



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA

GABRIEL GILBERTO AGUIAR DE OLIVEIRA

**O USO DE NANOMATERIAIS NO ENSINO DE ÓPTICA: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL A PARTIR DA APRENDIZAGEM BASEADA EM
INVESTIGAÇÃO**

FORTALEZA

2026

GABRIEL GILBERTO AGUIAR DE OLIVEIRA

O USO DE NANOMATERIAIS NO ENSINO DE ÓPTICA: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL A PARTIR DA APRENDIZAGEM BASEADA EM INVESTIGAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Física (Licenciatura) do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alencar

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O47u Oliveira, Gabriel Gilberto Aguiar de.
O uso de nanomateriais no ensino de óptica : uma proposta experimental a partir da aprendizagem baseada em investigação / Gabriel Gilberto Aguiar de Oliveira. – 2026.
92 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Física, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Rafael Silva Alencar.
1. Ensino médio. 2. Aprendizagem baseada em investigação. 3. Aulas de Física. 4. Efeito Tyndall. 5. Nanomateriais. I. Título.

CDD 530

GABRIEL GILBERTO AGUIAR DE OLIVEIRA

O USO DE NANOMATERIAIS NO ENSINO DE ÓPTICA: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL A PARTIR DA APRENDIZAGEM BASEADA EM INVESTIGAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de
Licenciatura em Física do Centro de Ciências da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de licenciado em
Física

Aprovada em: 12/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael Silva Alencar (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Laís Helena e Sousa Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Ivo Fernandes Tavares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais,

por todo amor e todo carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela dádiva da vida e pela sabedoria concedida em cada etapa desta caminhada. À Virgem Maria, nossa mãe intercessora, que com seu amor maternal me amparou nos momentos de dificuldade e incerteza. A São Francisco de Assis, exemplo de humildade e perseverança, cuja inspiração me ensinou que é preciso ter fé para superar os obstáculos e alcançar os nossos objetivos de vida.

Agradeço eternamente aos meus pais, Eligênia Matias e Jhonnys Oliveira, pois eu só sou quem eu sou graças a todo esforço e sacrifício que eles fizeram para me criar e educar. Sem as palavras de carinho, as lições de vida e o cuidado delicado na minha educação que eles me proporcionaram, eu não teria conquistado nada na minha vida. Agradeço à minha avó, Eugênia Matias, que sempre cuidou de mim com muito carinho e muito amor.

Agradeço aos meus irmãos, Emmanuel Nicolas e Alão, pelos momentos divertidos e pelas brigas de irmão que sempre tivemos, e por todo companheirismo deles. Agradeço também aos meus demais familiares pelo amor e por todo o apoio ao longo da minha vida.

Especialmente, agradeço a minha namorada (e futura esposa), Letycia Erlem, por todo o carinho, amor, paciência e companheirismo em todos os momentos em que ela entrou na minha vida, pois ela me faz muito feliz e eu sou muito sortudo por tê-la no meu coração.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial, Thiago Pires, Orleans Cardoso, Adson de Sousa, Arlison Ribeiro, Joyce Duarte, Arlen Gomes, Andressa Gomes, Lucas Aragão, Matheus Aragão, Pedro Sgorla, Jailson Jefferson, Hélio de Sousa e Gabriel Sales, por todos os momentos de descontração, por todos os cafés em que discutíamos as maiores aleatoriedades e pelo valor de uma verdadeira amizade que eu tenho por eles.

Agradeço a todos os meus colegas de graduação e aos meus colegas de iniciação científica, por todo o suporte e pelas lições científicas ao longo desses cinco anos de graduação.

Agradeço a um amigo que conheci na graduação, Igor Antônio Tomás, que me ajudou muito, principalmente a transformar meus pensamentos complexos em ideias claras. Sua disponibilidade no fim da minha graduação foi muito importante.

Agradeço imensamente ao meu orientador de monografia, Prof. Dr. Rafael Silva Alencar, que sempre esteve presente para me auxiliar, seja durante a elaboração desta monografia, ou no Laboratório de Materiais 2D me explicando os fenômenos em nanoescala. Sou muito grato por toda a paciência e pela disponibilidade em me ajudar nessa reta final da graduação.

Agradeço, especialmente, ao meu primeiro orientador de iniciação científica, Prof. Dr. Leonardo Negri Furini, por me introduzir nesse mágico universo da ciência e da pesquisa científica em Física. Se hoje eu sou apaixonado pelo fazer ciência, foi graças a ele, pois me mostrou toda a beleza da física experimental (especialmente da espectroscopia Raman).

Agradeço aos meus outros orientadores de pesquisa que tive durante a graduação, Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira e Prof. Dr. Antônio Gomes de Souza Filho, que sempre me incentivaram nessa minha jornada científica e que me auxiliaram nas minhas dúvidas e nos meus problemas acadêmicos.

Agradeço à Dra. Lais Gomes Fregolente, minha antiga coorientadora de pesquisa, por sempre estar disposta a me ensinar (principalmente quando tinha muitas dúvidas em química), a me explicar cuidadosamente os procedimentos experimentais que eu realizava em laboratório, pelos “puxões de orelha” que me fez ser uma pessoa melhor e por todos os momentos divertidos que tínhamos no laboratório.

Agradeço ao meu coorientador de pesquisa, Prof. Dr. Andreij de Carvalho Gadelha, que me introduziu na ciência dos materiais bidimensionais e que sempre me auxiliou nos inúmeros problemas que eu tinha que lidar no laboratório, seja na montagem dos materiais rotacionados de MoS₂ ou me ensinando os princípios básicos de materiais bidimensionais. Se hoje pretendo desenvolver pesquisa em materiais 2D, foi pela sua ajuda e pela sua disponibilidade em me ensinar e me orientar.

Agradeço a todos os outros colegas do Laboratório de Materiais Funcionais Avançados (LaMFA), por toda a ajuda que eu tive enquanto bolsista e pelos momentos de descontração.

Agradeço a todos os meus professores da graduação, pelas valorosas lições e pela paciência na arte de ensinar.

Agradeço a todos os profissionais do Centro de Especialidades Médicas da UFC e do Hospital Universitário Walter Cantídio, em especial, ao Dr. Márcio Jacob, que sempre me ajudou com meus problemas de saúde ao longo da graduação.

Agradeço à Prof. Daniele Barroso, ao núcleo gestor (principalmente ao coordenador, Prof. Grigório) e aos alunos do segundo ano (Turma C) da EEM Eliézer de Freitas Guimarães, que possibilitaram a realização desse trabalho de monografia e se dedicaram para que eu conseguisse ter êxito na aplicação didática.

Agradeço aos membros participantes da banca examinadora, Dra. Laís Helena e Sousa Vieira e Me. Ivo Fernandes Tavares, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas sugestões de melhoria.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento das pesquisas de iniciação científica ao qual eu fui bolsista por cinco anos.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará por todo apoio e pela infraestrutura cedida durante a minha graduação.

A todos vocês, meu muito obrigado!

“O correr da vida embrulha tudo,
a vida é assim: esquenta e esfria,
aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem.”
(Guimarães Rosa)

RESUMO

O ensino de Física no Brasil, sobretudo na Educação Básica, enfrenta problemas relacionados à desmotivação dos estudantes e à desconexão dos conteúdos com a realidade social dos educandos. Diante disso, a Nanociência e Nanotecnologia (N&N) emergem como uma solução para estimular o interesse nas aulas de Física e desenvolver uma alfabetização científica. Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de uma intervenção didática usando a Aprendizagem Baseada em Investigação (ABI) como modelo didático para introduzir conceitos de N&N, fazendo conexão com os conteúdos de óptica, ao explorar o efeito Tyndall e a absorção de luz em nanopartículas de prata. A metodologia adotada é a “Pesquisa-Ação”, que utiliza métodos qualitativos. Para isso, uma transposição foi realizada com uma turma do segundo ano do Ensino Médio de uma escola pública da cidade de Caucaia (CE). Tal intervenção foi organizada em três fases: i) aplicação de uma avaliação diagnóstica pré-aula; ii) a atividade experimental baseada em um ciclo investigativo-pedagógico, em que os educandos atuaram como detetives ao analisar amostras usando lasers; iii) aplicação de uma avaliação pós-aula. Os resultados pré-aula indicaram uma compreensão fragmentada sobre a natureza da luz, todavia os resultados pós-aula revelaram um avanço expressivo, com 76,5% dos alunos compreendendo a relação da escala nanométrica com as propriedades físicas e que 64,5% assimilaram corretamente o conceito de Ressonância Plasmônica de Superfície. Portanto, evidenciou-se que a metodologia investigativa contribuiu para a alfabetização científica dos discentes e mostrou-se como uma estratégia eficaz para despertar o interesse dos alunos na disciplina de Física.

Palavras-chave: ensino médio; aprendizagem baseada em investigação; aulas de física; efeito Tyndall; nanomateriais.

ABSTRACT

Physics education in Brazil, especially in basic education, faces problems related to student demotivation and a disconnect between the content and the students' social reality. In this context, Nanoscience and Nanotechnology (N&N) emerge as a solution to stimulate interest in physics classes and develop scientific literacy. This work aims to analyze the application of a didactic intervention using Inquiry-Based Learning (IBL) as a didactic model to introduce N&N concepts, connecting them to optics content by exploring the Tyndall effect and light absorption in silver nanoparticles. The methodology adopted is "Action Research," which uses qualitative methods. To this end, a transposition was carried out with a second-year high school class in a public school in the city of Caucaia (CE). This intervention was organized in three phases: i) application of a pre-class diagnostic assessment; ii) an experimental activity based on an investigative-pedagogical cycle, in which students acted as detectives by analyzing samples using lasers; iii) application of a post-class assessment. The pre-class results indicated a fragmented understanding of the nature of light, however, the post-class results revealed significant progress, with 76.5% of students understanding the relationship between the nanometric scale and physical properties, and 64.5% correctly assimilating the concept of Surface Plasmonic Resonance. Therefore, it was evident that the investigative methodology contributed to the scientific literacy of the students and proved to be an effective strategy to spark students' interest in the subject of Physics.

Keywords: high school; inquiry-based learning; physics lessons; Tyndall effect; nanomaterials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre diferentes escalas de tamanho.....	29
Figura 2 – Princípio de funcionamento do AFM.....	31
Figura 3 – Classificação dos nanomateriais segundo sua dimensionalidade.....	32
Figura 4 – Átomos de xenônio formando a letras IBM, por STM	34
Figura 5 – Formação da cor de um objeto sob diferentes fontes de luz	38
Figura 6 – Representação da reflexão e refração de uma onda	39
Figura 7 – Campo eletromagnético produzido na região do dipolo	44
Figura 8 – Kit experimental da intervenção didática.....	66
Figura 9 – Amostras antes e depois da incidência do laser vermelho	67
Figura 10 – Incidência da luz violeta nas Amostras 1, 2, 3 e 4	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Absorção da luz em NPAg's por espectrometria no UV-Vis	45
Gráfico 2 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 3A.....	54
Gráfico 3 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 4A.....	55
Gráfico 4 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 5A.....	56
Gráfico 5 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 2B.....	59
Gráfico 6 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 3B.....	60
Gráfico 7 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 4B.....	61
Gráfico 8 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 5B.....	62
Gráfico 9 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 7B.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Respostas de alguns alunos sobre a Pergunta 1A	51
Tabela 2 – Respostas de alguns alunos sobre a Pergunta 2A	53
Tabela 3 – Respostas de alguns alunos sobre a Pergunta 1B.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABI	Aprendizagem Baseada em Investigação
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CO ₂	Dióxido de Carbono
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
WSe ₂	Disseleneto de Tungstênio
MoS ₂	Dissulfeto de Molibdênio
FMC	Física Moderna e Contemporânea
Caltech	Instituto de Tecnologia da Califórnia
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais
LSPR	<i>Localized Surface Plasmon Resonance</i>
STM	<i>Scanning Tunneling Microscopy</i>
N&N	Nanociência e Nanotecnologia
NPAg's	Nanopartículas de prata
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PCNEM	Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
SPM	<i>Scanning Probe Microscopy</i>
TAS	Teoria da Aprendizagem Significativa
UV-Vis	Ultravioleta-Visível

