecimento proporciona significados para o aluno, ficando o conhecimento prévio rico, diferenciado e mais elaborado em termos de significado (MOREIRA; MASINI, 1982).

É importante reiterar que a aprendizagem significativa se caracteriza pela *interação* entre conhecimentos prévios e conhecimentos novos, e que essa interação é *não-litera*l e *não-arbitrária*. Nesse processo, os novos conhecimentos adquirem significado para o sujeito e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva. Por exemplo, para um aluno que já conhece a Lei da Conservação da Energia aplicada à energia mecânica, resolver problemas onde há transformação de energia potencial em cinética e vice-versa apenas corrobora o conhecimento prévio dando-lhe mais estabilidade cognitiva e talvez maior clareza. Mas se a Primeira Lei da Termodinâmica lhe for apresentada (não importa se em uma aula, em um livro ou em um moderno aplicativo) como a Lei da Conservação da Energia aplicada a fenômenos térmicos ele ou ela dará significado a essa nova lei na medida em que “acionar” o subsunçor Conservação da Energia, mas este ficará mais rico, mais elaborado, terá novos significados pois a Conservação da Energia aplicar-se-á não só ao campo conceitual da Mecânica, mas também ao da Termodinâmica. (MOREIRA, 2012, p. 2-3).

Conclui-se que o conhecimento prévio é determinante para a aprendizagem, na medida em que só podemos aprender a partir do que já conhecemos, ou seja, aprendemos a partir daquilo que já temos em nossa estrutura cognitiva.

Nessa perspectiva, as teorias da aprendizagem significativa, aplicadas no processo de ensino e aprendizagem, sugerem um ensino com base nas analogias, tal como é proposto no presente trabalho ao estabelecer a analogia entre o fenômeno do tunelamento quântico com o fenômeno da reflexão interna total frustrada (MOREIRA, 2011).

2.2 Propriedades da propagação da luz

A sequência didática explora a analogia entre os fenômenos de tunelamento quântico e da reflexão interna total frustrada. Portanto, são abordados os fenômenos da reflexão, refração, reflexão interna total e reflexão interna total frustrada ou penetração de barreira óptica, ocorrências tratadas na Física Clássica e estudadas no 2º ano do Ensino Médio. A abordagem desses fenômenos facilita o entendimento do tunelamento quântico, por analogia, já que tal fenômeno encerra similaridades com a reflexão interna total frustrada.

A óptica é o segmento da Física que estuda a luz e os fenômenos a ela associados e é estudada segundo os aspectos geométrico e físico, pelo fato de a luz possuir comportamento dual, manifestando-se como partícula em alguns fenômenos e como onda noutros.

A óptica geométrica se baseia no conceito de que a luz é composta por raios que se propagam em linha reta, inferindo um modelo geométrico na sua propagação. Assim, nessa divisão, são estudados fenômenos como reflexão, refração e reflexão interna total da luz.

Quando a natureza da luz é considerada ondulatória, sua análise se baseia no conceito da propagação por meio de ondas eletromagnéticas e é objeto de estudo da óptica física. Nesse ramo é estudada a reflexão interna total frustrada, uma vez que tal fenômeno só é possível caso a luz tenha comportamento ondulatório.

O fenômeno da reflexão da luz ocorre quando um raio luminoso se propaga num determinado meio, incide sobre uma superfície e retorna ao seu meio de origem. O raio luminoso que se dirige para a superfície é chamado de feixe incidente e o que retorna é denominado feixe refletido.

Quando a luz incide em uma superfície irregular, os raios refletidos se propagam em várias direções diferentes (fig. 1). Dizemos que houve espalhamento da luz. Esse tipo de reflexão é denominado reflexão difusa. Devido ao fenômeno da difusão, muitas pessoas podem ver o mesmo objeto ao mesmo tempo e podemos enxergar vários objetos de ângulos diferentes.

Há outro tipo de reflexão, na qual os raios são refletidos paralelamente após incidirem em superfícies altamente polidas como os espelhos, metais e superfícies de água (fig. 2). Esse tipo de reflexão é denominado reflexão regular e permite a formação de imagens nítidas, porém elas não podem ser observadas de todas as posições (MÁXIMO; ALVARENGA, 2006; RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2009; GREF, 2000).

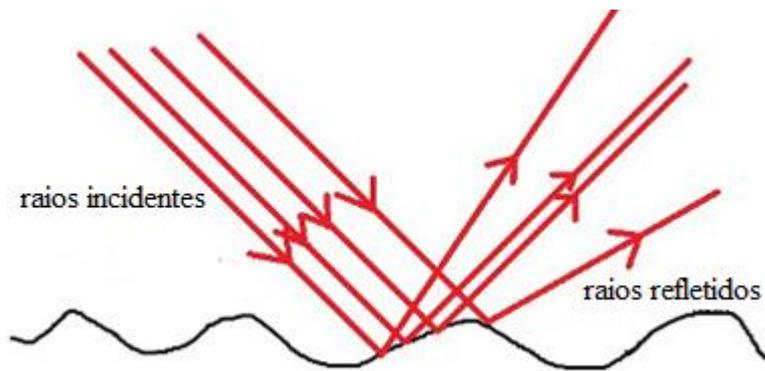


Figura 1: Um feixe luminoso sofrendo reflexão ao encontrar uma superfície irregular
Fonte: Teixeira (s.d.)

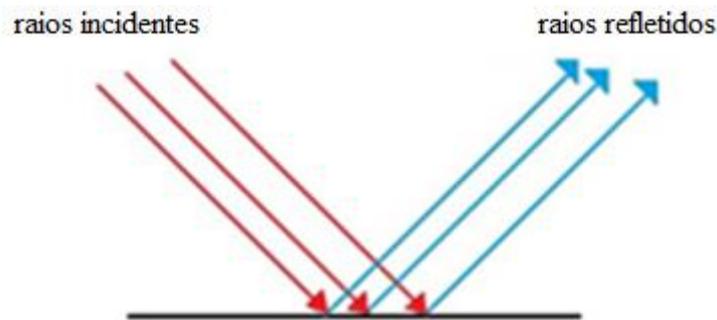


Figura 2: Um feixe luminoso sofrendo reflexão ao encontrar uma superfície lisa
Fonte: Teixeira (s.d.)

O fenômeno da refração da luz ocorre quando a luz sofre mudança de meio de propagação, havendo variação na velocidade de irradiação, uma vez que a luz é uma onda eletromagnética cuja velocidade de propagação depende do meio (fig. 3). Se a incidência da luz ocorrer com um ângulo igual a zero, em relação à normal da superfície de separação dos meios, a luz não sofrerá desvio e seu ângulo refratado será nulo. Porém, quando a incidência acontecer com um desvio oblíquo, em relação à normal, o raio luminoso refratado se aproximará ou se afastará da reta normal.

Um conceito importante no estudo da luz é o índice de refração. Tal conceito decorre do fato de a velocidade de propagação da luz ser diferente em meios distintos. O índice de refração estabelece a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio considerado. Assim, dizemos que um meio é mais refringente do que outro meio, quando a velocidade de propagação da luz no primeiro é menor que no segundo meio.

No estudo da Óptica, a interface entre dois meios homogêneos e transparentes é chamada de dióptro, podendo ser classificados em planos, esféricos, cilíndricos, dentre outros. Os dióptros são importantes para estudos que envolvem a refração da luz (MÁXIMO; ALVARENGA, 2006; RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2009; GREF, 2000).

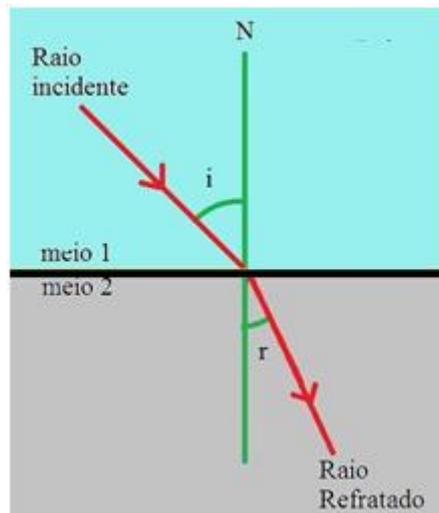


Figura 3: Um raio refratando do meio 1 para o meio 2
Fonte: Teixeira (s.d.)

Segundo a teoria eletromagnética clássica, quando um feixe de luz incide obliquamente em uma interface de dois meios transparentes, o raio luminoso se afasta da normal, sendo, parcialmente, refletido e parcialmente transmitido (fig. 4). Porém, se esse feixe parte de um meio de índice de refração maior para um meio de índice de refração menor, atingindo a interface com um ângulo maior que um ângulo θ_L , chamado ângulo crítico ou ângulo limite, ocorre o fenômeno chamado reflexão interna total, pois a interface funciona como uma barreira, impedindo que o feixe incidente, classicamente, atravesse a mesma. Logo, aí não se verifica o fenômeno da transmissão (refração), uma vez que o feixe retorna ao meio de origem. Esse fenômeno pode ser observado nos prismas de 45° (fig. 5), por provocarem um desvio de 90° dos feixes em relação ao feixe incidente, funcionando a face a 45° como um espelho plano.

A figura 4 ilustra um raio incidindo sobre a interface de dois meios (meio 1 e meio 2), inicialmente com um ângulo nulo em relação à normal, ocorrendo apenas a refração. Porém, à medida em que a inclinação do raio incidente aumenta, além da refração, ocorre uma reflexão desse raio; no momento em que essa inclinação chega a um ângulo limite (ângulo crítico), a refração ocorre de forma rasante à interface de separação dos dois meios; num ângulo superior ao ângulo crítico ocorre a reflexão interna total (MÁXIMO; ALVARENGA, 2006; RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2009; GREF, 2000).

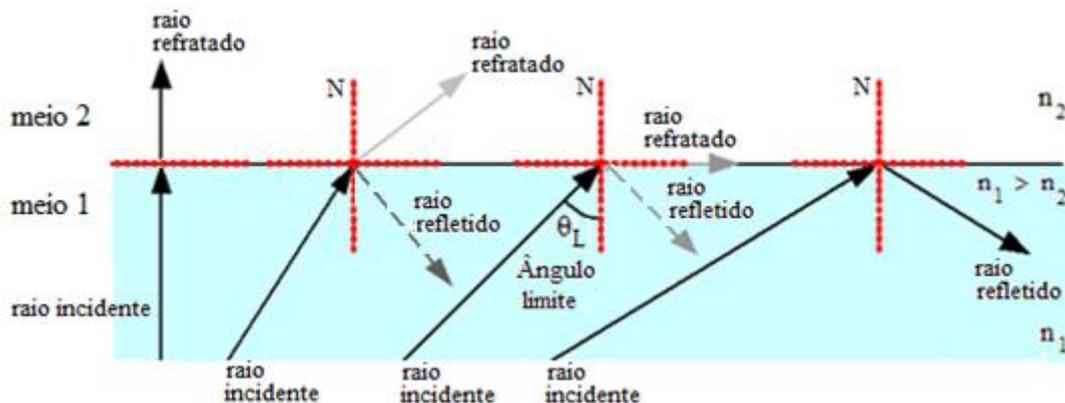


Figura 4: Refração; refração e reflexão; reflexão interna total
Fonte: Museu das comunicações (2017).