LISTA DE SÍMBOLOS

μ_0	Constante de permeabilidade magnética no vácuo
ϵ_m	Constante de permissividade do meio
ϵ_0	Constante de permissividade elétrica no vácuo
h	Constante de Planck
ρ	Densidade de carga elétrica
ω	Frequência angular
f	Frequência linear
ϕ	Função trabalho do efeito fotoelétrico
k	Número de onda
%	Porcentagem
σ_{abs}	Seção de choque de absorção
σ_{esp}	Seção de choque de espalhamento
σ_{ext}	Seção de choque de extinção
c	Velocidade da luz no vácuo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização da N&N no Ensino de Física	19
1.2	Justificativa	22
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivo Geral	23
2.2	Objetivos Específicos.....	23
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1	Ensino de Física no Brasil.....	24
3.2	Teorias pedagógicas abordadas	26
3.2.1	<i>A Aprendizagem Significativa de David Ausubel</i>	<i>26</i>
3.2.2	<i>A Aprendizagem Baseada em Investigação</i>	<i>27</i>
3.3	Introdução à Nanociência e Nanotecnologia	29
3.3.1	<i>Marcos históricos da N&N.....</i>	<i>32</i>
3.4	Tópicos de Óptica e de Física Moderna e Contemporânea	36
3.4.1	<i>A natureza da luz</i>	<i>36</i>
3.4.2	<i>Os fenômenos de reflexão, absorção e espalhamento da luz.....</i>	<i>37</i>
3.4.3	<i>O efeito Tyndall em nanopartículas metálicas</i>	<i>44</i>
4	METODOLOGIA.....	47
4.1	Natureza do trabalho e delineamento da pesquisa	47
4.2	Procedimentos pedagógicos e experimentais	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Análise dos resultados do formulário pré-aula	51
5.2	Análise dos resultados do formulário pós-aula	56
5.3	Percepções da intervenção pedagógica	64
6	CONCLUSÃO.....	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA PRÉ-AULA	78
	APÊNDICE B – ROTEIRO EXPERIMENTAL	79
	APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA PÓS-AULA	82
	APÊNDICE D – PLANO DE AULA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	84
	APÊNDICE E – RESPOSTAS DISCURSIVAS DA AVALIAÇÃO PRÉ-AULA	87
	APÊNDICE F – RESPOSTAS DISCURSIVAS DA AVALIAÇÃO PÓS-AULA	90

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física na educação básica vive um momento crítico, marcado pela dificuldade em conectar os conteúdos curriculares à realidade dos alunos e, conseqüentemente, em despertar seu interesse. Entre alguns aspectos responsáveis por esse desinteresse está o fato de a Física ser considerada uma disciplina simplesmente teórica e decorativa, em que os discentes apenas memorizam fórmulas e conceitos para aplicá-los em provas, sem compreender a sua relevância prática (Moreira, 2021). Contudo, abandonar essa abordagem mecanicista do ensino de Física e implementar metodologias de ensino mais dinâmicas podem ajudar a tornar o processo de ensino-aprendizagem mais fácil e lúdico para os educandos.

Nesse contexto, a Nanociência e Nanotecnologia (N&N) emergem como uma área em ascensão, impulsionada por descobertas inovadoras que impactam diretamente a sociedade, como o desenvolvimento de novos fármacos que ajudam em diversos tratamentos médicos (como nanocápsulas com nanopartículas de prata para tratamento de tumores), além de dispositivos eletrônicos em escala atômica que possuem altas taxas de processamento computacional (exemplo disso são as unidades de processamento central com litografia de 20 nm) (Antunes Filho; Backx, 2003). Apesar do grande interesse que essas novas tecnologias despertam, elas ainda não são amplamente compreendidas pelo público em geral. Dessa forma, a incorporação de conteúdos de N&N dentro da matriz curricular das Ciências da Natureza vem sendo uma excelente estratégia para reaproximar os discentes da educação científica e tecnológica, além de fazê-los compreender conceitos primordiais, antes explorados de forma muito tradicionalista nas regências de Física, Química ou Biologia.

O entendimento dos fenômenos em nanoescala requer o uso de novas abordagens pedagógicas ou de metodologias que fujam à perspectiva tradicional de ensino. Essa característica surge da natureza interdisciplinar da nanotecnologia, que integra áreas do conhecimento em Física, Química, Biologia e Ciência dos Materiais. Portanto, a utilização de metodologias ativas de ensino aliadas à implementação de abordagens pedagógicas progressistas, como a teoria cognitivista e a teoria da aprendizagem significativa, vem sendo discutidas na literatura como ferramentas motoras para guiar esse processo do ensino de Física aliado a N&N (Leonel; Lamy-Peronnet, 2013; Lima; José; Almeida, 2012). Um exemplo dessa aplicação é o uso de sequências didáticas com metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Investigação (ABI) e a Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP), em que colocam o discente como protagonista do processo de construção do seu conhecimento.

Nesse contexto, o escopo desta monografia consiste em elaborar uma intervenção pedagógica com o intuito de introduzir o universo da N&N no ensino médio regular, assim como inserir ou fortalecer as bases do ensino experimental na disciplina de Física. Para viabilizar essa proposta, adota-se a metodologia da Pesquisa-Ação, que permite ao pesquisador atuar de forma ativa e reflexiva durante todo o processo, integrando o planejamento, a ação e a análise crítica da prática educativa em um ciclo contínuo de aprimoramento (Thiollent, 2011).

Essa abordagem visa atender às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), especificamente no desenvolvimento da Competência Específica 3, que valoriza a investigação científica, mobilizando a habilidade EM13CNT301, referente à construção de questões, elaboração de hipóteses, previsões e estimativas, além da interpretação de modelos explicativos e resultados experimentais, conteúdo fundamental para o desenvolvimento científico dos educandos (Brasil, 2018). Considera-se também as habilidades EM13CNT307, que trata da análise das propriedades dos materiais para avaliar a adequação de seu uso em diferentes aplicações (industriais, cotidianas, arquitetônicas ou tecnológicas) e/ou da proposição de soluções seguras e sustentáveis considerando seu contexto local e cotidiano, e EM13CNT101, que especifica a análise e representação, com ou sem o uso de dispositivos e de aplicativos digitais específicos, das transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria, de energia e de movimento para realizar previsões sobre seus comportamentos em situações cotidianas e em processos produtivos que priorizem o desenvolvimento sustentável, o uso consciente dos recursos naturais e a preservação da vida em todas as suas formas (Brasil, 2018).

Nesse sentido, incentivar os alunos a realizarem as etapas experimentais por conta própria fomentam uma autonomia fundamental para a compreensão do conteúdo, além de aprimorar suas habilidades laboratoriais. Dessa forma, com o uso das metodologias ativas e a vivência de novos conceitos que vão além do esperado nos livros, os alunos podem se tornar os verdadeiros protagonistas nesse processo de ensino-aprendizagem.

1.1 Contextualização da N&N no Ensino de Física

A N&N constituem áreas interdisciplinares que integram conhecimentos da Física, Química e Biologia, que são disciplinas que integram a área Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Elas exploram os fenômenos em escalas nanométricas (da ordem de 10^{-9} m), onde os sistemas físicos apresentam comportamentos e propriedades que não obedecem à Física

Clássica. De fato, essas singularidades dos sistemas físicos nanométricos são propriamente descritas pela Mecânica Quântica (Roco; Mirkin; Hersam, 2010).

No contexto do ensino de Física, observa-se que os conceitos abordados em sala de aula estão, na maioria das vezes, atrelados a fenômenos macroscópicos e observáveis. Contudo, apesar de intuitivos e presentes na vivência diária dos alunos, esses conceitos por si só não asseguram o interesse ou a compreensão esperada em sala de aula (Moreira, 2018). Nesse sentido, a dificuldade dos discentes não reside na natureza dos fenômenos dito clássicos, que são ricos e passíveis de demonstrações instigantes, mas sim na predominância de uma abordagem pedagógica tradicional e preambular (Rosa; Kalhil, 2019). Logo, eles tendem a demonstrar desinteresse por tópicos repetitivos da mecânica clássica, muitas vezes vistos como banais, o que gera uma resistência ao aprendizado formal desses fenômenos.

A introdução da N&N à base curricular do Ensino Médio surge como uma alternativa promissora, visto que viabiliza a discussão de temas contemporâneos e interdisciplinares, favorecendo uma aprendizagem mais significativa dos conceitos físicos. Dessa forma, ao explorar temas como propriedades quânticas de materiais, física de semicondutores, magnetismo e óptica de nanomateriais, estimula-se o interesse e a curiosidade dos educandos, principalmente na integração dos conceitos de N&N com as definições físicas vista no currículo tradicional de maneira contextualizada, ampliando, assim, a visão que os discentes possuem da disciplina (Lima; José; Almeida, 2012).

No Brasil, a implementação desses conteúdos de N&N, sobretudo no âmbito das abordagens pedagógicas, não possui uma diretriz específica nos termos da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), embora a própria BNCC contemple conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), já que a inserção da N&N acaba dependendo substancialmente da autonomia docente e da interpretação das competências gerais, sem a garantia de que será efetivamente trabalhada em sala de aula (Monteiro, 2024; Pedrosa; Pinto, 2023). Além disso, iniciativas recentes, a partir do uso de itinerários formativos, têm demonstrado resultados promissores (Cunha Michel, 2008). Dentre as estratégias eficazes destacam-se a aprendizagem baseada em problemas/investigação, o uso de simulações computacionais e as abordagens interdisciplinares, como ferramentas que facilitam a compreensão dos conceitos de N&N no Ensino Médio.

A reforma do Ensino Médio, que foi implementada em 2022, também favoreceu a integração de conteúdos de N&N a esses itinerários formativos, articulando os conceitos de Física, Química e Biologia, que estão em consonância com a BNCC (BRASIL, 2018). Sendo assim, a introdução desses tópicos de N&N visa, além de modernizar o currículo, ampliar a

alfabetização científica. A partir do momento em que se discute temas, como nanomateriais e seus impactos ambientais ou uso de nanotecnologia em medicina ou em odontologia, os discentes tendem a desenvolver habilidades críticas para analisar riscos e benefícios dessas tecnologias.

De forma geral, a articulação dos conceitos fundamentais de Física com as aplicações da N&N conecta as inovações atuais da área ao processo de alfabetização científica no espaço escolar. Essa abordagem não só facilita o aprendizado de conceitos de Física Básica, que muitas vezes são desafiadores para os estudantes, como também amplia a compreensão dos fenômenos naturais e das aplicações tecnológicas atuais.

Os principais desafios para a integração da N&N no ensino médio estão apoiados nos seguintes aspectos: a desatualização curricular e a formação docente insuficiente (Lima; José; Almeida, 2012; Pedrosa; Pinto, 2023), a carência de infraestrutura (Vasconcelos *et al.*, 2021) e, por fim, a resistência a mudanças pedagógicas somada à carga horária reduzida. Primeiramente, é evidente que o ensino médio enfrenta problemas quanto à sua estrutura curricular e pedagógica, priorizando conteúdos clássicos da Física em detrimento de temas contemporâneos. Embora a BNCC recomende o uso de abordagens mais interdisciplinares, percebe-se que menos de 30% dos livros didáticos fazem algum tipo de referência ao conteúdo de N&N, revelando uma escassez de material pedagógico para apoio aos docentes e discentes (Pedrosa; Pinto, 2023).

Outra lacuna significativa é a formação docente insuficiente. Conforme a literatura, constata-se que 85% dos professores de Física não se sentem minimamente preparados para lecionar conteúdos de N&N, devido à ausência de formação específica durante a graduação (Lima; José; Almeida, 2012). Além disso, essa deficiência pedagógica é frequentemente agravada pela falta de capacitação continuada, resultando em aulas excessivamente teóricas e desconectadas das aplicações práticas relevantes para os discentes (Pedrosa; Pinto, 2023). Deve-se considerar ainda a carência de infraestrutura nas escolas brasileiras, sobretudo as escolas públicas, que não dispõem de laboratórios equipados para execução de experimentos simples, que no contexto do ensino de N&N, impossibilita a realização de atividades práticas que facilitariam o entendimento dos fenômenos em nanoescala (Vasconcelos *et al.*, 2021).

Por fim, desde sua reestruturação seguindo as diretrizes da BNCC, o Ensino Médio tem enfrentado desafios relativos à carga horária das Ciências da Natureza. A redução do número de aulas dessa área tem levado muitos professores a limitarem-se a conteúdos superficiais “clássicos”. Essa abordagem minimalista do ensino de Ciências, especialmente da Física, como algo apenas “essencial” e “rápido” restringe o desenvolvimento do pensamento crítico e da

capacidade de resolução de problemas entre os estudantes. Diante deste cenário, torna-se necessária a implementação de mudanças que incentivem a produção de recursos pedagógicos inovadores, uma formação docente especializada e uma melhor integração curricular, garantindo que conteúdos como N&N possam ser efetivamente utilizados como instrumento de educação científica.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento desta monografia baseia-se na relevância da N&N para a sociedade, tanto do ponto de vista científico e tecnológico quanto do educacional. A presença crescente de produtos e aplicações derivados da N&N (como dispositivos eletrônicos ou materiais inteligentes) destaca a importância de estratégias que favoreçam a compreensão desses temas pela população em geral. Além disso, tais estratégias podem contribuir para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem na disciplina de Física, fundamentais para a formação de um pensamento crítico. Dessa forma, discutir N&N no ensino médio é uma forma de garantir o direito do estudante de conhecer e refletir sobre uma área que cotidianamente revoluciona a indústria e a ciência, além de proporcionar à sociedade um modo de vida melhor.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar o uso da Aprendizagem Baseada em Investigação (ABI) como metodologia ativa em uma sequência didática na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, usando a Nanociência e Nanotecnologia como ferramenta de contextualização, a partir da análise das propriedades ópticas e do efeito Tyndall em sistemas coloidais, sendo uma estratégia pedagógica para aprimorar o entendimento de conceitos de óptica, além de estimular o senso crítico/científico dos discentes.

2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar os conhecimentos prévios dos estudantes a respeito de conteúdos como óptica, nanociência e nanotecnologia, e investigação científica, através de instrumentos avaliativos;
- Desenvolver uma sequência didática baseada na ABI, a partir da realização de experimentos que verifiquem o efeito Tyndall e a absorção de frequências específicas da luz;
- Implementar a intervenção pedagógica seguindo os ciclos da Pesquisa-Ação (planejamento, ação, observação e reflexão), avaliando o impacto da metodologia investigativa na construção do conhecimento dos discentes.
- Verificar a compreensão dos educandos sobre os fenômenos ópticos e ondulatórios apresentados durante os experimentos (espalhamento, absorção, ressonância e cores), comparando os sistemas em nanoescala com sistemas clássicos;
- Investigar a percepção dos estudantes no levantamento de hipóteses e verificar as capacidades dos discentes na discussão dos resultados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Ensino de Física no Brasil

Sabe-se que o ensino de Física no Brasil é marcado por desafios históricos e pela busca contínua por novas metodologias educacionais mais eficazes, dada a complexidade envolvida em seu ensino e nos estudos pedagógicos, sendo rotineiramente influenciado por diferentes diretrizes curriculares, com o intuito de nortear as práticas pedagógicas. Atualmente, a literatura científica indica um panorama de atenção em diversas frentes, seja na formação docente, no uso de novas abordagens pedagógicas, na infraestrutura disponível para as regências experimentais e na implementação de políticas educacionais que sejam efetivas.

Ao longo do tempo, um ponto fundamental amplamente debatido na literatura é a insistência em um método de ensino clássico, que prioriza excessivamente a memorização de fórmulas e ideias desconectadas do cotidiano dos alunos. Moreira (2018) defende que a prioridade deveria ser o entendimento das ideias e o estímulo à capacidade de questionar, em vez da mera repetição de informações (Moreira, 2018). Essa forma tradicional de ensinar contribui para a criação de uma imagem da física como uma ciência distante e difícil, separada do dia a dia, causando falta de interesse e problemas de aprendizado, como se vê em debates sobre abandono educacional e desmotivação dos alunos (Moreira, 2018).

Visando estimular novas mudanças, os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM), lançados no final dos anos 1990, almejavam ir além da divisão excessiva das matérias e encorajar um aprendizado mais conectado com a realidade (BRASIL, 2000). Na área de ensino de física, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) sugeriram o aprimoramento de capacidades que habilitassem o estudante a entender o universo físico, suas tecnologias e seus impactos na sociedade, promovendo a ligação entre as disciplinas e os contextos (BRASIL, 2000). Entretanto, a aplicação prática dessas orientações enfrentou dificuldades, como a falta de capacitação adequada dos professores, os hábitos antigos das escolas e a falta de verbas, o que causou o insucesso dessas políticas educacionais (Pena, 2000).

Com a implementação da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), foram definidos os saberes, as aptidões e as experiências fundamentais, integrando a Física ao campo das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, e procurando desenvolver o raciocínio científico e a capacitação para a pesquisa (Batista, Selton Jordan Vital; Pereira, 2023). A BNCC, por sua vez, especifica as habilidades e realça a importância de entender a essência da ciência e suas conexões com a tecnologia, a sociedade e o meio ambiente, fomentando a "alfabetização científica" (Batista, Selton Jordan Vital; Pereira, 2023). A estruturação em unidades temáticas

como Matéria e Energia, Vida, Terra e Cosmos, e o estímulo a assuntos contemporâneos transversais almejam um ensino mais exploratório e ligado à sociedade atual.

Para que as determinações curriculares dos PCNs e da BNCC se concretizem, é crucial remodelar as práticas pedagógicas. Estudos têm explorado e sugerido o uso de metodologias ativas como uma solução promissora. Logo, técnicas pedagógicas como a gamificação (uso de elementos e dinâmicas de jogos para engajar os alunos), o aprendizado baseado em projetos e a aprendizagem baseada em investigação, além do ensino colaborativo, são apontadas como formas de dar protagonismo ao aluno no aprendizado, em sintonia com a busca por um conhecimento mais relevante e conectado à realidade definida pelas diretrizes (Rosa; Kalhil, 2019).

Enquanto isso, a capacitação de professores de Física vem sendo destacada como algo essencial à Educação Básica. Alguns estudos comparativos mostram que é preciso haver uma forte ligação entre o conhecimento da matéria, a forma de ensinar e o cotidiano da escola. Também é urgente que os professores continuem aprendendo, recebendo novas ferramentas e métodos para lidar com o que é pedido nas aulas, como nas regências de Física Moderna e Contemporânea (Francisco Cachapuz; Shigunov Neto; Coelho da Silva, 2019; Rosa; Kalhil, 2019). A forma como os futuros professores percebem a BNCC, por exemplo, mostra a importância da discussão sobre esse documento entre o núcleo gestor e a comunidade escolar, para que ele seja efetivamente implementado no espaço escolar.

A infraestrutura escolar, principalmente a presença de laboratórios para a realização de experimentos, é de extrema importância. A ausência ou o uso limitado desses locais impede que os estudantes tenham experiências práticas fundamentais para compreender a teoria e desenvolver uma postura investigativa em Física, como defendem as atuais estruturas curriculares (Lira; Senna Junior, 2024). De forma semelhante, a inclusão de ferramentas digitais, que podem tornar as aulas mais interessantes e ajudar a compreender conceitos complexos, esbarra em problemas como a falta de recursos e a necessidade de capacitar os professores para usar essas ferramentas de maneira eficaz no ensino, sendo estes pontos essenciais para atingir as metas de modernização do ensino estabelecidas pela BNCC (Batista, Poliana Targino, 2020).

Além disso, estratégias, como o uso do método “Ciência, Tecnologia e Sociedade” (CTS), visam incentivar um aprendizado reflexivo e situado, em concordância com o objetivo das orientações curriculares de preparar cidadãos aptos a entender e intervir na realidade. Conforme a literatura, a perspectiva do CTS pode otimizar a atividade de ensino e favorecer um entendimento mais abrangente da ciência (Rodrigues; Oliveira; Guerra, 2024). Portanto, a

modernização do currículo, com a inserção pertinente de temas de física atual, é igualmente considerada fundamental para aproximar o discente ao ensino da ciência contemporânea, como defendido nos debates sobre a BNCC.

3.2 Teorias pedagógicas abordadas

3.2.1 A Aprendizagem Significativa de David Ausubel

David Ausubel, proponente da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), postula que a cognição no processo de aprendizagem ocorre de maneira mais eficaz quando uma nova informação se relaciona dentro da estrutura de conhecimento existente do indivíduo por um aspecto substantivo e não-arbitrário, em que tal estrutura de conhecimento é a base da estrutura cognitiva, dotada do conteúdo total das ideias de um indivíduo, possuindo organização e hierarquização (Ausubel, 1968).

O processo de aprendizagem, por definição geral, é entendido como a ancoragem de uma nova informação em conceitos preexistentes, denominados como subsunçores, que, ao passar pelo processo de assimilação, não incorpora apenas um novo significado, mas também modifica o próprio subsunçor, com características estáveis e com maior elaboração (Moreira, 1982).

Basicamente, Ausubel estabelece uma diferença da sua teoria com a aprendizagem mecânica, que consiste no processo de armazenamento de uma nova informação de forma literal e arbitrária (conhecido popularmente como memorização), com pouca ou nenhuma associação à estrutura cognitiva existente (Moreira, 1982). Embora exista uma diferença entre a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica, as formas de aprendizagem não são apresentadas como uma dicotomia para Ausubel, mas sim como uma escala gradual e ininterrupta que as conecta.

Na TAS, são apresentados dois modos de aprendizagem, um focado na recepção, de modo que o conteúdo é ensinado ao aluno em sua forma final, ou na descoberta, em que o conteúdo principal é identificado (ou descoberto) pelo próprio discente (Moreira, 1982). Vale mencionar que ambos os modos podem ser significativos (se eles forem ancorados na estrutura cognitiva) ou mecânicos (se forem apenas memorizados).

Além disso, Ausubel propõe o conceito de assimilação obliteradora, que consiste na dissociação progressiva dos subsunçores em função do tempo a partir das novas ideias que foram ancoradas no processo de aprendizagem, fazendo com que detalhes específicos sejam

esquecidos, restando apenas o subsunçor modificado (Moreira, 1982).

Outros princípios que norteiam a aprendizagem significativa são a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa, ambos propostos na organização do processo de ensino-aprendizagem. O primeiro se baseia na inclusão da disciplina a partir de ideias mais gerais que precisam ser apresentadas primeiramente e, em seguida, as especificidades ou detalhes que compõem essa ideia, enquanto na segunda existe a busca da relação entre conceitos, de forma que haja o estabelecimento entre similaridades, diferenças ou inconsistências entre eles (Moreira, 1982).

Nessa perspectiva, quando não há os subsunçores adequados, prevê-se o uso de organizadores prévios que possuem a função de “pontes cognitivas”. Ou seja, quando não há uma relação de ancoragem entre os conhecimentos prévios e as novas ideias, propõe-se a utilização de materiais introdutórios de alto nível de abstração, como os mapas conceituais, visto que são eficazes para promover os princípios de diferenciação e reconciliação (Costa Junior *et al.*, 2023).

No contexto desta monografia, a TAS é fundamental para justificar a etapa diagnóstica, ou seja, de mapear, por meio de um questionário inicial, os subsunçores indispensáveis para a compreensão do tema de nanociência a partir das propriedades ópticas de nanomateriais. Logo, conceitos de Física como ‘luz’, ‘reflexão’, ‘refração’ e ‘espalhamento’ são os subsunçores obrigatórios para a conexão com o efeito Tyndall e com as propriedades plasmônicas em nanopartículas metálicas, de maneira que, conhecendo o ponto de partida cognitivo do educando, é possível uma intervenção com conexões mais significativas.

3.2.2 *A Aprendizagem Baseada em Investigação*

Fundamentalmente, a Aprendizagem Baseada em Investigação (ABI) centra-se como uma metodologia de ensino baseada nos princípios construtivistas, em que traz o aluno para a participação ativa na construção do seu próprio conhecimento (Pedaste *et al.*, 2015). Ou seja, em vez de ser um receptor passivo de informações, o educando firma-se em uma figura de protagonismo no processo de descoberta de ideias e de relacionamento entre elas, fazendo uso do método científico como instrumento da sua investigação didática, seja por meio de experimentos e/ou de observações (Pedaste *et al.*, 2015).

Todavia, faz-se necessário diferenciar a investigação didática da investigação científica, visto que, embora a ABI use uma sistematização de métodos e práticas similares aos de pesquisadores, ela não pode ser confundida como uma espécie (ou uma forma) de trabalho

científico. Nesse sentido, uma investigação científica tem como objetivo fornecer explicações para fenômenos ou hipóteses, cuja finalidade se apoia na construção de um conhecimento genuinamente novo, enquanto a investigação didática é um instrumento pedagógico que guia os discentes para a construção de um conhecimento já explicado pela comunidade científica, no entanto seja algo inovador para esses estudantes (Zytkuewicz; Bego, 2022).

Há alguns requisitos para que o ensino seja considerado investigativo, uma vez que ele não pode ser entendido como um meio de atividades do tipo “faça você mesmo”, em que o aluno apenas segue uma série de instruções experimentais, como uma experimentação algorítmica.

Dessa forma, Carvalho (2018) aborda que o cuidado do professor com relação à elaboração do problema investigativo e a forma com que os alunos pensam a despeito dele são os dois fatores essenciais na ABI, fazendo com que o sucesso da prática pedagógica esteja condicionado à capacidade de os educandos conseguirem expor seus raciocínios ou seus argumentos, sem o medo de erros durante o processo de hipóteses (Carvalho, 2018).

O papel do professor, portanto, é o de criar condições para que os alunos pensem, falem, argumentem e escrevam sobre o que está sendo investigado, além de estruturar a sequência didática em etapas que levem os alunos a uma passagem das ditas “ações manipulativas” para as “ações intelectuais”, de maneira que o docente possa questionar ou duvidar da resolução prática da investigação por parte dos discentes (Carvalho, 2018).