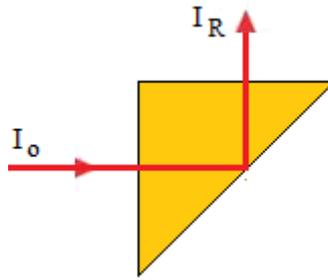


Figura 5: Reflexão interna total no prisma de 45°
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na reflexão interna total, considerada na perspectiva da óptica geométrica, não ocorre refração da luz. Porém, analisando o fenômeno com base na teoria ondulatória da luz, percebe-se que, ao incidir na fronteira entre dois meios, a luz transpõe a interface e se propaga no segundo meio alguns comprimentos de onda, decaindo exponencialmente (fig. 7). Tal fenômeno é resultado da sobreposição de várias ondas naquele ponto de incidência, dando origem a uma resultante que é transmitida para o segundo meio. A onda transmitida guarda as mesmas características da incidente, exceto a velocidade, que depende da inclinação do ângulo da frente de onda transmitida em relação à interface de separação dos meios. Quanto maior for a velocidade desta, maior é essa inclinação e, quando essa inclinação atingir um ângulo de 90°, a superposição destas produz uma onda de superfície chamada evanescente (fig. 6 e fig. 7). Quando a onda evanescente se propaga com certa amplitude de um meio para outro meio de índice de refração maior, a energia pode ser transmitida através deste intervalo. Nessas circunstâncias, pode-se dizer que, a rigor, não há reflexão interna total e esse fenômeno é conhecido por reflexão interna total frustrada ou penetração de barreira óptica (LEÃO, 2005; SENA; OLIVEIRA; ALCÂNTARA JÚNIOR, 2005).

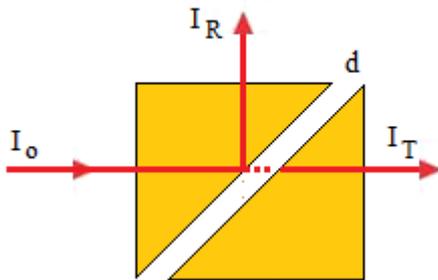


Figura 6: Reflexão interna total frustrada
Fonte: Elaboradas pelo autor (2017).

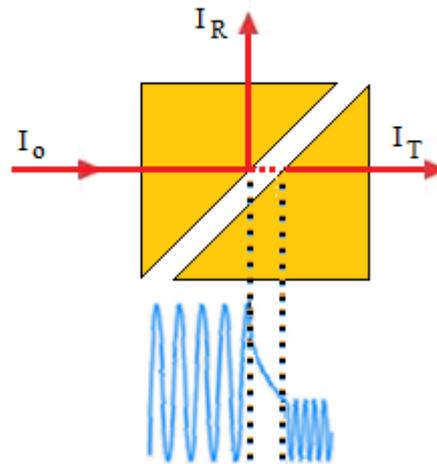


Figura 7: Onda evanescente
Fonte: Elaboradas pelo autor (2017).

2.3 FÍSICA MODERNA

As teorias da Física Clássica, desenvolvidas até o fim do século XIX, conseguiam explicar praticamente toda a fenomenologia natural. Desde Galileu Galilei (1564-642), os físicos clássicos obedeciam rigorosamente ao método científico, fazendo uso da observação e da experimentação para testar suas teorias. Porém, tais teorias tornaram-se limitadas, na medida em que não tinham total sucesso na explicação de certos fenômenos observados, no final deste século, em particular, pode-se mencionar os fenômenos da radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico. Além do mais, fenômenos já conhecidos continham contradições em suas análises e aceções.

No início do século XX, ocorreu uma nova revolução científica na Física, na qual um conjunto de teorias provocou mudanças na compreensão de conceitos como espaço, tempo, causalidade,

medida, simultaneidade, trajetória e posição. Tal revolução deu origem à Física Moderna, que engloba a Teoria da Relatividade e a Física Quântica. A partir de então, alguns fenômenos, impossíveis de serem descritos ou compreendidos pela Física Clássica, passaram a ser percebidos por meio de novos modelos e formulações matemáticas. A teoria da relatividade, lançando luz sobre os fenômenos em altas velocidades, e a mecânica quântica, estabelecendo modelos para os fenômenos que ocorrem na escala atômica e subatômica, permitiram a solução de muitos dos problemas pendentes da Física do início do século XX.

Corroborando, Alberto Gaspar afirma que

Desde que novas e revolucionárias ideias surgiram no fim do século XIX e início do século XX, a Física sofreu alterações conceituais profundas, que modificaram toda a sua descrição da Natureza, do micro ao macrocosmo. Esse processo foi e continua sendo vertiginoso, impossível de ser acompanhado e, principalmente, compreendido no todo. (GASPAR, 2006, p. 519).

2.3.1 Noções de Mecânica Quântica

Um dos problemas pendentes da Física do início do século XX era o fenômeno da radiação do corpo negro, cujas observações não estavam em conformidade com a teoria clássica, pois tal teoria previa que a intensidade da radiação de um corpo negro seria infinita para a região do ultravioleta, o que estava em desacordo com a realidade. O estudo desse fenômeno resultou no desenvolvimento da teoria quântica, tendo o cientista Max Planck desempenhado papel fundamental ao apresentar uma solução para o fenômeno da radiação do corpo negro, com a hipótese de que a radiação por ele emitida não ocorre em um espectro contínuo, mas discreta, ou quantizada. Pode-se dizer então que a emissão e a absorção de energia eletromagnética se dão de forma discreta de energia.

Posteriormente, o físico Albert Einstein, lançando mão da hipótese da quantização da energia, resolveu o problema do efeito fotoelétrico e propôs que a natureza da luz é quantizada, sendo essa quantidade discreta denominada quantum de luz ou fóton.

Do resultado desses trabalhos e de pesquisas de outros cientistas como Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Louis de Broglie, Max Born, Wolfgang Pauli e Paul Dirac, nasceu a mecânica quântica com todo o seu formalismo.

Numa reunião da Sociedade Alemã de Física, a 14 de dezembro de 1900, Max Planck apresentou seu artigo “Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal”. Este artigo, que a princípio atraiu pouca atenção, foi o início de uma revolução na física. A data de sua apresentação é considerada como sendo a do nascimento da física quântica. (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 19).

A Mecânica Quântica (MQ) surgiu então como resultado de descobertas como a radiação do corpo negro, a dualidade onda partícula, a função de onda e a descrição probabilística, e o princípio da incerteza. Assim, a MQ se estabeleceu como um ramo da Física, que estuda o comportamento da matéria e da energia em sistemas de dimensões próximas ou abaixo da escala atômica, tais como moléculas, átomos, elétrons, prótons e partículas subatômicas, embora possa descrever fenômenos macroscópicos em alguns casos. A teoria quântica fornece descrições precisas para fenômenos como a radiação do corpo negro e as órbitas estáveis do elétron. Apesar de, na maioria dos casos, a Mecânica Quântica ser relevante para descrever sistemas microscópicos, os seus efeitos específicos não são somente perceptíveis em tal escala. Por exemplo, a explicação de fenômenos como a superfluidez e a supercondutividade só é possível se considerarmos que o comportamento microscópico da matéria é quântico. Os fenômenos estudados pela MQ têm vasta aplicação na tecnologia eletrônica como, por exemplo, o efeito túnel ou tunelamento quântico, presente em componentes eletrônicos como os diodos túnel (EISBERG; RESNICK, 1979; MÁXIMO; ALVARENGA, 2006; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003; TIPLER, 2000).

Na escala microscópica, a quantização da energia acontece sempre que uma partícula fica sujeita a algum tipo de confinamento. Essa região de confinamento e que contém um máximo de potencial é chamada de **barreira de potencial**, a qual impede uma partícula de atravessá-la para outra região (fig. 8). Alguns fenômenos nucleares ocorrem, porque o núcleo atômico é rodeado por uma barreira de potencial. Outrossim, componentes eletrônicos, como diodo de túnel, têm o seu princípio de funcionamento baseado na barreira de potencial, que está situada na interface entre semicondutores com graus de impurezas diferentes. Outro exemplo de equipamento que funciona com base neste efeito é o microscópio de tunelamento com varredura (EISBERG; RESNICIK, 1979; MÁXIMO; ALVARENGA, 2006; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003).



Figura 8: Barreira de potencial
Fonte: Semana XI (s.d.).

Considerando uma barreira de potencial como uma parede fina, se uma partícula for arremessada contra esta, com uma energia menor que a sua altura, essa partícula não conseguirá penetrar e nem a ultrapassar a parede, segundo a Física Clássica (fig. 9). Porém, diferentemente desta previsão, a partícula tem a probabilidade de penetrá-la e ultrapassá-la, conforme a física quântica, ou seja, a função de onda penetra na região proibida e, se a parede for fina, pode surgir do outro lado com um valor não nulo (fig. 10)

Esse fenômeno, denominado **efeito túnel ou tunelamento quântico**, diz respeito à probabilidade de partículas ultrapassarem uma barreira de potencial, mesmo que não tenha energia o suficiente para tal, ou seja, as partículas podem transpor um estado de energia classicamente proibido (fig. 11) (EISBERG; RESNICIK, 1979; MÁXIMO; ALVARENGA, 2006; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003).



Figura 9: Caso clássico
Fonte: Xavier (2012).

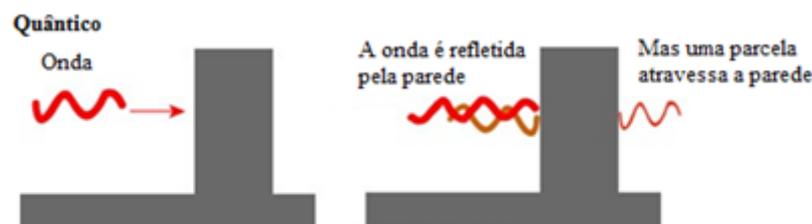


Figura 10: Tunelamento quântico
Fonte: Xavier (2012).

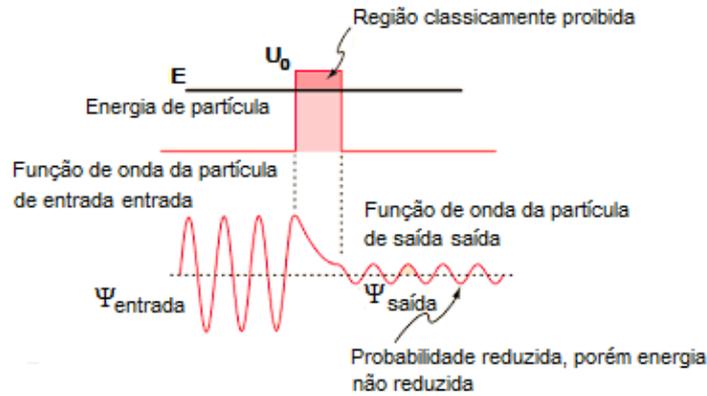


Figura 11: Tunelamento quântico
Fonte: Semana XI (s.d.).