Frequentemente, a literatura aborda a ABI como um ciclo de investigação, embora não haja um padrão desse ciclo em todos os trabalhos científicos que tratam da ABI. Nesse sentido, Pedaste *et al* (2015) propuseram, por meio de uma revisão sistemática, uma estrutura básica composta por cinco fases gerais: a orientação, que consiste na apresentação do problema e na discussão de ideias fundamentais; a conceituação, etapa que se baseia na formulação prévia de hipóteses acerca do problema; a investigação, que consiste na execução experimental com objetivo de compreender e tentar solucionar o problema, além de conduzir uma coleta de dados; a conclusão, etapa que se baseia nas considerações finais acerca das hipóteses desenvolvidas com base nas evidências; e a discussão, que tem como função a comunicação dos resultados e a reflexão sobre todo o processo investigativo (Pedaste *et al.*, 2015).

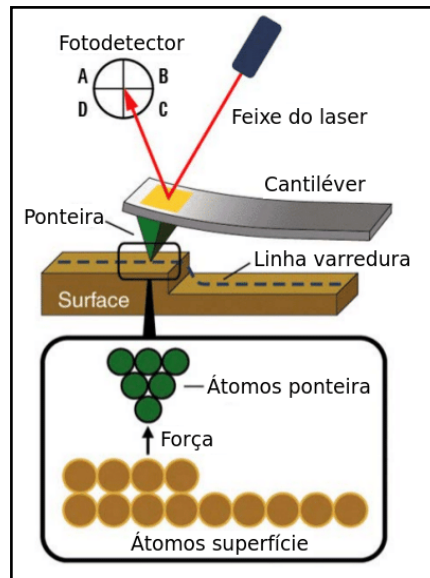
Pedaste *et al.* (2015), também, argumenta que esse ciclo não é um processo linear, pois permite a flexibilização e iteração dessas etapas, em que, por exemplo, a fase de conceituação pode permitir duas abordagens principais: um por meio de um questionamento (baseado em dados) que conduz a uma exploração, ou uma via de geração de hipótese (baseada em teoria) que leva à experimentação (Pedaste *et al.*, 2015).

em duas principais abordagens: o método “de cima para baixo” (*top-down*) e o método “de baixo para cima” (*bottom-up*). A abordagem *top-down* consiste em montar as nanoestruturas a partir de estruturas macroscópicas, comumente chamadas de “*bulk*”, por meio da redução ou remoção controlada de material até que se atinja tamanho na escala nanométrica. Técnicas como litografia e a esfoliação são exemplos da abordagem *top-down* mais comumente utilizados (Fechine; Andrade Neto; Carneiro, 2020). Por outro lado, a abordagem *bottom-up* consiste na montagem de estruturas a partir dos componentes atômicos ou moleculares, de modo que as interações físicas e químicas sejam auto-organizadas (Benetti; Watanabe, 2017; Quintili, 2012). Exemplos comuns são a síntese coloidal de nanopartículas de prata via síntese química ou o desenvolvimento de materiais bidimensionais, como o grafeno, por deposição química de vapor (CVD).

A visualização de nanoestruturas necessita de uma instrumentação física bastante complexa, uma vez que o uso de microscópios convencionais não possui resolução suficiente para essa finalidade. Para avaliar as características mecânicas e ópticas de nanomateriais, são utilizados microscópios mais avançados.

Um exemplo é a microscopia de varredura por sonda (SPM, do inglês *Scanning Probe Microscopy*), que permite escanear a superfície de um material por meio da medição das forças de interação entre uma ponta extremamente fina e a superfície do material, produzindo imagens com resolução atômica (Mori, 2014). A Figura 5 apresenta o Microscópio de Força Atômica (AFM) como uma técnica baseada em SPM. Além disso, a microscopia eletrônica, que utiliza feixes de elétrons para formar imagens, também é amplamente empregada, possibilitando a visualização de estruturas com dimensões na faixa de nanômetros.

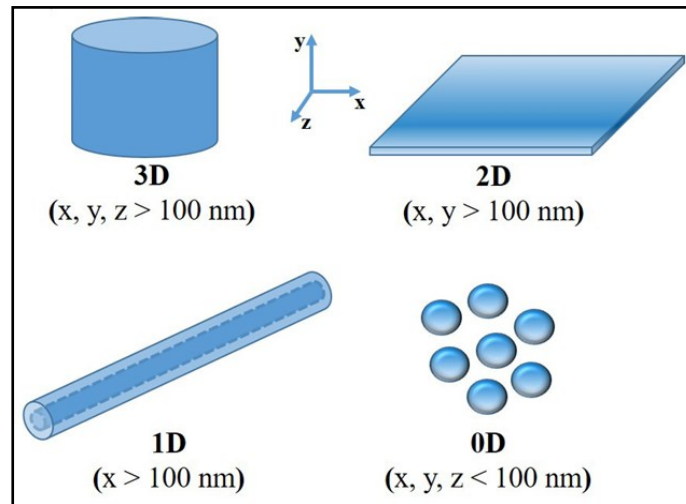
Figura 2 – Princípio de funcionamento do AFM



Fonte: Mori (2014)

Além desses aspectos, os nanomateriais podem apresentar natureza metálica, cerâmica ou polimérica, e podem assumir estrutura cristalina ou amorfa, dependendo do seu arranjo atômico (Fechine; Andrade Neto; Carneiro, 2020). A dimensionalidade é um critério a ser considerado na classificação de materiais em nanoescala. Um material é tridimensional (3D) quando suas três dimensões (x, y e z) apresentam mais de 100 nm (Fechine; Andrade Neto; Carneiro, 2020). Já os materiais bidimensionais (2D) possuem apenas duas direções (por exemplo, x e y) com mais de 100 nm, enquanto a terceira (por exemplo, a z) com dimensões abaixo desse valor. Materiais unidimensionais (1D) apresentam apenas uma dimensão maior que 100 nm, com as outras duas em escala nanométrica. Por fim, materiais zero-dimensionais (0D) possuem todas as suas dimensões inferiores a 100 nm. A Figura 6 ilustra essa classificação com base na dimensionalidade.

Figura 3 – Classificação dos nanomateriais segundo sua dimensionalidade.



Fonte: Fechine; Andrade Neto; Carneiro (2020)

Exemplos de materiais 3D incluem estruturas em *bulk*, como o grafite ou a molibdenita, que são bastante comuns na natureza. Já os materiais 2D abrangem os filmes ultrafinos, como os dicalcogenetos de metais de transição (como o MoS_2 e o WSe_2) e o grafeno (que foi o primeiro material 2D a ser isolado e amplamente estudado).

Materiais 1D incluem os nanofios e os nanotubos (em especial, os nanotubos de carbono). Por fim, os materiais 0D são representados por pontos quânticos (como os pontos quânticos de carbono) e por nanopartículas com diferentes formas e composições, sendo as de prata e ouro as mais comumente relatadas na literatura.

3.3.1 Marcos históricos da N&N

Há mais de 4000 anos, a humanidade, de forma geral, já utilizava os nanomateriais, embora tivesse total desconhecimento da base teórica associado a eles. Por exemplo, John Utynam foi o primeiro a sintetizar, em 1449, nanopartículas de ouro para a produção de vidro. Além disso, no século XVI, o médico suíço Theophrastus von Hohenheim usava essas mesmas nanopartículas de ouro para tratar pacientes que sofriam de diversas patologias (Rafique *et al.*, 2020).

Contudo, o que marcou a fundação da nanociência foi a palestra do físico e professor Richard Feynman, no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), intitulada “*There’s a Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics*” (em português, “Há Muito Espaço Lá Embaixo: Um Convite para Entrar em um Novo Campo da Física”), apresentada em 1959. Nela, Feynman afirmou que seria possível, futuramente, escrever toda a

Enciclopédia Britânica na cabeça de um alfinete (Feynman, 2011; Rafique *et al.*, 2020). Para Feynman, era possível imaginar um futuro em que se poderiam arranjar os átomos da maneira mais conveniente, sem que as leis da Física representassem um impedimento (Feynman, 2011). Ele antecipou a possibilidade de manipular átomos individualmente, o que representaria uma nova abordagem na construção de materiais em escala nanométrica.

Todavia, o termo “nanotecnologia” só passou a ser utilizado mais tarde, em 1974, pelo professor Norio Taniguchi, da Universidade de Ciência de Tóquio, em um artigo apresentado em conferência, no qual definiu a nanotecnologia como “o processamento de separação, consolidação e deformação de materiais por um átomo ou molécula” (Bayda *et al.*, 2020). Posteriormente, essa área atraiu o interesse de muitos cientistas, tornando-se muito contributiva para a indústria de semicondutores. Dito isso, para Gordon Moore, a miniaturização de componentes eletrônicos para ganho de poder computacional estava alinhada com a tendência da indústria eletrônica, que previa o contínuo encolhimento desses componentes em razão do aumento da densidade de transistores, chips utilizados em microprocessadores (Ahire *et al.*, 2022).

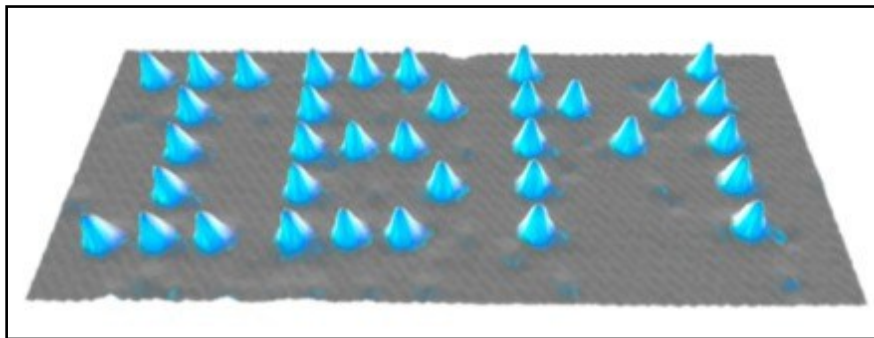
Ademais, foi o professor e pesquisador Eric Drexler que popularizou o conceito de nanotecnologia quando publicou, em 1986, o artigo “*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*” (em português, *Motores da Criação: A Próxima Era da Nanotecnologia*). O texto de Drexler introduz a ideia provocativa de “montadores” em nanoescala, isto é, máquinas capazes de construir estruturas átomo por átomo, além de incluir a possibilidade de autorreplicação (Drexler, K Eric, 1986). Além disso, Drexler, em coautoria com Peterson e Pergamit, publicou o trabalho “*Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution*” (em português, “Desbloqueando o Futuro: a Revolução da Nanotecnologia”), no qual expandiu as ideias desses montadores em nanoescala, em que os autores os denominam como “*nanobots*” (ou nanorrobôs), sendo primordial para o desenvolvimento da nanomedicina (Drexler, Eric; Peterson; Pergamit, 1991).

A invenção do Microscópio de Varredura por Tunelamento (*Scanning Tunneling Microscope* – STM) foi o que tornou viável esses ideais de manipulação atômica proposto por Drexler. Desenvolvido em 1981 por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, no laboratório da empresa IBM em Zurique (Suíça), o STM destacou-se como um dos principais avanços instrumentais do século XX, sendo fundamental para o desenvolvimento da nanotecnologia (Rafique *et al.*, 2020). O STM permite a observação de átomos em superfície condutora, produzindo imagens da topografia e da densidade eletrônica desses átomos com alta resolução (Cadioli; Salla, 2006).

A concepção do STM levou posteriormente à criação do AFM pelos mesmos

pesquisadores, em 1986. Esse instrumento foi desenvolvido com o objetivo de gerar imagens de diversos tipos de superfícies, utilizando técnicas não destrutivas, aplicando-se pouca pressão entre a ponta do instrumento e a superfície de varredura (Cadioli; Salla, 2006). Além disso, em 1990, o físico Don Eigler (pesquisador da IBM) conseguiu manipular, por meio de um STM, 35 átomos de xenônio em uma superfície de níquel para formar as letras IBM (Figura 7). Dessa forma, ele demonstrou que nanoestruturas poderiam ser construídas átomo por átomo (Bayda *et al.*, 2020). Esse feito é considerado um marco na história da nanotecnologia, pois foi a primeira vez em que átomos foram manipulados individualmente em escala nanométrica, corroborando a proposta de Drexler sobre montadores atômicos universais.