2.4 Analogia entre o fenômeno óptico e o fenômeno quântico

A analogia entre o tunelamento quântico e a reflexão interna total frustrada se dá pelo fato de que, em ambos os casos, verifica-se uma barreira sendo transposta por partículas e ondas, respectivamente, embora não fosse possível, se analisados em perspectivas diferentes.

No ponto de vista da óptica geométrica, um raio de luz não poderia ser transmitido além da barreira óptica, pois haveria uma reflexão interna total. Porém, na perspectiva da óptica física, considerando o comportamento ondulatório da luz, essa barreira é transposta pela onda de luz, cujo fenômeno é denominado reflexão interna total frustrada. Portanto, verifica-se uma frustração quanto a uma reflexão interna total, prevista na óptica geométrica.

No ponto de vista da Física Clássica, uma partícula não consegue ultrapassar um obstáculo físico, sem que tenha energia suficiente para tal. No entanto, no fenômeno de tunelamento quântico, uma barreira de potencial é transposta por partículas, mesmo que não tenham energia suficiente para tal, o que não aconteceria se analisado na perspectiva da física clássica.

Dadas as similaridades entre os fenômenos, nos quais barreiras são transpostas por ondas e partícula nos casos clássico e quântico, nessa ordem, pode-se estabelecer uma analogia para se estudar o tunelamento quântico a partir da reflexão interna total frustrada (fig.12 e fig.13) (LEÃO, 2005; SENA; OLIVEIRA; OLIVEIRA; ALCÂNTARA JÚNIOR, 2005; TELICHEVESKY, 2015).

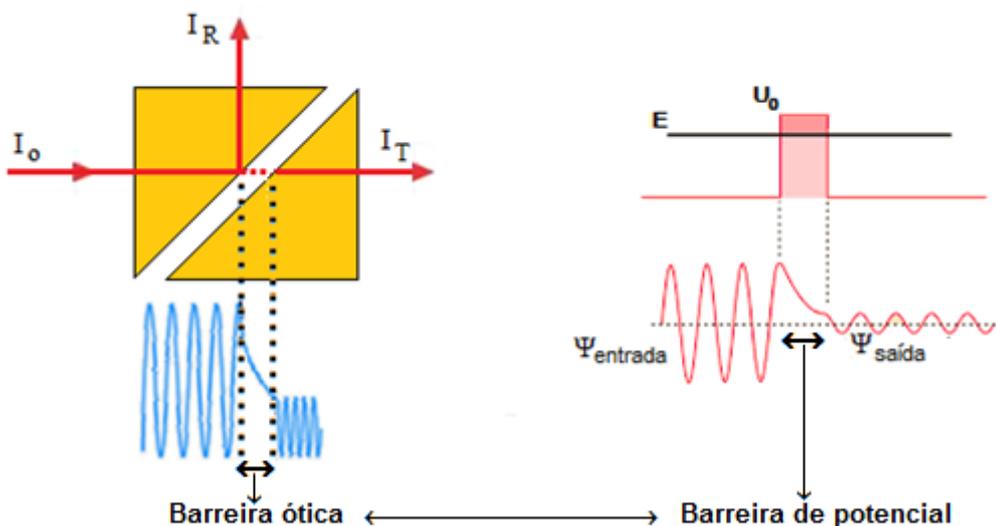


Figura 12: Reflexão interna total frustrada
Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

Figura 13: Tunelamento quântico
Fonte: Semana XI (s.d.) modificada

2.5 Sequência Didática

As sequências didáticas estão vinculadas às atividades educacionais e consistem num encadeamento de etapas ligadas entre si e têm sido cada vez mais utilizadas como recursos, para o ensino, com o objetivo de facilitar a aprendizagem. Fugir da abordagem tradicional, como estratégia de ensino, é cada vez mais comum na Educação como recurso pedagógico para tornar o ensino dinâmico, atrativo e motivador. Para tanto, faz-se necessário um planejamento com critérios, cuja sequência contenha atividades, que permitam determinar os conhecimentos prévios; atividades cujos conteúdos sejam propostos de forma significativa e funcional; atividades que provoquem um conflito cognitivo e promovam a atividade mental (ZABALA, 1998).

As aulas foram planejadas e ministradas conforme uma sequência didática, que rompeu com o sistema convencional de aulas, tendo como base a teoria da aprendizagem significativa crítica, enfatizando a importância das analogias no processo de aprendizagem (MOREIRA, 2011).

Nas aulas, foram abordados temas relacionados à Óptica, que consistiram nos fenômenos da reflexão, refração, reflexão interna total e reflexão interna total frustrada ou penetração de barreira óptica, cujos fenômenos são estudados na Física Clássica. Em seguida, foi apresentado o conceito de tunelamento quântico, cujo estudo é feito na Física Moderna. A abordagem dos fenômenos ópticos foi feita com o propósito de facilitar o entendimento do tunelamento quântico, por analogia, já que tal fenômeno encerra similaridades com a reflexão interna total frustrada. Um experimento foi utilizado para demonstrar os fenômenos ópticos estudados, dando ênfase à reflexão interna total frustrada.

Foram aplicados dois questionários aos alunos, um na primeira aula e outro na última aula. O primeiro questionário teve o propósito de sondar o nível de conhecimento que os alunos tinham sobre o fenômeno do tunelamento quântico, e o segundo, de avaliar o conhecimento adquirido, ao final da aplicação da sequência didática.

2.6 Experimento

A experimentação, associada a uma sequência didática que diferencia do sistema convencional de aulas, como estratégia do trabalho docente, ganha importância no processo de ensino e aprendizagem, na medida em que possibilita uma aprendizagem mais significativa. Portanto, buscou-se um experimento de baixo custo, de fácil construção e manuseio descomplicado, que possibilita a visualização do fenômeno óptico da reflexão interna total frustrada para estabelecer as comparações e fazer a analogia com o fenômeno do efeito túnel.

Tal experimento permite a visualização de uma barreira óptica sendo transposta por raios de luz que, por analogia, é comparado a uma barreira de potencial sendo transposta por partículas, evento que se verifica no fenômeno quântico.

O experimento não é inédito, o modelo foi encontrado na internet como experimento óptico, sugerido pelo departamento físico da Universidade de Vermont, intitulado *Frustrated Total Internal Reflection*, para demonstração do fenômeno da reflexão interna total frustrada (PhysicsatUVM The University of Vermont Frustrated Total Internal Reflection).

O experimento consiste de uma base retangular com blocos afixados sobre a mesma, construídos com madeira; um bloco prismático triangular de 45° (prisma triangular de 45°) e um bloco cilíndrico elíptico (cilindro elíptico), ambos construídos com acrílico transparente (polimetilmetacrilato); uma mola de metal; uma fonte de raio laser e uma pequena placa de cartolina na cor preta. Ver figuras 14 – 20.

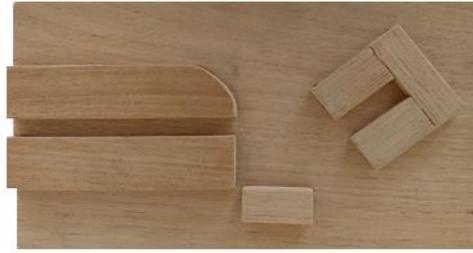


Figura 14: Base de madeira
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).



Figura 15: Mola
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).



Figura 16: Fonte de raio laser
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

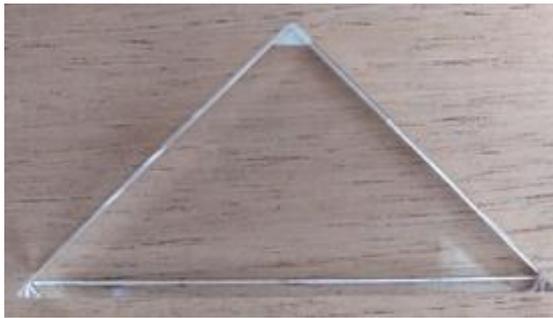


Figura 17: Prisma triangular de 45° (prisma de reflexão total)
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).



Figura 18: Cilindro elíptico
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).



Figura 19: Placa de cartolina
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).



Figura 20: Experimento montado
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Cada componente do experimento tem uma função específica, descritos a seguir.

- Base: utilizada para o encaixe dos demais componentes.
- Fonte de laser: gera o feixe de luz.
- Prisma triangular de 45° e cilindro elíptico: meios para a propagação da luz.
- Mola: permite a pressão de um sólido contra o outro.
- Placa de cartolina: permite melhor visualização do feixe de luz.

No arranjo experimental, o prisma, o cilindro e o ar entre os mesmos são os três meios pelos quais o feixe de luz se propaga, na análise do fenômeno da reflexão interna total frustrada. O prisma e o cilindro foram instalados de maneira a permitir um movimento de rotação do cilindro ao longo da face do prisma, provocando a variação da largura do filme de ar na interface entre as duas peças. A mola, ao ser comprimida, permitiu que o contato entre as faces do prisma e do cilindro ocorresse sob pressão, durante o movimento de rotação.

O feixe proveniente da fonte de laser incidiu sobre uma das faces do prisma, sofreu refração na primeira face e reflexão total na segunda face (fig. 21). Ao provocar um movimento de rotação, sem deslizamento, do cilindro sobre a face do prisma, no sentido anti-horário, pela aplicação de uma força na extremidade do mesmo, a largura do filme de ar na interface entre as peças diminuiu. Quando a largura dessa fenda atingiu a ordem de grandeza do comprimento de onda da luz, parte do feixe foi refletida e parte transmitida para o cilindro. A refração deveu-se ao desvio da onda evanescente que passou a se propagar no cilindro (fig.22).

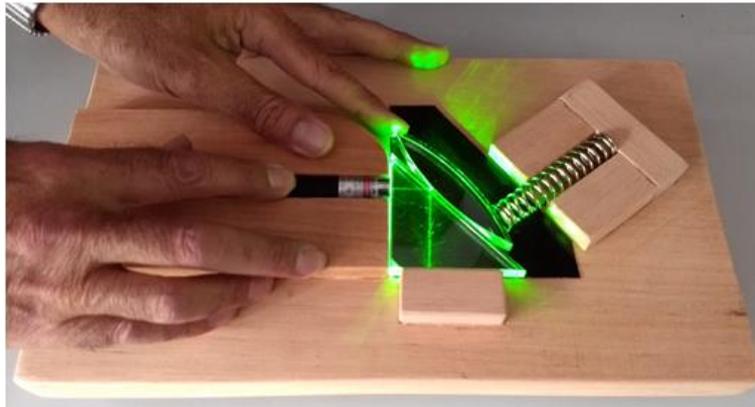


Figura 21: Reflexão interna total
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

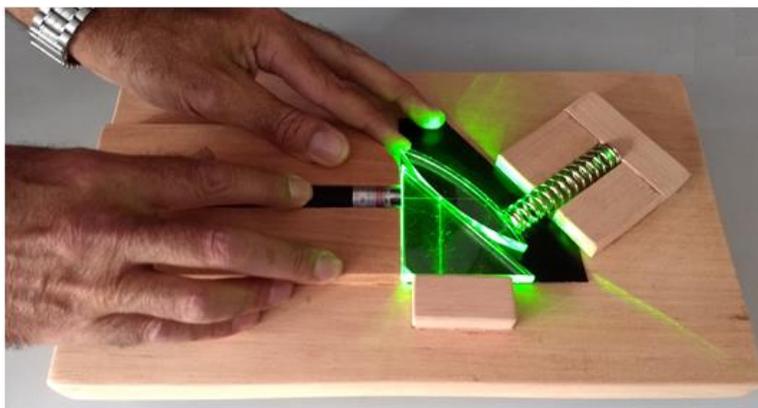


Figura 22: Reflexão interna total frustrada
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Para manusear o experimento, a base deve ser posicionada sobre uma mesa, em um plano horizontal. O prisma, o cilindro, a mola e a cartolina devem ser encaixados nos lugares apropriados e ficarem ajustados para evitar que saiam da posição durante o manuseio. Uma vez instalados os componentes, liga-se a fonte de laser e percebe-se a reflexão interna total (Fig. 23). Em seguida, pressiona-se uma das extremidades do cilindro, provocando um movimento de rotação, sem deslizamento, sobre a face do prisma, até que seja notada a transmissão do feixe para o cilindro, que é a reflexão interna total frustrada (Fig. 24).



Figura 23: Reflexão interna total
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

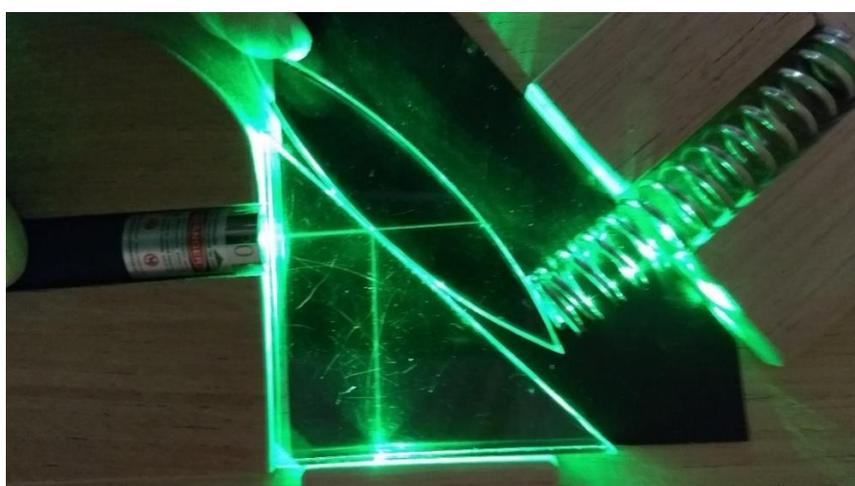


Figura 24: Reflexão interna total frustrada
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentado o percurso metodológico, descrevendo as etapas que conduziram a pesquisa, identificando a sua caracterização, o local onde o produto educacional foi aplicado, a população de amostra, os aspectos éticos, bem como descrição da proposta e a análise de dados.

3.1 PERCURSO METODOLÓGICO

A pesquisa realizada se caracteriza como qualitativa, pois se ocupou em compreender e produzir conhecimento das questões levantadas, preocupando, “portanto, com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, centrando-se na compreensão e explicação da dinâmica das relações sociais” (GERHARDT; SILVEIRA, 2009, p. 32) oriundas, nesse caso, da prática em sala de aula. Trata-se de um estudo de caso que, para Marconi e Lakatos (2011, p. 274), “refere-se ao levantamento com mais profundidade de determinado caso ou grupo humano sob todos os seus aspectos”. A pesquisa teve como base os pressupostos da teoria da aprendizagem crítica significativa, na visão de Marco Antônio Moreira e foi desenvolvida no Colégio da Polícia Militar Eraldo Tinoco, localizado na cidade de Vitória da Conquista, estado da Bahia.

A sequência didática foi aplicada a duas turmas do terceiro ano do Ensino Médio, no turno matutino, sendo uma turma composta por trinta e quatro alunos (turma A) e outra composta por trinta e sete alunos (turma B). A amostra da pesquisa foi escolhida de forma intencional pelo fato de o

currículo do terceiro ano do Ensino Médio contemplar o conteúdo de Física Moderna (noções). No entanto, é importante salientar que essa amostragem não tem a pretensão de ser representativa do universo dos alunos da referida série das escolas brasileiras.

A proposta para a introdução do ensino de Física Moderna no Ensino Médio, por meio do efeito túnel, nas turmas de terceiro ano do CPM (Colégio da Polícia Militar), consistiu numa sequência didática que rompeu com a forma tradicional de aulas, na medida em que os conceitos dos fenômenos estudados foram tratados de forma coletiva e interativa, utilizando questionários, apresentação de vídeos e atividades experimentais, que permitiram a construção de analogias entre os fenômenos estudados. Como recurso experimental foi utilizado um experimento óptico, o qual foi apresentado pelo autor ao programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte do produto educacional na qualificação do projeto.

Preliminarmente, foram apresentados os conceitos de energia e sua conservação e, em seguida, os princípios básicos da Mecânica Quântica necessários para o estudo do fenômeno do tunelamento quântico. Posteriormente, foram estudados os conceitos de Óptica, abordando o fenômeno da reflexão interna total frustrada ou penetração de barreira óptica para estabelecer uma analogia com o fenômeno do tunelamento quântico.

Os experimentos e as discussões que se seguiram permitiram as analogias e a compreensão dos fenômenos físicos, que são estudados na Mecânica Quântica, possibilitando aos alunos a familiarização com os conceitos, leis e princípios fundamentais desse ramo da Física, garantindo o entendimento dos seus significados, ou seja, a compreensão das ideias que estão por trás desses conceitos, leis e princípios. Dessa forma, os alunos obtiveram subsídios para desenvolverem habilidades de manipular essas ideias e aplicá-las nas situações concretas do cotidiano, resultando numa aprendizagem significativa e crítica. Para colocar o projeto em prática, foram necessárias cinco aulas, para cada turma, cada aula com duração de 50 min.

O desenvolvimento do projeto seguiu uma estratégia de delimitação balizada por critérios coerentes com o objetivo da pesquisa, estabelecendo a análise de um fenômeno explicado pela Física Clássica, que proporciona a busca do raciocínio abstrato do aluno, recorrendo ao uso da analogia, para a compreensão de um fenômeno estudado na Física Quântica. Em consequência, o método de análise de dados consistiu na observação e descrição da postura dos alunos diante dos conteúdos apresentados nas aulas, dos questionários aplicados, dos vídeos exibidos, das atividades experimentais realizadas e das discussões que se seguiram após cada atividade. A opção da análise de dados pelo método da observação deveu-se ao fato de esse método ser aplicável para a apreensão de comportamentos e ocorrências no momento em que eles são produzidos, sem intervenção de fatores externos, ao mesmo tempo que a observação cuidadosa dos detalhes coloca o observador no cenário de maneira que ele possa perceber o comportamento dos alunos diante dos novos conceitos, o que propicia uma interlocução mais competente (ZANELLI, 2002).

O conjunto de dados foi analisado sob diferentes abordagens. Em uma perspectiva, foi levada em consideração a mudança de postura dos alunos diante de uma nova visão do mundo, ao perceberem que as leis que se aplicam no mundo macro não se aplicam ao mundo micro. Essa mudança de postura foi percebida pela coerência dos questionamentos nas discussões ao longo da aplicação da sequência didática, e pelo interesse nos temas pertinentes à Mecânica Quântica, nas aulas que se seguiram. Sob outra perspectiva, foi feita a análise a respeito da capacidade dos alunos de estabelecerem analogias dos novos conhecimentos com conhecimentos pré-existentes, resultando em uma aprendizagem crítica por ter levado os alunos a novos questionamentos e, significativa na medida em que causou sensações e percepções, implicando em um realinhamento de valores. Essa análise foi feita a partir da verificação das respostas nos questionários aplicados, cujas respostas estavam de acordo com a teoria quântica, e pela observação do uso do conhecimento prévio, a partir de experiências do cotidiano, nas discussões dos temas em sala de aula. O fato de os alunos terem percebido a importância do conhecimento que possuem para a construção de um novo conhecimento, comprovou um realinhamento de valores.

4 RESULTADOS, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste capítulo, é feito um relato da aplicação do produto educacional assim como os resultados a partir dos dados obtidos, as conclusões e as perspectivas para a introdução de Física Moderna no Ensino Médio.

O projeto foi aplicado às turmas A e B do terceiro ano do Ensino Médio, na terceira unidade, seguindo o plano de unidades da escola, cujo conteúdo é Introdução à Física Moderna. Os alunos tinham ciência do conteúdo que seria estudado nessa Unidade, porém, não foram informados que seria utilizada nas aulas uma sequência didática baseada na analogia, fazendo uso de um experimento óptico.

4.2 APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Durante as aulas, as carteiras foram dispostas em forma de U, cuja configuração favoreceu a interação livre entre os alunos, possibilitando uma educação participativa e cooperativa, já que nesse formato os alunos têm contato visual com toda a turma. Para a especialista Célia Senna, dentre outros formatos, a disposição das carteiras em U sai na frente. “Quando o aluno vê a sala como um todo, consegue interagir mais com os colegas, o que é muito favorável para a aprendizagem” (ANNUNCIATO; SEMIS, 2019, p. 1). Já Ferrão Tavares (2000, p. 33) afirma ser importante refletir sobre a organização do espaço na sala de aula como meio de facilitar a interação.

O objetivo geral da intervenção foi proporcionar aos alunos o desenvolvimento da capacidade de fazer investigação e, a partir de analogias, compreender os fenômenos estudados na Física Quântica por meio de fenômenos conhecidos da Física Clássica, bem como as energias associadas a tais fenômenos; permitir a apreensão dos conceitos, leis e princípios fundamentais da Física, garantindo o entendimento dos seus significados, ou seja, a compreensão das ideias que estão por trás dos modelos científicos. Dessa forma, terão subsídios para desenvolverem habilidades e competências para manipular essas ideias, associá-las com conhecimentos prévios e aplicá-las nas situações concretas do cotidiano.

A metodologia utilizada foi baseada em aulas expositivas, discussões, leituras de textos e aplicação de questionários, tendo como recursos: quadro branco, sistema multimídia, textos científicos, experimento e questionários impressos. Para colocar o projeto em prática, foram necessárias cinco aulas, para cada turma, sendo denominadas aula 1, aula 2, aula 3, aula 4 e aula 5. Em ambas as turmas, foi adotado o mesmo procedimento de arrumação das carteiras e as aulas tiveram o mesmo formato.