Figura 4 – Átomos de xenônio formando a letras IBM, por STM



Fonte: Bayda *et al.* (2020)

Em 1985, os pesquisadores Robert Curl, Harold Kroto e Richard Smalley sintetizaram uma outra nova forma alotrópica do carbono: o fulereno (um arranjo de 60 átomos de carbono de formato esférico, que formam um icosaedro truncado não regular de 32 faces (Santos *et al.*, 2010)). Claro que a organização atômica dos fulerenos permitem quantidades maiores do que 60 átomos agrupados, contudo, a molécula de simetria com 60 átomos é a mais abundante e mais estável, encontrado na natureza (Santos *et al.*, 2010). Tal feito agraciou esses pesquisadores com o Prêmio Nobel de Química de 1996, além de incentivar uma geração de cientistas a aprofundarem seus estudos e desenvolverem a denominada “química do carbono” (Bayda *et al.*, 2020).

No ano de 1991, seguindo a tendência da descoberta dos fulerenos, o artigo intitulado “*Helical microtubules of graphitic carbon*” (em português, “Microtubos helicoidais de carbono grafítico”), publicado na revista Nature por Sumio Iijima (físico da empresa japonesa NEC Corporation) descreveu, pela primeira vez, a síntese e as características dos nanotubos de carbono de múltiplas paredes (Chen; Wei; Xie, 2021). O trabalho de Iijima elucidou as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas desses materiais, além de gerar grande interesse

da comunidade científica, impulsionando diversas pesquisas na área de nanoestruturas de carbono, devido as particularidades desses nanotubos, como sua alta resistência mecânica e o fato de poderem apresentar propriedades metálicas ou semicondutoras sob determinadas condições (Hughes *et al.*, 2024). Posteriormente, em 1993, Iijima, com o auxílio de pesquisadores da IBM, sintetizou e descreveu pela primeira vez a dinâmica e as propriedades dos nanotubos de carbono de parede simples (Bayda *et al.*, 2020; Chen; Wei; Xie, 2021).

Outros materiais, como os “*Quantum Dots*” (em português, “Pontos Quânticos”), também fizeram parte da revolução nanotecnológica que ocorrera durante a transição do século XX para o século XXI e se tornaram impulsionadores do desenvolvimento das pesquisas em nanotecnologia nessa época, tendo aplicação na indústria eletrônica e indústria biomédica até os dias atuais (Panja; Patra, 2023).

Contudo, em 2004, os pesquisadores Andre Geim e Konstantin Novoselov conseguiram um feito inédito. Eles isolaram uma única camada de átomos de carbono, denominada grafeno, renunciando o nascimento da ciência dos materiais bidimensionais (Bayda *et al.*, 2020). O método de obtenção do grafeno de Geim e Novoselov é bastante simples e engenhoso. Ele consiste na utilização de uma fita adesiva para separar as camadas de grafeno através de esfoliações sucessivas do grafite, até a deposição de uma camada única desse material em um substrato por adesão mecânica (Geim; Novoselov, 2007).

Diante desse contexto, a obtenção do grafeno foi bastante significativa e revolucionária. Trata-se do material mais fino e mais forte da natureza, além de possuir propriedades eletrônicas bastante específicas. Além disso, acreditava-se ser impossível obter materiais cristalinos muito finos devido a uma possível instabilidade física, seja de natureza estrutural, eletrônica ou termodinâmica (Fasolino; Los; Katsnelson, 2007). O trabalho de Geim e Novoselov rendeu aos autores o Prêmio Nobel de Física de 2010

Paralelamente a essas descobertas, o desenvolvimento dos conceitos teóricos dos fenômenos em nanoescala também foi fundamental para o desenvolvimento da N&N. Nesse sentido, o entendimento a respeito do confinamento quântico de elétrons (que podem influenciar nas propriedades ópticas de nanomateriais), do tunelamento quântico (utilizado nos microscópios de varredura, e dos plasmons de superfície (que representam as oscilações coerentes dos elétrons confinados de um metal quando submetidos a interações com a luz), são exemplos centrais de como o desenvolvimento da mecânica quântica foi crucial para a compreensão dos fenômenos em escala nano.

Até os dias atuais, a área de N&N segue em desenvolvimento nas suas diversas ramificações, como a nanomedicina e a nanoeletrônica. Recentemente, os pesquisadores Jean-

Pierre Sauvage, Sir J. Fraser Stoddart e Bernard L. Feringa foram laureados com o Prêmio Nobel de Química de 2016 por desenvolver máquinas a nível molecular, a partir de estruturas milhares de vezes menores que um fio de cabelo, que levou ao desenvolvimento do chamado “nanocarro” (Feu *et al.*, 2017). Esse avanço representa o ideal das máquinas produzidas em escala nanométrica, já debatido anteriormente por Feynman e, principalmente, por Drexler, no livro “Motores da Criação”.

3.4 Tópicos de Óptica e de Física Moderna e Contemporânea

Para a compreensão dos fenômenos a serem apresentados experimentalmente, é necessária uma revisão dos conceitos elementares de óptica e de física moderna, que vão descrever a explicação para os fenômenos clássicos de refração, absorção, transmissão e espalhamento da luz, e para os fenômenos modernos, como o confinamento quântico dos elétrons e o efeito Tyndall em nanopartículas metálicas.

3.4.1 A natureza da luz

A luz possui um caráter dual, ou seja, se comporta tanto como uma partícula, quanto como uma onda (Hewitt, 2015). Contudo, antes do surgimento da teoria quântica, alguns acreditavam que a luz tinha propriedade corpuscular, por ela se propagar retilineamente, principalmente em meios homogêneos, além de realizar reflexão, refração e dispersão cromática (Martins; Silva, 2015).

Um dos grandes expoentes da teoria corpuscular da luz foi físico inglês Sir Isaac Newton, em que ele explica que esses fenômenos podem ser explicados por colisões contínuas das partículas da luz, sendo essa teoria, publicada inicialmente em 1687 no livro *Princípios Naturais da Filosofia Natural*, embora ele sempre tratasse que a existência desses corpúsculos estariam mais para uma hipótese do que para uma explicação científica propriamente dita, visto que outras propriedades, como a interferência e a refração, não são elucidadas pela sua teoria, levando-o a acreditar no fato de nunca ter chegado a uma explicação definitiva a respeito da luz (Martins; Silva, 2015).

Em contraponto a Newton, o físico neerlandês Christiaan Huygens apresenta, em 1690, no livro *O Tratado sobre a Luz*, uma teoria ondulatória para a luz. Neste trabalho, Huygens afirma que cada ponto de uma frente de onda é uma nova fonte de novas ondas que se propagam a partir de uma fonte pontual. Esse modelo permitiu explicar o comportamento da luz sobre a

reflexão, refração e difração. Entretanto, propriedades como a interferência e a difração não eram suficientemente explicados pela teoria de Huygens, sendo explicada posteriormente por Thomas Young e Augustin Fresnel, no século XIX (Martins; Silva, 2015).

Foi então que Albert Einstein, em 1905, a partir da contribuição científica de outros pesquisadores, como as observações do efeito fotoelétrico por Heinrich Hertz e o desenvolvimento do quanta de energia por Max Planck, assumiu que a quantização de energia para o problema de um corpo negro também fosse válida para a luz. Isso porque os experimentos realizados a partir do tubo de raios catódicos indicavam que o aumento de energia da fonte luminosa em função do tempo não causava um aumento da energia cinética máxima dos elétrons emitidos, ou seja, a intensidade de luz não influenciava na emissão desses elétrons, o que contrariava a teoria ondulatória clássica (Tipler; Llewellyn, 2017).

Einstein propôs, então, que a luz é constituída por quantidades discretas de energia dependentes da frequência, denominadas por fótons, e que a energia cinética máxima dos elétrons emitidos é dada por $E_{c_{max}} = hf - \phi$, em que ϕ é a função trabalho, responsável por remover um elétron da superfície e h corresponde à constante de Planck (Tipler; Llewellyn, 2017). Dessa forma, o potencial de corte para um elétron é dado a partir da seguinte equação,

$$eV_0 = \left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{max} = hf - \phi \quad (1),$$

chamada como equação do efeito fotoelétrico.

3.4.2 Os fenômenos de reflexão, absorção e espalhamento da luz

A reflexão e a absorção dos raios luminosos eram fenômenos que, desde a Antiguidade, intrigavam os estudiosos e entusiastas da natureza da época. Com a formulação da teoria corpuscular, Newton analisou a produção de imagens a partir de lentes sobrepostas e verificou que, na borda dessas lentes, havia uma coloração de origem ainda não compreendida, a qual nunca fora reportada antes (Martins; Silva, 2015).

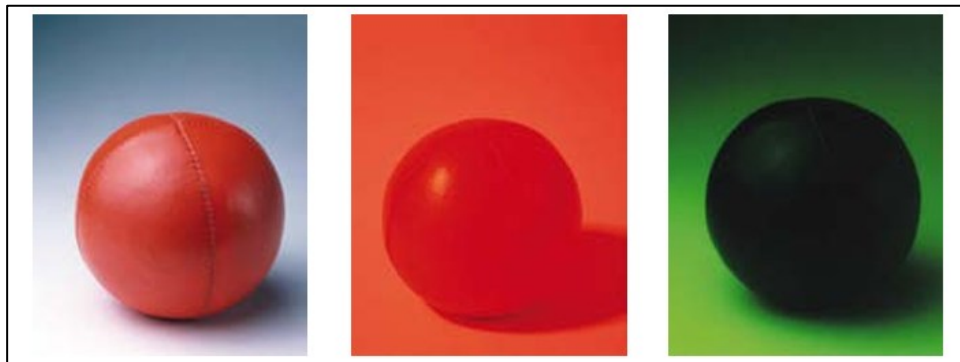
Com o intuito de entender melhor esse problema, Newton escureceu a sala onde fazia experimentos, de modo que abrisse uma pequena abertura para a luz solar e, com o auxílio de um prisma regular, verificou que a luz branca era decomposta nas cores de um arco-íris. Após utilizar outro prisma sobre o arco-íris formado, ele recombinau todas as cores na própria luz

branca, levando ao entendimento de que a luz tem a capacidade de dispersão cromática (Martins; Silva, 2015).

Assim, entendeu-se que as cores dos objetos resultam de processos de reflexão e absorção seletiva desses diferentes comprimentos de onda da luz. Por exemplo, se uma caneta é azul, infere-se que todos os comprimentos de onda foram absorvidos, exceto o azul que foi refletido. Nesse sentido, a natureza que governa esse processo está associada à ressonância da luz nos materiais, uma vez que seus átomos constituintes possuem elétrons mais externos que, ao interagir com a luz, podem entrar em ressonância quando a frequência específica da radiação incidente coincide com a frequência natural do material (Hewitt, 2015).

Nesse caso, os elétrons desse material tendem a oscilar na mesma frequência da radiação incidente, favorecendo a absorção seletiva de determinadas frequências e, conseqüentemente, a formação da cor observada no objeto. Na Figura 1, tem-se uma exemplificação desse processo.

Figura 5 – Formação da cor de um objeto sob diferentes fontes de luz



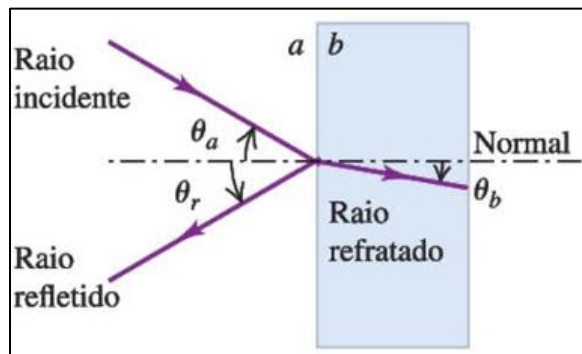
Fonte: Hewitt (2015)

No contexto da luz, a reflexão, em seu sentido especular, é um fenômeno de interface, visto que ocorre quando uma frente de onda luminosa incide sobre uma superfície, seja ela lisa e bem definida ou não, na qual há a separação desses raios em dois meios diferentes. Nesse caso, o campo elétrico da luz incidente induz oscilações em fase nos elétrons do material, de forma que as ondas irradiadas sofram o processo de reflexão (Figura 2), resultante da interferência construtiva dessa oscilação. Tal processo é governado pela Lei da Reflexão e pode ser enunciado matematicamente pela equação abaixo:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2).$$

Quando os materiais envolvidos nesse fenômeno não são opacos, os raios luminosos, ao invés de sofrerem apenas absorção em determinadas faixas do espectro eletromagnético, podem sofrer um desvio de direção decorrente da refração, uma vez que os meios em que essas ondas se propagam não possuem, necessariamente, as mesmas propriedades ópticas. Ou seja, pode ocorrer reflexão e refração parcial das ondas eletromagnéticas, caracterizando o fenômeno da transmissão para outro meio, conforme mostra a Figura 2 (Young; Freedman, 2016).