Na escola em que foi aplicado o projeto, a sistemática para a formação das turmas segue um procedimento no qual, a cada ano, quando os alunos avançam para as séries seguintes, são formadas novas turmas, mesclando os alunos procedentes de turmas diferentes. Esse procedimento ocorre desde as séries iniciais, no Ensino Fundamental, até o terceiro ano do Ensino Médio. Tal critério permite um nivelamento do aprendizado, tendo como resultado, turmas com o mesmo nível de desempenho, em média. Na aplicação do projeto, ficou evidente esse nivelamento, pelo grau da participação individual e coletiva dos alunos, demonstrado nas discussões em sala de aula, e pelas respostas apresentadas nos questionários. Portanto, entendendo que as turmas A e B do terceiro ano possuem o mesmo perfil, no que se refere ao nível de aprendizado e conhecimento, não foi feito um relato específico das aulas ministradas para cada turma. Logo, os comentários foram genéricos, apenas destacando e particularizando o resultado da aplicação dos questionários.

A aplicação do produto educacional foi ocorrendo aula a aula, obedecendo à sequência didática que teve sua culminância nas aulas 4 e 5, quando foi feita a experimentação e estabelecida a analogia entre os fenômenos óptico e quântico.

4.2.1 Aula 01

O tema da aula 01 foi “energia e sua conservação”, uma vez que o fenômeno principal a ser estudado na Física Quântica envolve tais conceitos.

Os objetivos específicos consistiram em discutir o conceito de energia e sua conservação, identificando essas manifestações nos fenômenos na Natureza, bem como no funcionamento das máquinas e equipamentos; proporcionar aos alunos a percepção de que a conservação da energia em sistemas isolados ocorre em todos os fenômenos estudados na Física Clássica; propiciar discussão entre os alunos sobre o tema em estudo.

O conteúdo programático consistiu em energia cinética, energia potencial, energia mecânica e conservação da energia.

A aula 01 teve início com o professor questionando aos alunos sobre o conceito de energia e sua conservação e pedindo exemplos de sua manifestação nos fenômenos que acontecem com frequência no seu dia a dia. Como energia é um tema recorrente, desde a disciplina Ciência, os alunos deram respostas coerentes e exemplificaram a presença da energia no funcionamento de máquinas, equipamentos e fenômenos naturais. Na sequência, foi aberta a discussão sobre a conservação da energia mecânica, conteúdo que os alunos estudaram no primeiro ano, e a primeira lei da Termodinâmica, que estudaram no segundo ano. Percebeu-se que os alunos tinham conhecimento e segurança para discutir o tema, ficando evidente a correta assimilação do conceito de energia, mesmo entendendo que não há uma definição para tal fenômeno.

Durante as discussões, vez por outra, o professor foi solicitado para tirar alguma dúvida, ou para fazer pequenas intervenções a fim de reconduzir as discussões ao tema. Houve interesse sobre as diversas formas de energia envolvidas nos processos industriais e uma disposição particular pelas formas de energia que se manifestam nos organismos vivos, nos processos bioquímicos. Ao perceber esse interesse, os alunos foram provocados pelo professor para discutirem a energia para a vida e o papel do Sol na vida da Terra.

No fechamento das discussões, os alunos concluíram que, apesar de não haver uma definição precisa, a energia está associada aos fenômenos da Natureza sob diversas formas e que as formas de energia que se manifestam na matéria inanimada são da mesma natureza das que estão presentes nos seres vivos, desde os impulsos elétricos, aos movimentos e os processos bioquímicos. Concluíram também que para um corpo transpor uma rampa deverá estar animado com uma energia cinética maior que a energia potencial gravitacional desse corpo no ponto mais alto da rampa. Entenderam que a rampa funciona como uma barreira a ser transposta. Tal informação é importante para o entendimento da barreira de potencial, fenômeno que foi tratado na aula 2.

Percebeu-se que os alunos trazem um conhecimento prévio e conceitos formulados a partir da experiência de cada um no seu universo e nas suas experiências do cotidiano. Outrossim, são movidos pela curiosidade peculiar que é despertada pelas novidades tecnológicas, pelas notícias veiculadas na internet, nos documentários e nos filmes, o que os coloca numa posição crítica diante de novos conceitos, por mais desafiadores que sejam.

4.2.2 Aula 02

O tema da aula 02 foi “noções básicas de mecânica quântica”, já que é necessário o entendimento de alguns conceitos para o estudo do fenômeno de tunelamento quântico, tema central do projeto.

Os objetivos específicos consistiram em apresentar os conceitos fundamentais da Mecânica Quântica; apresentar as leis e teorias físicas que regem os fenômenos da Mecânica Quântica; provocar a discussão sobre o tema.

O conteúdo programático consistiu em natureza quântica da física atômica, superposição quântica, salto quântico e tunelamento quântico.

No início da aula foi aplicado o questionário A, com o objetivo de sondar o nível de informação que os alunos possuem sobre os fenômenos estudados na Física Moderna. O questionário

A continha 4 perguntas, para respostas “sim” ou “não”, cujos resultados da sua aplicação nas turmas A e B foram:

Questionário A – Turma A

1. Uma pessoa pode estar em dois lugares ao mesmo tempo?
08 alunos responderam **sim**.
26 alunos responderam **não**.
2. Um ciclista pode sair de uma posição e ir para outra, sem um deslocamento contínuo no espaço?
08 alunos responderam **sim**.
26 alunos responderam **não**.
3. Segundo a figura abaixo, um skatista, com certa velocidade, consegue transpor a rampa de 2 m de altura, sendo que, quando está no topo dessa rampa sua velocidade é próxima de zero. Poderá o skatista, ultrapassar a rampa de 4 m de altura, na sequência da manobra?
23 alunos responderam **sim**.
11 alunos responderam **não**.
4. As respostas para as perguntas anteriores valem para qualquer ente físico?
10 alunos responderam **sim**.
24 alunos responderam **não**.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

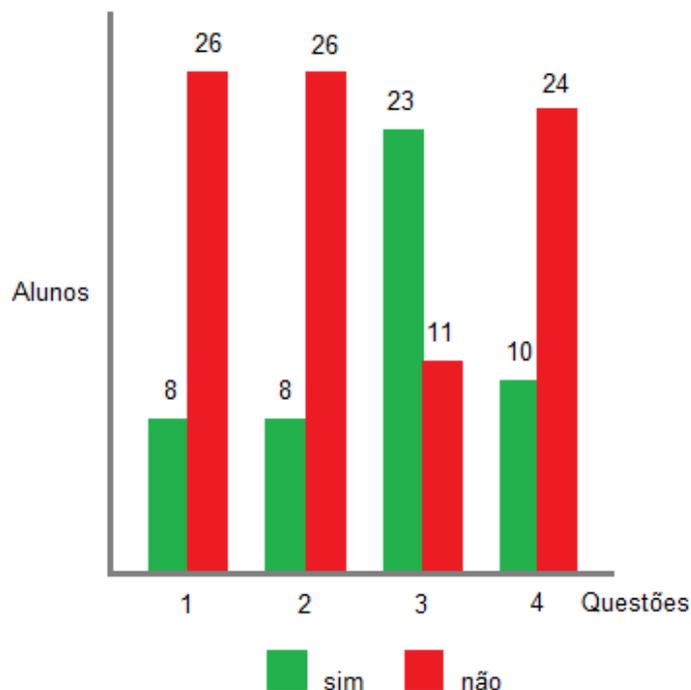


Gráfico 1 (Questionário A – Turma A)

Questionário A – Turma B

1. Uma pessoa pode estar em dois lugares ao mesmo tempo?
07 alunos responderam **sim**.
27 alunos responderam **não**.
2. Um ciclista pode sair de uma posição e ir para outra, sem um deslocamento contínuo no espaço?
10 alunos responderam **sim**.
24 alunos responderam **não**.
3. Segundo a figura abaixo, um skatista, com certa velocidade, consegue transpor a rampa de 2 m de altura, sendo que, quando está no topo dessa rampa sua velocidade é próxima de zero. Poderá o skatista, ultrapassar a rampa de 4 m de altura, na sequência da manobra?
14 alunos responderam **sim**.
20 alunos responderam **não**.
4. As respostas para as perguntas anteriores valem para qualquer ente físico?
09 alunos responderam **sim**.
25 alunos responderam **não**.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observação: houve ausência de três alunos da turma B.

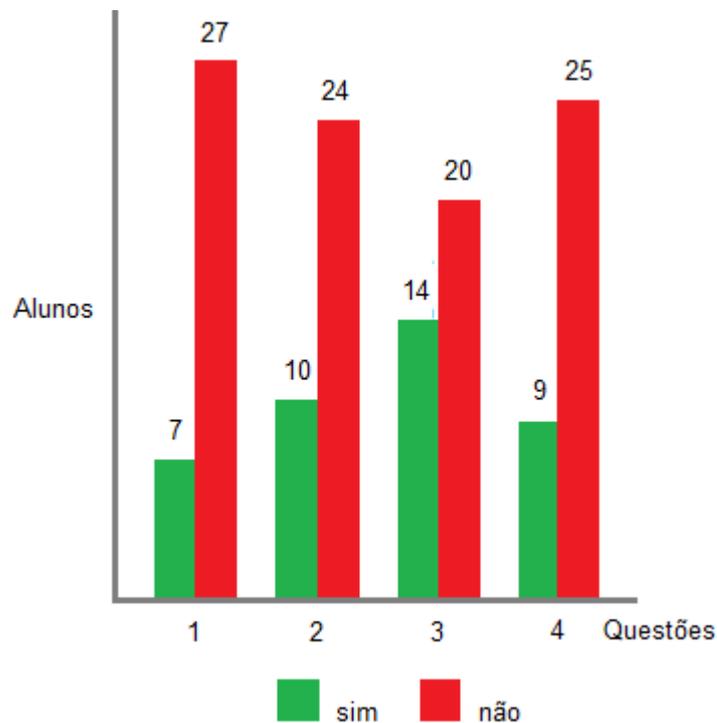


Gráfico 2 (Questionário A – Turma B)

Ao analisar o resultado da aplicação dos questionários, percebeu-se que as respostas dos alunos de ambas as turmas se equivaleram, havendo uma diferença maior apenas nas repostas da questão 3, o que corrobora o nivelamento das turmas. O resultado revelou que 66% dos alunos deram repostas com base na teoria clássica e 34% com base na teoria quântica.

Após a aplicação do questionário, foi feita uma discussão acerca das respostas do mesmo para que os alunos pudessem justificá-las. Constatou-se que os discentes responderam as questões com base no conhecimento que possuem sobre a Física Clássica, sendo que, os que arriscaram respostas coerentes com a teoria quântica, o fizeram sem possuir embasamento que justificasse a resposta.

Em seguida, foram apresentadas as noções básicas da Mecânica Quântica, destacando que tal teoria estuda os eventos no mundo micro, em que algumas leis da Mecânica Clássica não são válidas e alguns fenômenos proibidos ao mundo clássico ocorrem. Foram apresentados os fenômenos da radiação do corpo negro, quantização, efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula, experimentos da fenda única e fenda dupla, superposição quântica (gato de Schroedinger), princípio da incerteza, salto quântico, barreira de potencial e tunelamento quântico.

O tunelamento quântico foi tratado com maior ênfase, destacando que nesse fenômeno verifica-se uma barreira de potencial que, do ponto de vista da Física Clássica, uma partícula movida com energia menor que a da barreira de potencial não conseguiria ultrapassá-la. No entanto, confirma-se que ela tem a probabilidade de romper essa barreira e ultrapassá-la, mesmo sem energia suficiente para tal.

Foi exibido um vídeo intitulado “Entendendo o Universo - Dupla Fenda (Mecânica Quântica)” (DESPERTANDO, 2015) para ilustrar o experimento de fenda única e fenda dupla, e outro para demonstrar o fenômeno de superposição quântica com o experimento mental “o gato de Schrödinger” (PARA NÃO ESQUECER, 2015), sendo os alunos informados que tal experimento trata-se de uma experiência imaginária.

Por ilustrar melhor os fenômenos, a exibição dos vídeos foi fundamental para o entendimento dos fenômenos da dualidade onda partícula e do emaranhamento quântico ou superposição quântica.

Durante as discussões, percebeu-se que todos os alunos tinham ouvido falar da teoria quântica, mas apenas onze alunos tinham um pequeno conhecimento acerca dessa teoria, adquirido em filmes de ficção, vídeos da internet e leituras, porém, muito superficial. Percebeu-se também que os alunos faziam alguma confusão com relatividade e quântica. Para eles, essas duas áreas tratavam dos mesmos fenômenos. Foi explicado que a teoria quântica trata do muito pequeno e a teoria da relatividade do muito rápido.

Ao final das discussões, verificou-se o despertar do interesse dos alunos pela teoria quântica, sobretudo quando tomaram conhecimento de que os fenômenos estudados nesse ramo da Física estão aplicados nas tecnologias eletrônicas atuais.

Em ambas as turmas, as discussões tiveram os mesmos resultados, com alguma diferença no número de alunos que possuíam algum conhecimento sobre a teoria quântica. Na turma A, cinco alunos declararam que tinham assistido a filmes e tinham lido algo a respeito da teoria quântica. Esse número foi de seis alunos na turma B. Portanto, notou-se uma equivalência entre as duas turmas, nesse aspecto.

4.2.3 Aula 03

Os temas da aula 03 foram “fenômenos de reflexão e refração da luz”, cujo estudo é fundamental para a realização do experimento óptico, bem como para a analogia com o fenômeno de tunelamento quântico.

Os objetivos específicos foram: interpretar os fenômenos de refração, reflexão, reflexão interna total e reflexão interna total frustrada da luz.

O conteúdo programático consistiu em reflexão, reflexão interna total e reflexão interna total frustrada da luz.

Como os fenômenos da refração e da reflexão foram estudados no segundo ano, os alunos tinham conhecimento sobre o assunto, o que propiciou intensa participação nas discussões, durante a exposição dos conteúdos.

Após as discussões sobre a reflexão e refração da luz, foi apresentado o fenômeno da reflexão interna total frustrada. Tal fenômeno, por não ser tratado no Ensino Médio, não era conhecido dos alunos, o que causou dúvidas e curiosidade. Foi explicado que nesse fenômeno a luz assume

comportamento ondulatório, atravessando uma barreira óptica, sendo transmitida para um terceiro meio por uma onda chamada onda evanescente. Por terem sido exibidos vídeos sobre o experimento da fenda dupla, na aula anterior, não houve dificuldades para o entendimento do comportamento ondulatório da luz.

4.2.4 Aula 04

O conteúdo programático das aulas 03 e 04 foi o mesmo, cujos temas, que tiveram uma abordagem teórica na aula 03, foram trabalhados de forma experimental na aula 04.

Os objetivos específicos compreenderam em demonstrar, experimentalmente, a reflexão interna total e a reflexão interna total frustrada da luz.

Com as carteiras dispostas em formato de U e o arranjo experimental colocado sobre uma mesa, numa posição onde todos os alunos pudessem visualizá-lo, iniciou-se a aula com a explicação sobre os componentes do experimento. Inicialmente, foram mostradas, com a ajuda do projetor, as peças que compõem o arranjo experimental e apresentado o procedimento para a montagem do mesmo. Foi explicado que o arranjo consiste num experimento óptico montado sobre uma base de madeira, composto por dois sólidos geométricos de acrílico transparente, sendo um em forma de prisma e outro em forma de cilindro elíptico, uma fonte de raio laser e uma mola para pressionar um sólido contra o outro. Em seguida, foram formados grupos de cinco alunos para montarem o arranjo experimental, seguindo o procedimento e as orientações do professor. Com o arranjo experimental montado, cada grupo realizou o experimento, reproduzindo os fenômenos de refração, reflexão, reflexão interna total e reflexão interna total frustrada. A cada equipe, foi solicitada a explicação para o fenômeno da reflexão interna total frustrada enquanto a experiência era realizada.

Os alunos foram chamados à atenção para identificarem a barreira óptica, que provoca a reflexão interna total da luz e o rompimento dessa barreira na reflexão interna total frustrada, detalhe fundamental para o estabelecimento da analogia com o fenômeno do tunelamento quântico, no qual se verifica uma barreira de potencial.

Houve grande interesse dos alunos no manuseio do experimento e um fascínio por visualizarem os fenômenos ópticos, os quais foram sendo identificados e para os quais deram explicações bem coerentes com o que aprenderam nas aulas anteriores sobre tais fenômenos.

Os alunos ficaram à vontade para repetirem o experimento, com a mínima intervenção do professor, o qual ficou apenas observando as discussões que ocorriam entre eles, fazendo pequenas intervenções, apenas quando solicitado ou quando era percebido algum equívoco ou dificuldades na realização do experimento.

Ao final da aula, os alunos discutiram os fenômenos observados e elogiaram o experimento como instrumento que reproduziu com bastante clareza os fenômenos ópticos estudados na teoria.

4.2.5 Aula 05

Os temas da aula 05 foram “reflexão interna total frustrada e tunelamento quântico”, fenômenos que são confrontados para ser estabelecida a analogia entre eles.

Os objetivos específicos compreenderam em discutir sobre o tunelamento quântico, fazendo uma analogia com a reflexão interna total frustrada; aplicar um questionário sobre a analogia entre o fenômeno da reflexão interna total frustrada e o tunelamento quântico; analisar a relação teoria e prática promovida a partir dos experimentos e da sequência didática utilizada.

Os conteúdos programáticos consistiram em reflexão interna total frustrada e tunelamento quântico.

Na aula 02, quando foram apresentadas as noções de Mecânica Quântica, o fenômeno do tunelamento quântico foi abordado de forma superficial. Na aula 05, o tema foi retomado de forma mais aprofundada, agora fazendo uma analogia entre a reflexão interna total frustrada e o tunelamento quântico, comparando a barreira óptica com a barreira de potencial existente nos dois fenômenos, respectivamente.

O fato de os alunos terem visualizado os efeitos ópticos da reflexão interna total frustrada no experimento da aula 04, facilitou sobremaneira a compreensão do tunelamento quântico com o auxílio da analogia estabelecida entre os dois fenômenos, que guardam entre si a similaridade das barreiras.

Foi aplicado o questionário B com as mesmas perguntas do questionário A, com o objetivo de perceber se houve mudança de postura dos alunos após as aulas nas quais foi utilizada a sequência didática baseada na analogia, cujos resultados da sua aplicação nas turmas A e B foram:

Resultado da aplicação do questionário B – Turma A

1. Uma pessoa pode estar em dois lugares ao mesmo tempo?
31 alunos responderam **não**.
2. Um ciclista pode sair de uma posição e ir para outra, sem um deslocamento contínuo no espaço?
31 alunos responderam **não**.
3. Segundo a figura abaixo, um skatista, com certa velocidade, consegue transpor a rampa de 2 m de altura, sendo que, quando está no topo dessa rampa sua velocidade é próxima de zero. Poderá o skatista, ultrapassar a rampa de 4 m de altura, na sequência da manobra?
31 alunos responderam **não**.
4. As respostas para as perguntas anteriores valem para qualquer ente físico?
31 alunos responderam **não**.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observação: houve ausência de três alunos da turma A.

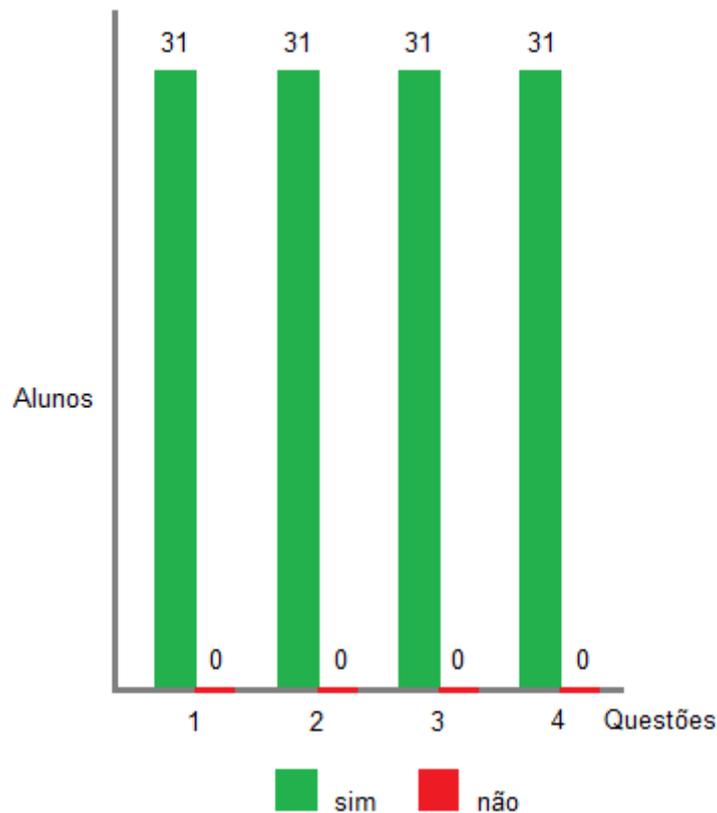


Gráfico 3 (Questionário B – Turma A)

Resultado da aplicação do questionário B – Turma B

1. Uma pessoa pode estar em dois lugares ao mesmo tempo?
31 alunos responderam **não**.
2. Um ciclista pode sair de uma posição e ir para outra, sem um deslocamento contínuo no espaço?
31 alunos responderam **não**.
3. Segundo a figura abaixo, um skatista, com certa velocidade, consegue transpor a rampa de 2 m de altura, sendo que, quando está no topo dessa rampa sua velocidade é próxima de zero. Poderá o skatista, ultrapassar a rampa de 4 m de altura, na sequência da manobra?
31 alunos responderam **não**.
4. As respostas para as perguntas anteriores valem para qualquer ente físico?
30 alunos responderam **não**.
01 aluno respondeu **sim**.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observação: houve ausência de seis alunos da turma B.