Figura 6 – Representação da reflexão e refração de uma onda



Fonte: Young; Freedman (2016)

O espalhamento da luz, em contrapartida, não é caracterizado como um fenômeno de superfície, já que resulta da interação das ondas eletromagnéticas com heterogeneidades discretas, como partículas, átomos ou moléculas (sejam elas suspensas ou constituintes de um material) (Hewitt, 2015; Young; Freedman, 2016). Diferentemente da reflexão, quando a luz incide em cada partícula ela é absorvida e reemitida em diferentes direções com suas intensidades alteradas, desde que o comprimento de onda da luz esteja na mesma ordem do tamanho das partículas. Sendo assim, considera-se o caso em que ocorre um espalhamento elástico, ou seja, a frequência da onda espalhada é a mesma da onda incidente, em sistemas atômicos, nos quais os elétrons estão ligados aos núcleos por forças restauradoras (Pereira *et al.*, 2022). Como a luz é uma onda eletromagnética, a interação dos elétrons com o campo elétrico dessa onda vai ocorrer com muito mais intensidade do que com o campo magnético. Pode-se obter uma relação do campo elétrico para a luz, a partir das equações de Maxwell (equações 3, 4, 5 e 6):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3),$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4),$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5),$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J} \quad (6).$$

Em um meio sem cargas elétricas, a densidade de corrente e a densidade de carga são nulas (Tipler; Llewellyn, 2017). Logo, pode-se obter as equações de Maxwell para a luz no vácuo (equações 7, 8, 9 e 10):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (7),$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (8),$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (9),$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (10).$$

Utilizando a identidade do rotacional de um campo, tem-se as seguintes equações para o campo elétrico:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} \quad (11),$$

$$\vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\vec{\nabla}^2 \vec{E} \quad (12),$$

e para o campo magnético:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \vec{\nabla}^2 \vec{B} \quad (13),$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\vec{\nabla}^2 \vec{B} \quad (14).$$

Sabendo que as derivadas de espaço e de tempo são independentes, pode-se trocar a ordem delas nas equações 12 e 14:

$$-\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\vec{\nabla}^2 \vec{E} \quad (15),$$

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\vec{\nabla}^2 \vec{B} \quad (16),$$

Substituindo os rotacionais conforme as equações de Maxwell para a luz no vácuo, chega-se na seguinte conclusão:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\vec{\nabla}^2 \vec{E} \rightarrow \vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (17),$$

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\vec{\nabla}^2 \vec{B} \rightarrow \vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (18).$$

Sabendo que c (velocidade da luz no vácuo) pode ser obtida a partir da solução homogênea da equação de onda como $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$. Assim, os laplacianos dos campos elétrico e magnético (equações 17 e 18) podem ser reescritas com essa alteração:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (19),$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (20).$$

Como o campo elétrico se propaga no espaço em uma dimensão (no eixo z , por exemplo) e no tempo, a equação 19 pode ser obtida em função dessas variáveis, considerando uma solução harmônica da equação de onda (Pereira *et al.*, 2022),

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \rightarrow \vec{E}(z, t) = E_0 f(kz - \omega t) \hat{i} \quad (21),$$

em que k é o número de onda e ω é a frequência angular, relacionados à velocidade da luz pela equação 22:

$$\omega = ck \quad (22).$$

Como a solução obtida na equação 21 corresponde a uma solução harmônica da equação de onda, é previsto o aparecimento de termos exponenciais na solução geral. Logo obtém-se a função do campo elétrico corrigida, considerando também o efeito de polarização da onda,

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \hat{t} \quad (23),$$

em que $E_0 \hat{t}$ é o vetor de polarização.

Considerando o regime em que o tamanho da nanopartícula é muito menor do que o comprimento de onda incidente, essas partículas atuam como dipolos elétricos oscilantes. Esse comportamento em partículas pequenas é classicamente conhecido como regime Rayleigh. Contudo, a descrição rigorosa e completa para o espalhamento e absorção de luz por partículas esféricas de qualquer tamanho ou material (seja dielétrico ou metálico) é dada pela Teoria de Mie (Bohren; Huffman, 1998). No caso específico das nanopartículas metálicas, a aplicação da Teoria de Mie (ou sua aproximação dipolar) é essencial para descrever a ressonância plasmônica de superfície localizada, fenômeno que domina a resposta óptica desses materiais (Kelly *et al.*, 2003). O movimento da nuvem eletrônica é descrito sob influência do campo elétrico da luz (Symon, 1996),

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = qE(t) \quad (24),$$

cuja solução é dada por:

$$x(t) = x_0 e^{-i\omega t} \quad (25).$$

Como a carga oscilará com a presença de luz, o deslocamento x da carga elétrica descreve o aparecimento de um momento de dipolo elétrico induzido (Pereira *et al.*, 2022). Logo, pode-se descrever a solução do momento de dipolo elétrico em função da equação 25:

$$\vec{p} = -qx \hat{t} \quad (26)$$

$$\vec{p} = \vec{p}_0 \cdot e^{-i\omega t} \quad (27).$$

Sendo que o dipolo oscilante produz um campo elétrico e magnético que se propagam no espaço, os campos elétrico e magnético do dipolo elétrico induzido são calculados, considerando a sua zona de radiação (distâncias grandes em comparação com o comprimento da luz incidente) e comprimentos de onda da luz muito maiores que o tamanho do dipolo

(Pereira *et al.*, 2022). Esse cálculo é realizado a partir de um sistema de coordenadas esféricas com origem no centro do dipolo (Figura 3),

$$\vec{E}(r, \theta) = \frac{\omega^2 \mu_0 e^{i(kr - \omega t)}}{4\pi r} \hat{r} \times (\vec{p}_0 \times \hat{r}) \rightarrow \vec{E}(r, \theta) = \frac{\omega^2 \mu_0 e^{i(kr - \omega t)}}{4\pi r} \text{sen } \theta \hat{\theta} \quad (28),$$

$$\vec{B}(r, \theta) = \frac{\omega^2 \mu_0 e^{i(kr - \omega t)}}{4\pi c r} \hat{r} \times \vec{p}_0 \rightarrow \vec{B}(r, \theta) = \frac{\omega^2 \mu_0 e^{i(kr - \omega t)}}{4\pi c r} \text{sen } \theta \hat{\phi} \quad (29),$$

em que μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, c é a velocidade da luz no vácuo e $\hat{\theta}$ e $\hat{\phi}$ são os vetores unitários do sistema de coordenadas esféricas (Griffiths, 2011). Isso significa que as equações de campo descrevem a radiação do dipolo como uma onda progressiva com simetria axial, de forma que ela não varia com o ângulo φ (Pereira *et al.*, 2022). Quando $\theta = 90^\circ$, no plano perpendicular ao eixo do dipolo, denota-se que o campo elétrico espalhado se mantém paralelo a esse eixo. Logo, quando um feixe atinge múltiplos centros espalhadores, há a destruição da coerência das ondas espalhadas em todas as direções, exceto na direção de propagação frontal, devido a uma distribuição desordenada desses centros espalhadores (Pereira *et al.*, 2022). Então, a intensidade resultante de N centros espalhadores será dada por uma relação entre a intensidade emitida por um único centro espalhador (I) e a quantidade de centros espalhadores N , de forma que essa intensidade seja estabelecida em função da distância e do ângulo θ , em relação à direção de propagação do feixe (Pereira *et al.*, 2022). Tal intensidade pode ser calculada como a média temporal do vetor de Poynting (\vec{S}) (Hecht, 2017):

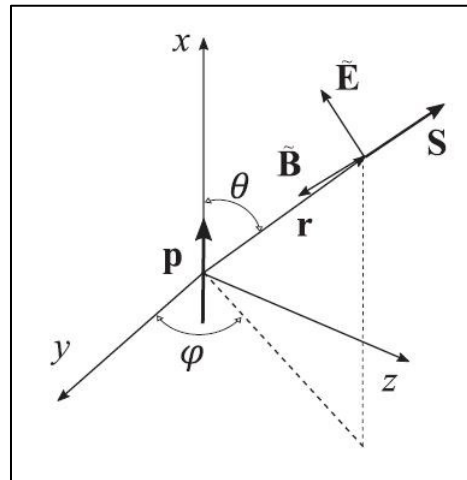
$$\vec{I}(r, \theta) = \langle S \rangle \quad (30),$$

$$\vec{I}(r, \theta) = \frac{1}{\mu_0} \langle \vec{E} \times \vec{B} \rangle \quad (31),$$

$$\vec{I}(r, \theta) = \frac{\omega^4 \mu_0 p_0^2 \text{sen}^2 \theta}{32\pi^2 c} \hat{r} \quad (32).$$

Conforme a equação 32, a intensidade espalhada é máxima em $\theta = 90^\circ$, porém é nula ao longo do eixo do dipolo ($\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$), de acordo com a dependência do termo “ $\text{sen}^2 \theta$ ”. Observa-se também que a frequência angular está elevada a quarta potência, o que estabelece uma relação de dependência nessa equação, de forma que determinados espectros de cor terão maior intensidade de espalhamento em relação a outros de frequência angular menor.

Figura 7 – Campo eletromagnético produzido na região do dipolo



Fonte: Pereira et al. (2022)

3.4.3 O efeito Tyndall em nanopartículas metálicas

O efeito Tyndall é o fenômeno associado ao espalhamento de luz por partículas em uma dispersão coloidal. Nesse caso, dado um feixe de luz que interage com um meio contendo tais partículas (de diâmetro d), a luz é espalhada em múltiplas direções, de forma que a trajetória do feixe fique visível no coloide. O fenômeno físico é teoricamente modelado pelo espalhamento de Mie, que ocorre quando a luz interage com partículas de geometria esférica de tamanho arbitrário (Bohren; Huffman, 1998).

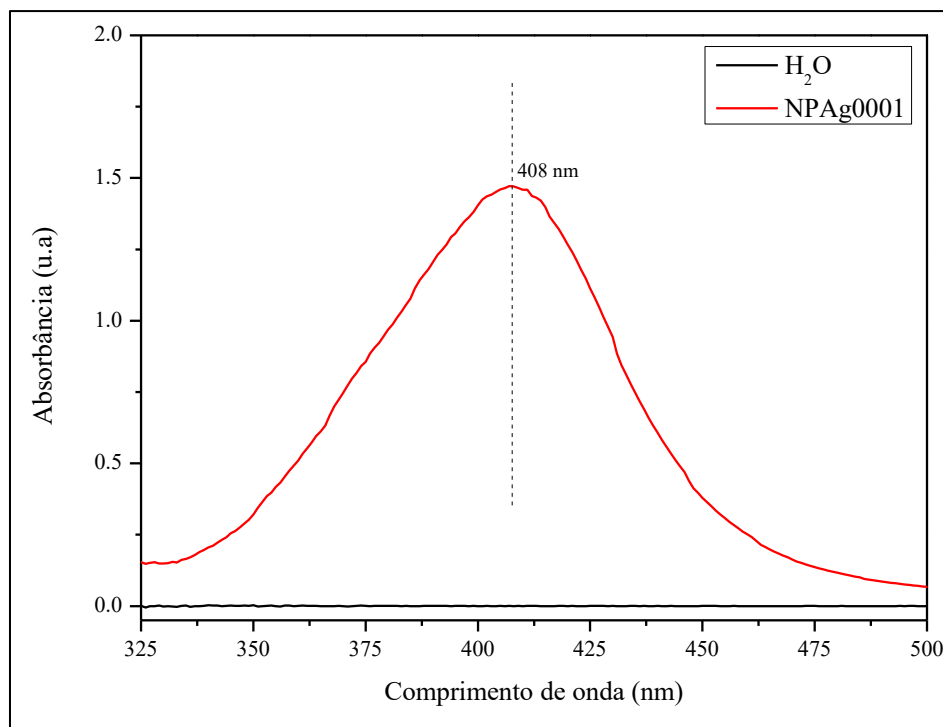
No caso de nanopartículas metálicas atuantes em uma suspensão coloidal (um exemplo disso são as soluções coloidais de nanopartículas de prata e de ouro), a manifestação do efeito Tyndall é significativamente intensificada em comparação com coloides formados por partículas dielétricas, especialmente quando o tamanho das nanopartículas é muito menor do que o comprimento de onda da radiação incidente. Embora a teoria de Mie seja geral e aplicável a quaisquer partículas dielétricas, as características ópticas observáveis no efeito Tyndall em nanopartículas são bem descritas por meio da ressonância plasmônica de superfície localizada (LSPR, do inglês *Localized Surface Plasmon Resonance*), associada à oscilação coletiva dos elétrons livres sob influência de um campo eletromagnético (Kelly *et al.*, 2003).

Considerando que a faixa do comprimento de onda da luz visível está entre 380 nm e 700 nm e que esses valores são bem superiores ao tamanho de nanopartículas metálicas, que geralmente apresentam diâmetros médios da ordem de dezenas de nanômetros (por exemplo, ~ 50 nm), os elétrons presentes na nuvem eletrônica dessas nanopartículas, ao interagir com a luz, apresentam uma interação ressonante associada à excitação de plasmons de superfície

localizada, que causa um aumento significativo na absorção e no espalhamento da luz em frequências bem específicas (Kelly *et al.*, 2003).