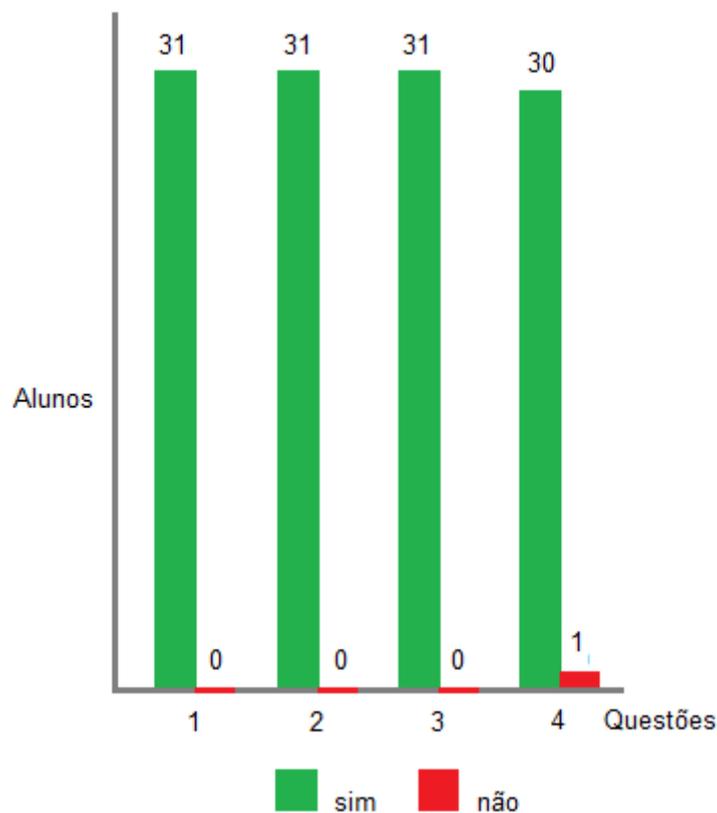


Gráfico 4 (Questionário B – Turma B)

O resultado da aplicação do questionário B revela a mudança de perspectiva dos alunos após o estudo do fenômeno de tunelamento quântico, depois de compará-lo com a reflexão interna total frustrada. Percebeu-se que as respostas dos alunos de ambas as turmas se equivaleram, pois apenas a resposta de um aluno, na questão 4, destoou das demais, o que confirma o nivelamento das turmas.

Na discussão que se seguiu à aplicação do questionário B, percebeu-se que os alunos responderam as questões com base no conhecimento que adquiriram após as aulas, tendo como fundamento e as noções da Mecânica Quântica e não mais da Física Clássica.

Após a discussão sobre o questionário B, foi aplicado o questionário C, para que os alunos pudessem avaliar a sequência didática baseada na analogia utilizada nas aulas, com a finalidade de se estimar a eficiência e a aplicabilidade dessa proposta didática.

Resultado da aplicação do questionário C – Turma A

1. Você entendeu o fenômeno óptico da reflexão interna total?
31 alunos responderam **sim**.
2. Você entendeu o fenômeno da reflexão interna total frustrada?
30 alunos responderam **sim**.
01 alunos responderam **não**.
3. Você entendeu o fenômeno de tunelamento quântico?
31 alunos responderam **sim**.
4. A analogia feita entre os fenômenos do tunelamento quântico e da reflexão interna total frustrada facilitou o entendimento do primeiro fenômeno?
28 alunos responderam **sim**.
03 alunos responderam **não**.
5. Você acha válido o uso da analogia para entender outros fenômenos da Física?
31 alunos responderam **sim**.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observação: houve ausência de três alunos da turma A.

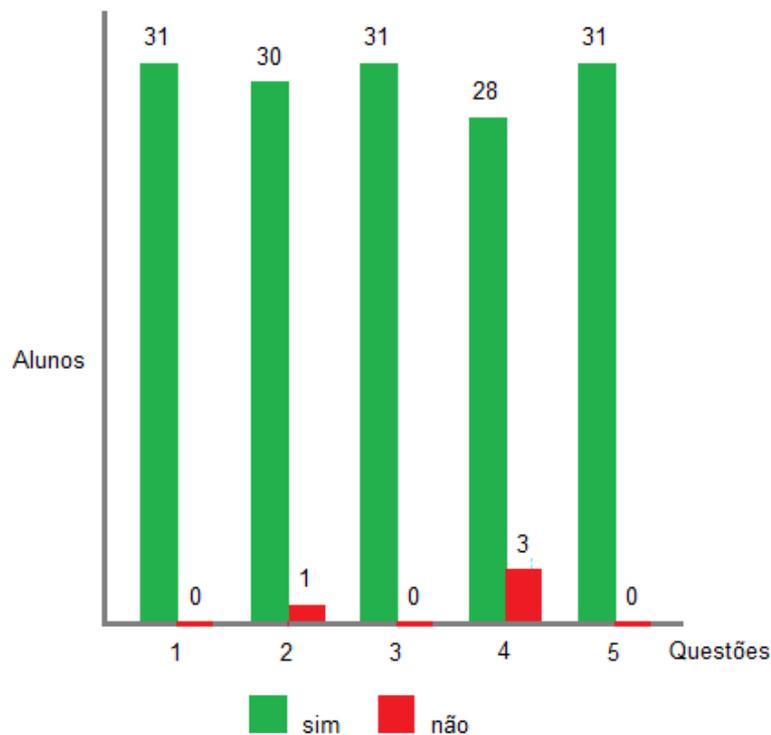


Gráfico 5 (Questionário C – Turma A)

Comentários

Aluno 1

“Facilitou a compreensão e me ajudou a não esquecer, devido os exemplos e as comparações entre os fenômenos”.

Aluno 2

“O uso da analogia facilitou muito no entendimento pois o mundo clássico é mais conhecido que o mundo quântico”.

Aluno 3

“As aulas interativas, com a utilização de experimento, facilitam a compreensão do conteúdo abordado. Também, a utilização de slides com imagens e textos ajuda na assimilação dos conteúdos”.

Aluno 4

“As analogias entre os fenômenos estudados ajudaram na compreensão dos mesmos.”

Aluno 5

“Com as comparações entre os fenômenos da Quântica e da Física Clássica, a compreensão fica facilitada.”

Aluno 6

“O experimento e as analogias foram determinantes para que eu pudesse entender o fenômeno quântico.”

Resultado da aplicação do questionário C – Turma B

- | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Você entendeu o fenômeno óptico da reflexão interna total?
32 alunos responderam sim. 2. Você entendeu o fenômeno da reflexão interna total frustrada?
32 alunos responderam sim. 3. Você entendeu o fenômeno de tunelamento quântico?
32 alunos responderam sim. 4. A analogia feita entre os fenômenos do tunelamento quântico e da reflexão interna total frustrada facilitou o entendimento do primeiro fenômeno?
32 alunos responderam sim. 5. Você acha válido o uso da analogia para entender outros fenômenos da Física?
32 alunos responderam sim. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observação: houve ausência de cinco alunos da turma B.

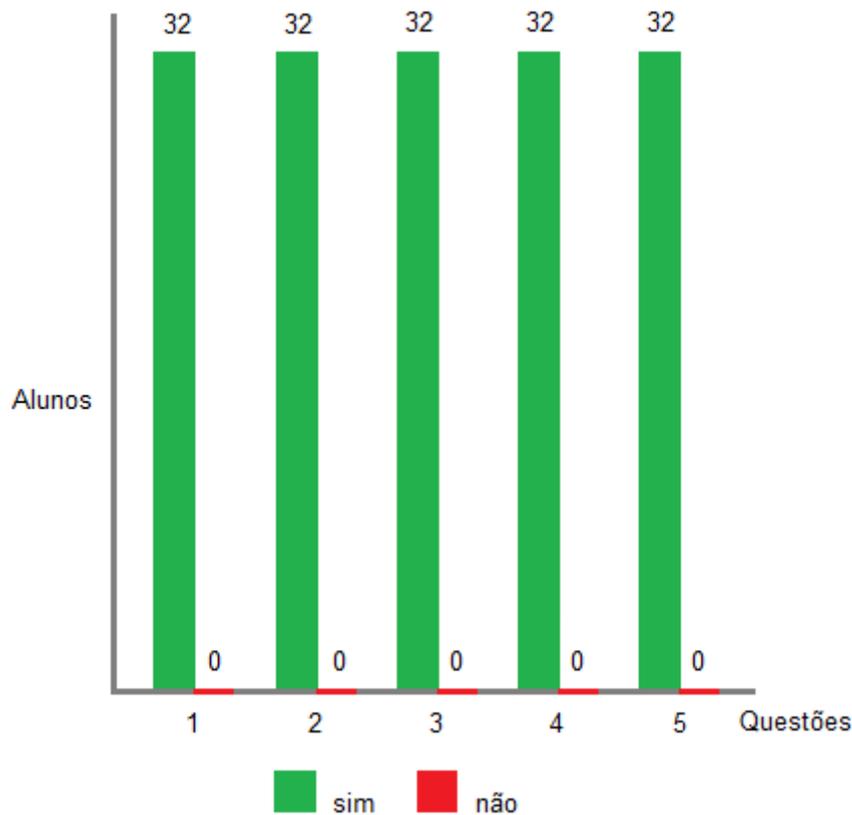


Gráfico 6 (Questionário C – Turma B)

Comentários

Aluno 1

“Com esse método, além de ampliar meus conhecimentos, facilitou a compreensão de assuntos de difícil entendimento”.

Aluno 2

“Aumentou o meu conhecimento sobre o assunto”.

Aluno 3

“Com a aula prática que tivemos em sala de aula, nosso conhecimento foi aprimorado, facilitando a compreensão do assunto”.

Aluno 4

“Sem o uso de analogias, o entendimento desses fenômenos seria dificultado uma vez que pareceriam irreais”.

Aluno 5

“Através do experimento realizado em sala de aula, sobre a reflexão total frustrada, facilitou a compreensão da mesma; as analogias feitas contribuíram para entendermos melhor os fenômenos físicos estudados”.

Aluno 6

“O uso das analogias facilitou e contribuiu para a internalização do conteúdo”.

Aluno 7

“Com a prática (exemplo da reflexão total frustrada), conseguimos ampliar o conhecimento da Física, entrando num mundo interessante de conhecimento, despertando a curiosidade para alguns fenômenos”.

Aluno 8

“Gostei muito, pois facilitou a minha difícil aprendizagem em entender Quântica”.

Diante dos resultados, concluiu-se que a utilização da sequência didática, que rompeu com os moldes tradicionais de aulas, foi de grande eficácia para a assimilação e compreensão do fenômeno de tunelamento quântico, a partir da analogia estabelecida com o fenômeno da reflexão interna total frustrada. Como consequência, pode-se esperar que, para outros fenômenos tratados na Física Moderna, a proposta didática apresentada poderá ser de grande utilidade no processo de ensino e aprendizagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada no trabalho uma proposta de ensino para a introdução de Física Moderna no Ensino Médio, por meio do conteúdo tunelamento quântico, utilizando a analogia entre tal fenômeno, estudado na Física Moderna, e o fenômeno da reflexão interna total frustrada, estudado na Física Clássica. Para tanto, foi desenvolvido um produto educacional cujo projeto foi apresentado ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física como recurso didático. Tal produto consistiu numa sequência didática com a utilização de um experimento.

As aulas ocorreram de forma a proporcionar uma interação entre alunos e professor, implicando na construção de conceitos e discussões, ao passo que a experimentação permitiu a analogia entre os fenômenos estudados. A sequência didática teve como fundamento o uso das analogias, tendo como subsídios artigos publicados em revistas especializadas em Ensino de Física, em publicações de autores da Educação, porém tendo como pressuposto teórico principal a “aprendizagem significativa e crítica” de Marco Antonio Moreira.

A utilização da sequência didática, que rompeu com a forma tradicional de aulas expositivas, provocou uma mudança na rotina dos alunos, estimulando-os a uma participação mais efetiva nas aulas, suscitando discussões acerca dos temas abordados. À medida que as aulas transcorreram, com a apresentação e a discussão dos fenômenos, os alunos foram internalizando os novos conceitos da Física Moderna, paulatinamente. A utilização das analogias entre o fenômeno óptico e o fenômeno quântico facilitou a compreensão do modelo do efeito túnel, tornando-o mais perceptível, corroborando às ideias de Moreira (2011) quando ressalta que o subsunçor permite ao aluno dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado. No caso estudado, o subsunçor consistiu na reflexão interna total frustrada e o novo conhecimento, o efeito túnel, tendo como resultado dessa interação de conhecimentos uma aprendizagem significativa.

Ao serem realizados os experimentos, os alunos identificaram os fenômenos ópticos estudados e comprovaram a similaridade entre a reflexão interna total frustrada e o tunelamento quântico. O entusiasmo e o interesse dos alunos pelo experimento validaram a utilização da experimentação como recurso didático a ser utilizado na metodologia de ensino de Física. Outrossim, pode-se inferir que os alunos desenvolveram habilidades relativas às analogias entre os fenômenos estudados por meio da experimentação. Portanto, o objetivo foi alcançado, pois mostrou, por meio do fenômeno de tunelamento quântico, que há uma diferença de perspectiva de mundo entre os fenômenos macroscópicos, aqueles que são vivenciados no dia a dia no nosso mundo, cuja descrição de seus sistemas é bem-sucedida pelas teorias clássicas, e aqueles que são abordados na Física Moderna, e que são tratados com modelos matemáticos estatísticos.

O resultado da aplicação do produto educacional evidenciou a sua importância no ensino de Física Moderna e correspondeu às expectativas, não apenas pelo que revelaram as respostas nos últimos questionários aplicados, mas, sobretudo, pela qualidade das discussões em sala de aulas, o que permitiu a construção eficiente e coerente do conhecimento, implicando numa aprendizagem crítica e significativa. A constatação de que houve a compreensão do fenômeno quântico, a partir da analogia com o fenômeno clássico, evidencia que o problema da pesquisa foi respondido.

No decorrer do projeto, todas as perguntas pertinentes aos temas estudados foram respondidas ao nível de entendimento dos alunos, no contexto de Ensino Médio. Quanto aos limites do trabalho e

da aplicação da sequência didática, não foram identificados pontos que poderiam ter ido além, que ficaram abaixo das expectativas ou que tomaram rumos diferentes da proposta original.

Pelos resultados apresentados, considera-se que o produto educacional poderá ser aplicado em qualquer turma de terceiro ano do Ensino Médio. O experimento pode ser utilizado para aulas que abordam temas diversos como a reflexão e refração da luz, dualidade onda-partícula e conservação da energia.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. **Curso de Física Volume 2**. 6. Ed. São Paulo, Ed. Scipione, 2006.

ANNUNCIATO, Pedro; SEMIS, Laís. Qual é a melhor forma de organizar as carteiras na sala de aula? *Jornalismo. Nova Escola*, 2018. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/11093/qual-e-a-melhor-forma-de-organizar-as-carteiras-na-sala-de-aula>. Acesso em: 10 dez. 2022.

BECKER, F. **Educação e construção do conhecimento**. Porto Alegre, Artmed, 2001.

BOOTBLOCK Bios Info. **Fibras Óptica**.

COSTA, L. G.; BARROS, M. Al. O ensino da física no Brasil: problemas e desafios. In: XII Congresso Nacional de Educação – EDUCERE. PUC PR 26 a 29/10/2015. **Anais...** 2015.

DESPERTANDO. **Entendendo o Universo - Dupla Fenda (Mecânica Quântica)**. 6'18''. 2015. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=UOMnwnS_MPo&feature=youtu.be. Acesso em ago. 2017.

EISBERG, R. M., RESNICK, R., **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas**. Editora Campus, 1979.

FERRÃO TAVARES, C. **Os Media e a aprendizagem**. Lisboa: Universidade Aberta, 2000.

FEYNMAN, R. P. **Lições de Física**. Edição definitiva, Porto Alegre, RS: Bookman, 2008 vol. 3.

GASPAR, A. **Física**. São Paulo, 1º Ed. Ática, 2006.

GASPAR, A.; MONTEIRO, Isabel Cristina de Castro. **Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vigotski**. Unesp – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Brasil http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol10/n2/v10_n2_a5.htm. Acesso em set. 2017.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Orgs.). **Métodos de pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GILMORE, R. **Alice no País do Quantum: a física ao alcance e todos**. Revisão técnica Ildeu de Castro Moreira. – Rio de Janeiro: Zahar, 1998.

GRECA I. M. **Construindo significados em mecânica quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de Física geral, IF-UFRGS, Porto Alegre, Tese de doutoramento (2000)**.

- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigações em ensino de ciências**. Porto Alegre. Vol. 6, n. 1 (jan./abr. 2001), p. 29-56, 2001.
- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 4, p. 444-457, 2001.
- GRAF: **Grupo De Reelaboração Do Ensino De Física**. Editora da Universidade de São Paulo, (5ª Ed) – São Paulo, 2005.
- GRAF: **Grupo de Reelaboração do Ensino de Física**. Vol. 1, 2 e 3. Editora EDUSP, 2000.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2003 vol. 4.
- LEÃO, M. R. M., F 809 – **Instrumentação para Ensino Projeto: Reflexão Interna Total Frustrada ou Penetração de Barreira Óptica**. 2005.
- MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia Científica**. 5ªed. São Paulo: Atlas, 2011.
- MARTINS, I.; OGBORN, J.; KRESS, G. **Explicando uma Explicação**. Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências Volume 01 / N número 1 – setembro de 1999.
- 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. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. 258 p.
- MOREIRA, M. A., MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa**; a teoria de David Ausubel. São Paulo: Moraes, 1982.
- MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa Crítica**. Instituto de Física da UFRGS. Versão revisada e estendida de conferência proferida no III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Lisboa (Peniche), 11 a 15 de setembro de 2000. Publicada nas Atas desse Encontro, pp. 33-45, com o título original de Aprendizagem significativa subversiva. Publicada também em *Indivisa*, Boletín de Estudios e Investigación, nº 6, pp. 83-101, 2005, com o título Aprendizaje Significativo Crítico. 1ª edição, em formato de livro, 2005; 2ª edição 2010; ISBN 85-904420-7-1.
- MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa? Aula Inaugural do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais, Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 23 de abril de 2010. Aceito para publicação, **Qurriculum**, La Laguna, Espanha, 2012.
- MOREIRA, M. A., Unidades de ensino potencialmente significativa – UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, V1, n.2, 2011.
- MUSEU das Comunicações. **Reflexão Interna Total**. Disponível em: http://macao.communications.museum/por/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_8_4_TotalInternalReflection.html. Acesso em jul. 2017.

OLIVEIRA, F. F. de; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. Sc. Física moderna no Ensino Médio: o que dizem os professores. **Rev. Bras. Ensino Fís.** vol.29, n.3, pp.447-454. 2007.

OSTERMANN, F. e 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, 2000.

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A.; **Tópicos de Física Contemporânea na Escola Média**: um Estudo com a Técnica Delphi; In: Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física, 6, 1998, Florianópolis. Atas... Florianópolis, Imprensa Universitária da UFSC, 1998.

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, 2016.

PANTOJA, G. C. F. **Sobre o Ensino do Conceito de Evolução Temporal em Mecânica Quântica**. 2011. 269fls. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física.) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

PANTOJA, G. C. F.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 3, 2011.

PARA NÃO ESQUECER. **O gato de Schrödinger**. 4’39’’. 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QhgBo-eTjfg&feature=youtu.be>. Acesso em: ago. de 2017.

PHYSICSATUVM. **The University of Vermont. Frustrated Total Internal Reflection** Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=VaDA4k_68QI. Acesso em jan. 2017

REZENDE JUNIOR, M. F.; CRUZ, F. F. de S. **Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**: do Consenso de Temas à Elaboração de Propostas. IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2003.

REZENDE JR, M. F. **Fenômenos e a Introdução de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**. 2001. 180f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SBPC - Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. **Os 20 maiores problemas a enfrentar para melhorar o ensino de ciências no Brasil**. Jornal da Ciência. JC e-mail 2321, de 16 de Julho de 2003.

SEMANA XI. **Equação de Schroedinger, Funções de Onda, Densidades de Probabilidade**. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fisica-4/semanaXI.htm>. Acesso em jan. 2018.

SENA, C. de O.; OLIVEIRA G. C. A.; ALCANTARA JÚNIOR, P. **Uma Demonstração Simples Sobre a Analogia Clássica do Efeito Tunelamento Quântico**. Disponível em: http://www.cienciamao.usp.br/dados/snef/_umademonstracaosimpleso.trabalho.pdf. Acesso em jul. 2017.

TELICHEVESKY, L. **Uma perspectiva sociocultural para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio**: análise das interações discursivas em uma unidade didática centrada no uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder. 2015. Dissertação (Mestrado Acadêmico em

Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ILUME – Repositório Digital. Porto Alegre, 2015.

TEIXEIRA, M. M. **Reflexão da luz**. Disponível em:
<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/reflexao-luz.htm>. Acesso em jul. de 2017.

TEIXEIRA, M. M. **Reflexão e Refração da Luz**. Disponível em:
<https://alunosonline.uol.com.br/fisica/reflexao-e-refracao-da-luz.html>. Acesso em jul. de 2017.

TIPLER, P.A. **Física**. 4ª Edição, Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2000 vol. 3;

WEBBER, M. C. M. **Inserção de Mecânica Quântica no Ensino Médio: uma proposta para professores**. 2006. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ILUME – Repositório Digital. Porto Alegre, 2006.

XAVIER, A. **Conceitos básicos de Física Quântica II**. Disponível em:
<http://eradoespirito.blogspot.com/2012/03/conceitos-basicos-de-fisica-quantica-ii.html>. Acesso em jan. 2018.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar** / Antoni Zabala; trad. Ernani F. da F. Rosa – Porto Alegre: Editora Artmed, 1998.

ZANELLI, J. C. **Pesquisa qualitativa em estudos da gestão de pessoas**. Estudos de Psicologia, v. 7, p. 79 - 88, 2002.