O plasmon é uma excitação coletiva dos elétrons de condução, cuja descrição pode ser tratada de forma clássica ou quântica, de forma que, quando uma frequência incidente coincide com a frequência natural de oscilação desses elétrons, ocorre o fenômeno de ressonância. Na prática, em uma solução de nanopartículas de prata, há a absorção das frequências do azul/violeta pelo LSPR (próxima de 400 nm), conforme mostra o Gráfico 1, via análise de absorção de diferentes comprimentos de onda em uma suspensão coloidal de nanopartículas de prata, fazendo com que a cor da solução formada, a partir das frequências transmitidas, seja um amarelado claro (Kelly *et al.*, 2003).

Gráfico 1 – Absorção da luz em NPAg's por espectrometria no UV-Vis



Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma nanopartícula esférica e homogênea em regime dipolar, pode-se calcular a resposta óptica da interação com o campo eletromagnético incidente, a partir da polarizabilidade dessa esfera de volume V , dada por

$$\alpha = 3\epsilon_m V \frac{\epsilon(\omega) - \epsilon_m}{\epsilon(\omega) + 2\epsilon_m} \quad (33),$$

em função da permissividade complexa do metal (calculada por $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$), da permissividade do meio ϵ_m e do volume da esfera (Bohren; Huffman, 1998; Novotny; Hecht, 2012). Com essas considerações, a seção de choque de extinção total, que é a soma das contribuições de espalhamento (σ_{esp}) e de absorção (σ_{abs}), é determinada em partículas pequenas pela seguinte equação:

$$\sigma_{ext} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_m} \text{Im}(\alpha) \quad (34).$$

Quando substituimos a função de permissividade complexa do metal na equação 33, obtemos a parte imaginária de α :

$$\text{Im}(\alpha) = \frac{9\epsilon_m^2 V \epsilon_2}{(\epsilon_1 + 2\epsilon_m)^2 + \epsilon_2^2} \quad (35).$$

Logo, calcula-se a dedução final da seção de choque de extinção (equação 36) como a substituição da equação 35 na equação 34, além de considerar o pico de ressonância do plasmon a partir da condição de Fröhlich (equação 37), ou seja $\epsilon_1(\omega) = -2\epsilon_m$ (Bohren; Huffman, 1998; Novotny; Hecht, 2012):

$$\sigma_{ext} = \frac{9\omega}{c} V \epsilon_m^{3/2} \frac{\epsilon_2}{(\epsilon_1 + 2\epsilon_m)^2 + \epsilon_2^2} \quad (36),$$

$$\sigma_{ext}(\omega_{res}) = \frac{9\omega_{res}}{c} V \frac{\epsilon_m^{3/2}}{\epsilon_2(\omega_{res})} \quad (37).$$

Portanto, a partir da análise da equação 37, verifica-se que a intensidade da interação da luz com a nanopartícula é maximizada quando a condição de ressonância de Fröhlich ($\epsilon_1(\omega) = -2\epsilon_m$) é satisfeita, dado a coloração específica da solução. Assim, conclui-se que as propriedades ópticas singulares dessas suspensões coloidais são uma manifestação direta das oscilações coerentes dos elétrons de condução pelo fenômeno de ressonância plasmônica de superfície, demonstrando como alterações na estrutura da matéria na nanoescala podem modificar drasticamente o comportamento da luz incidente (Novotny; Hecht, 2012).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são tratados os procedimentos metodológicos que levaram a realização desse trabalho. Diante disso, essa seção foi organizada com intuito de descrever a natureza e a delimitação da pesquisa aplicada, os sujeitos envolvidos e o local onde a pesquisa fora executada, além de determinar os aparatos e procedimentos experimentais utilizados, e os métodos de análise e coleta de dados, bem como os instrumentos usados para a execução da pesquisa.

4.1 Natureza do trabalho e delineamento da pesquisa

Este trabalho apresenta aspectos de uma abordagem qualitativa, de forma que as características dessa natureza de pesquisa são apresentadas durante a coleta e análise de dados aplicados antes e depois da intervenção pedagógica, além do entendimento da profundidade do processo de ensino-aprendizagem, principalmente na verificação das percepções dos discentes por parte do pesquisador, a partir de uma breve análise de respostas discursivas apresentadas em sala de aula e no ato de observação dos alunos na formulação de hipóteses e na discussão dos resultados obtidos.

O delineamento de pesquisa adotado é o “Pesquisa-Ação”, que é uma metodologia investigativa baseada em ciclos contínuos e permutáveis, em que o pesquisador assume um papel ativo nas etapas de intervenção, planejamento, aplicação e avaliação da prática pedagógica, além de que esse método já fora aplicado dentro de um conjunto de atividades e aulas planejadas, fazendo parte de uma sequência didática (Thiollent, 2011). Tal prática, de forma geral, foi estruturada inicialmente por Thiollent (2011) e já tem sólida investigação na literatura pedagógica por Tripp (2005), na qual é feita a discussão das várias ramificações ou variações desse método sobre a prática docente (Thiollent, 2011; Tripp, 2005).

Ademais, esse trabalho adiciona elementos de um estudo de caso, visto que um grupo específico de alunos foi voluntário nessa pesquisa, bem como é abordada a condução de um estudo avaliativo sobre os conceitos de óptica e de nanociência e nanotecnologia antes da prática pedagógica (por meio de avaliação diagnóstica) e após a sequência didática (novamente por meio de uma nova avaliação diagnóstica), com o intuito de acompanhar o impacto da intervenção nos conhecimentos dos educandos.

O estudo em questão foi conduzido na Escola de Ensino Médio Eliézer de Freitas Guimarães, instituição de ensino público estadual localizada na cidade de Caucaia, no estado

do Ceará e contou com a participação de 48 discentes voluntários do segundo ano do Ensino Médio regular, com o pré-requisito de já terem cursado o assunto de óptica básica.

A participação na pesquisa se deu de forma anônima, ou seja, as informações sensíveis a respeito da identificação dos educandos foram totalmente anonimizadas durante a etapa de coleta de dados. Vale lembrar que a obtenção dos dados seguiu as conformidades da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD) e demais legislações vigentes. Todos os procedimentos éticos foram rigorosamente seguidos, garantindo a confidencialidade dos participantes.

4.2 Procedimentos pedagógicos e experimentais

Inicialmente, esta sessão didática foi estruturada para um total de 2 horas-aula, ou seja, são necessárias no mínimo duas aulas de 50 minutos, para que seja possível a plena realização das etapas descritas a seguir. Destaca-se também a possibilidade de diluição dessas etapas, de forma que o docente possa organizar uma sequência didática que aborde melhor todas as demandas, debates e discussões da turma, além da possibilidade de elaboração de um relatório experimental em conjunto com os grupos.

Etapa 1: Aplicação de avaliação diagnóstica

Antes do início da intervenção pedagógica, aplicou-se um questionário (Apêndice A) aos estudantes, via Google Formulários, com o objetivo de identificar os conhecimentos prévios relacionados ao tema da sequência didática. Dessa forma, identificar conhecimentos prévios é crucial na investigação pedagógica, além de estar em consonância com a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. O questionário em si foi elaborado com 10 questões e buscou averiguar a compreensão de conceitos fundamentais de física básica (no caso, concepções elementares em óptica, como absorção, transmissão, espalhamento, reflexão e refração da luz) e de nanociência. Nesta etapa, parte-se do pressuposto de que tais conteúdos já foram trabalhados no Ensino Médio; contudo, caso o diagnóstico indique fragilidades, recomenda-se uma revisão orientada antes da atividade e o reforço conceitual durante a mediação docente, de modo a garantir a ancoragem adequada para a investigação.

Etapa 2: Intervenção Pedagógica: aplicação da sequência didática investigativa

A etapa central desta pesquisa está fundamentada em uma transposição didática

experimental, fazendo uso da Aprendizagem Baseada em Investigação. Nesse sentido, o docente utilizou-se de recursos didáticos para introduzir fatos e situações em que a N&N esteja presente no cotidiano, com o uso de aprendizagem dialogada, de forma que os discentes participem do processo de ensino-aprendizagem. Essa parte é fundamental durante a intervenção, pois busca uma conexão inicial com os educandos, além de estimular o engajamento deles durante a transposição didática. Logo, essa fase é um ponto de partida para a focalização e problematização para os fenômenos em nanoescala.

Sequencialmente, a sala foi dividida em 6 grupos de alunos e os materiais para a prática foram distribuídos, além de um roteiro experimental que descreve os objetivos e questões a serem solucionadas (ver Apêndice B). Então, foram distribuídas 4 amostras líquidas contidas em uma cubeta acrílica, identificadas pelos números 1, 2, 3 e 4, sendo elas refrigerante de cola, água, suspensão de nanopartículas de prata (NPAg's) e leite diluído, respectivamente. O objetivo inicial foi fazer uma inspeção dos aspectos ópticos de cada solução e, posteriormente, submeter cada amostra ao teste com o laser vermelho e com a luz violeta.

No primeiro teste, os estudantes identificaram quais amostras são coloides ou apenas soluções químicas, verificando a ocorrência do efeito Tyndall. No segundo teste, verificou-se em quais amostras ocorria a absorção de luz violeta, projetando uma possível sombra por meio de um anteparo de papel. Logo, após o auxílio do docente na explicação dos fenômenos físicos que ocorrem em cada teste durante a experimentação, coube aos alunos desenvolverem uma hipótese, com base nas propriedades ópticas de cada material, e assim apontar qual amostra seria o nanomaterial.

Ao final do experimento, as equipes apresentaram suas hipóteses e quais os prováveis resultados decorrentes do processo físico realizado, além de mencionarem as dificuldades encontradas na fase de experimentação. Vale mencionar que todas as explicações, hipóteses, evidências coletadas e dúvidas, além de outras informações obtidas, foram registradas no roteiro experimental, para documentar o raciocínio formado na construção do conhecimento.

Na sequência, conduziu-se um debate para articular as evidências aos conceitos de N&N (transmissão, espalhamento e confinamento da luz). Assim, estruturada sob a ótica de Ausubel (1968), essa etapa objetivou utilizar tais fundamentos para validar hipóteses e promover a ancoragem dos novos conteúdos aos subsunçores prévios.

Por fim, os estudantes foram estimulados a correlacionar as teorias físicas com as hipóteses mais prováveis, finalizando a aula com a explicação mais coerente cientificamente. Além disso, solicitou-se que todos os estudantes limpassem as bancadas e os recipientes usados para a experimentação, e que todos os materiais fossem acondicionados nos seus devidos

estojos, além de as soluções usadas serem retornadas aos seus devidos frascos originais.

Etapa 3: Avaliação do processo de ensino-aprendizagem

Esta última etapa compreende a aplicação de uma nova avaliação diagnóstica (ver Apêndice C) sem valor somativo, disponibilizada aos alunos via Google Formulários, com uma estrutura similar ao da primeira avaliação diagnóstica aplicada.

Nesse formulário, foi verificado a compreensão a respeito dos fundamentos básicos de nanociência, do entendimento do experimento proposto e dos conceitos físicos por trás da experimentação, sempre considerando a construção do conhecimento, com base na realidade pedagógica dos estudantes.

Quanto à avaliação do docente sobre a transposição, os roteiros experimentais foram usados para avaliar a capacidade do desenvolvimento científico dos alunos, além dos registros da supervisão pedagógica contendo as percepções sobre a transposição didática. Todas as etapas mencionadas foram submetidas a um planejamento prévio, por meio de um plano de aula detalhado (ver Apêndice D).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as análises sobre os resultados obtidos dos formulários das avaliações diagnósticas aplicadas e as percepções pedagógicas do docente durante a intervenção, contendo uma síntese das discussões conceituais que ocorreram entre os discentes antes da intervenção.

5.1 Análise dos resultados do formulário pré-aula

Conforme o Apêndice A, na avaliação diagnóstica pré-aula foram realizadas cinco perguntas (duas primeiras discursivas e as demais objetivas) sobre óptica básica e compreensão básica de nanociência, a fim de estimar a existência de possíveis subsunçores nesses tópicos específicos. Nesse sentido, conforme Luckesi (2005), uma avaliação diagnóstica pode admitir que um educando pode não possuir as qualidades esperadas durante a avaliação da aprendizagem, mesmo que esse instrumento possa operar com resultados provisórios e sucessivos (Luckesi, 1992; Pires; Santos; Kohn, 2016). Em síntese, a avaliação diagnóstica pode não refletir a realidade dinâmica da sala de aula, embora esse instrumento tenha caráter qualificador para tomada de decisões durante uma intervenção.

A primeira questão pergunta aos discentes sobre a definição científica da natureza física da luz. Baseado nas 39 respostas obtidas no formulário, apenas 11 alunos chegaram a uma resposta aceitável, citando algum aspecto da dualidade física da luz, representando um percentual de 28,2%, aproximadamente. A Tabela 1 detalha as respostas dos alunos que conseguiram ir além da sua mera função de “iluminar algo”, a partir da atribuição de características físicas, como “onda”, “partícula”, “energia” etc.

Tabela 1 – Respostas de alguns alunos sobre a Pergunta 1A

Pergunta 1	O que você acha que é a luz?
Aluno 12	A luz é uma onda eletromagnética, todavia pode se comportar como partículas, em determinando contexto.
Aluno 19	Para mim a luz é um tipo de radiação não perigosa
Aluno 20	é uma onda, que tem pouca radiação da distância da terra para o sol, chamado raio UV
Aluno 29	É uma onda
Aluno 30	A luz é uma partícula
Aluno 31	Uma onda de energia
Aluno 32	feixe de ondas luminosas coloridas que juntas formam a luz branca
Aluno 33	Onda de energia

Aluno 34	E uma partícula sem massa e não precisa de nenhum meio para se movimentar
Aluno 35	Luz se trata de uma partícula denominada fóton que não possui massa e se move a cerca de 300000 km/s aproximadamente

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que nem todas as respostas apresentam suficiência sobre a natureza física da luz, no caso quanto ao fato de a luz ter um comportamento dual e se apresentar como uma onda de matéria, possuindo simultaneamente propriedades particulares e ondulatórias.

Contudo, esses discentes, em especial, abordaram aspectos físicos que, de fato, existem ao se definir o conceito de luz. Em especial, a resposta do Aluno 12 foi a mais satisfatória em relação às demais respostas (“a luz é uma onda eletromagnética, todavia pode se comportar como partículas, em determinando contexto”), citando a dualidade oscilatória-particular da luz, mesmo que todos os discentes não tenham o entendimento pleno do porquê a luz ter esse caráter dual.

Além disso, a maioria da turma, representada por 48,7%, definiu a luz por concepções funcionais ou tautológicas. Respostas como “algo que ilumina” ou “uma fonte luminosa para iluminar um local” representam um senso comum sobre o caráter funcional da luz, o que, na perspectiva física, acaba sendo redundante, visto que essas respostas não caracterizam ou definem propriamente a natureza da luz.

Ademais, 23,1% dos discentes erraram ao conceituar luz, haja visto que alguns abordaram termos científicos que não tem nenhuma relação com a definição real do fenômeno (por exemplo, o Aluno 16 afirmou que a luz se refere a “agitação das moléculas”), enquanto outros simplesmente não souberam responder. Diante dessa predominância de visões baseadas em senso comum e de interpretações incompatíveis com a abordagem científica adotada, verificou-se a necessidade de uma intervenção também focada na revisão dos conceitos elementares de Óptica, embora os estudantes já tenham apreciado esses tópicos anteriormente em sala de aula.

A segunda questão abordou, por meio de uma situação-problema, os conceitos de absorção e reflexão da luz. Neste caso, sobre as motivações que levam uma camisa preta esquentar mais rapidamente ao ser exposta na luz solar do que uma camisa branca.

Com base nas respostas obtidas, apenas 15,4% dos discentes apresentaram respostas satisfatórias, conforme mostrado na Tabela 2, dado que esses alunos compreendiam os mecanismos que levam uma camisa de determinada cor esquentar mais o que de outra cor, ou

seja, a cor preta tende a absorver todos as frequências de luz em detrimento da luz branca que apenas as reflete.

Tabela 2 – Respostas de alguns alunos sobre a Pergunta 2A

Pergunta 2	Por que uma camisa preta no sol esquenta mais do que uma camisa branca?
Aluno 8	o preto absorve a luz solar
Aluno 12	Pois a camisa preta absorve mais luz e a branca reflete mais
Aluno 20	Porque absorve as ondas UV direcionada para ela, sem refletir luz e calor
Aluno 24	por que a cor preta absorve a luz e o calor
Aluno 33	por conta que a cor preta absorve todas as cores emitidas pelo o sol e a branca reflete todas
Aluno 35	a cor de algo evidencia quais cores do espectro foi absorvido. a preta esquenta mais devido absorver toda ou maioria da luz e não a refletindo. A branca refleti todos.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dessas respostas, verifica-se que o Aluno 35 apresentou uma explicação conceitualmente mais elaborada para a situação dada, detalhando a relação entre o espectro de cores e a absorção, embora os outros alunos descritos na Tabela 2 também tenham relacionado corretamente os conceitos de absorção e reflexão. Analisando todas as respostas da Pergunta 2A, verifica também que 12 alunos (aproximadamente 30,7%) apresentam definições funcionalmente corretas, mas que não são suficientes para explicar a fenomenologia da situação-problema. Nesse sentido, exemplos como “acho que a cor preta absorve mais calor que a cor branca” (Aluno 10) ou “o preto absorve mais calor que o branco” (Aluno 16) expressam uma simplificação comum do fato de uma camisa preta esquentar mais do que uma camisa branca, mesmo que sejam aceitáveis neste nível escolar.

Em contraponto, uma parcela significativa dos alunos (cerca de 25,6%) tentou explicar a fenomenologia do problema através de uma conexão com a composição das cores, associando o fato de “ter mais cores” como a causa direta do aquecimento, sem referenciar isso aos fenômenos de absorção e reflexão. Ainda, 28,2% dos alunos basearam as explicações à Pergunta 2 por meio de concepções de senso comum, seja atrelando a explicação a uma ideia de “atração” (por exemplo, o Aluno 7 atribuiu a hipótese de “a cor preta atrai mais a luz”), a uma ideia de “fixação” (conforme os Alunos 22 e 38) ou até mesmo confundindo com o conceito de transparência ou transmitância, a partir da hipótese de que a cor preta esquenta mais por ela conseguir atravessar ou passar. Logo, de forma geral, denota-se que aproximadamente 46% dos educandos fizeram a associação correta da motivação do problema dado na questão,

principalmente porque seja mais intuitivo a explicação de que “o preto absorve”. Contudo, em torno de 28% dos discentes divergiram ao explicar fisicamente o problema, abordando confusões que precisaram ser discutidas e corretamente revisadas em sala de aula.

A Pergunta 3A abordou o porquê que uma pessoa consegue visualizar o caminho de um feixe de luz que tem a capacidade de atravessar grandes obstáculos, no caso ao entrar pela janela de um quarto e colidir com as partículas de poeira. As respostas dos alunos indicam que, conforme o Gráfico 2, a parcela de 82,1% deles acertaram ao assinalar que as partículas de poeira foram espalhadas ao interagir com o feixe de luz (alternativa A), sendo possível visualizar a trajetória do feixe. Entretanto, 17,9% dos discentes se confundiram ao assinalar que a causa desse fenômeno seria a refração da luz com as partículas de poeira (alternativa D). Nesse caso, observa-se que os discentes, provavelmente, assinalaram essa alternativa devido a uma não compreensão do conceito de espalhamento, muito menos a não compreender a diferenciação entre reflexão especular e o espalhamento de partículas.

Gráfico 2 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 3A



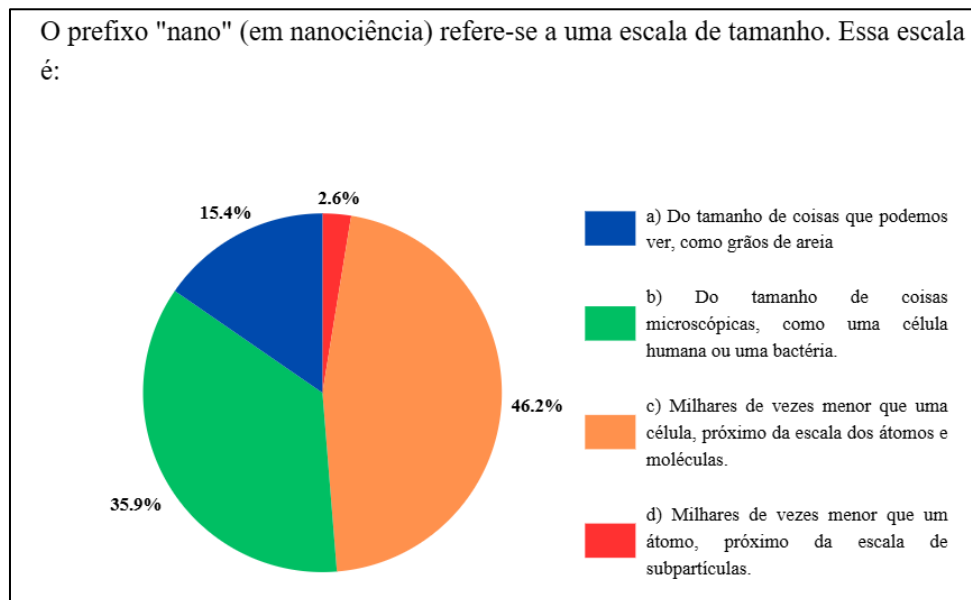
Fonte: Elaborado pelo autor

Na questão 4A do formulário pré-aula, objetivou-se verificar o nível de compreensão sobre as escalas de tamanho quando se trata de nanociência, no caso, o que o prefixo “nano” representa com relação a essas escalas. De acordo com o Gráfico 3, percebeu-se uma distribuição mais diversificada das respostas com relação ao que foi assinalado. Nessa perspectiva, 46,2% dos alunos responderam corretamente ao associar o prefixo nano com uma

escala “próxima da escala dos átomos e moléculas”, sendo “milhares de vezes menor que uma célula” (alternativa C).

Por outro lado, 35,9% dos alunos associaram o prefixo “nano” com a ordem de “coisas microscópicas” como uma célula humana, 15,4% associaram ao tamanho de objetos pequenos que possível ver, como os grãos de areia e 2,6% fizeram a correspondência da escala nano com algo “milhares de vezes menor que um átomo, próximo da escala de subpartículas”. Ou seja, fica explícito que a maioria da turma não tem compreensão sobre os regimes de escala que atuam a nanociência, mesmo que uma minoria expressiva tenha marcado a resposta correta, denotando que essas noções parecem ser um tanto abstratas.

Gráfico 3 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 4A



Fonte: Elaborado pelo autor

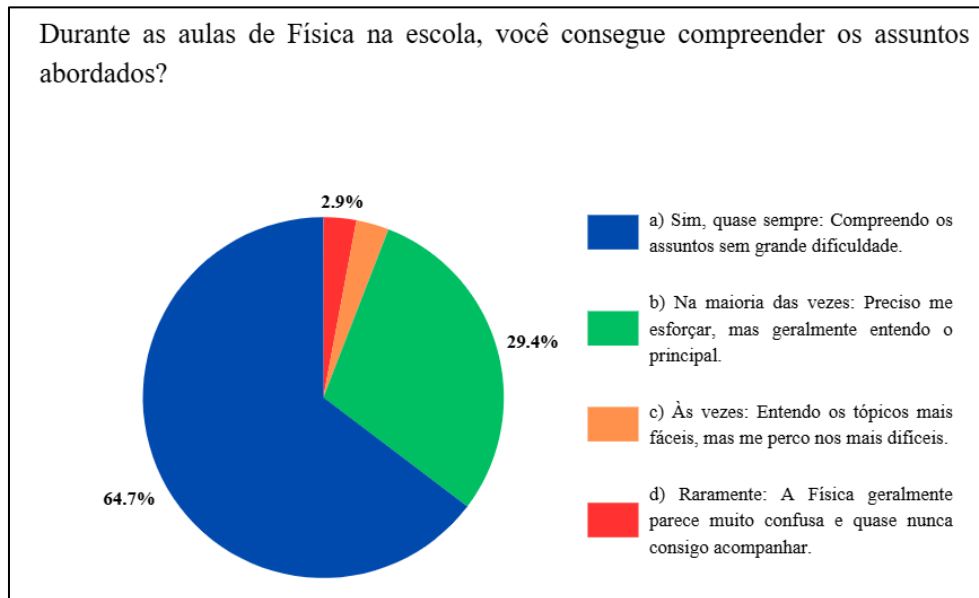
Na última questão do formulário, foi perguntado se os alunos conseguiam compreender os assuntos abordados nas aulas de Física, lecionadas regularmente pelo docente da disciplina. O objetivo foi averiguar a capacidade de os alunos aprenderem por meio de um mapeamento de autoeficácia.

Diante disso, essa questão trouxe um cenário desafiador, visto que, conforme o Gráfico 4, a maior parcela dos discentes (41%) relatou compreender os assuntos apenas “às vezes”, o que indica uma fragmentação no processo de ensino-aprendizagem.

Somando a essa percentagem, 12,8% dos alunos afirmaram compreender “raramente”, o que corrobora a literatura (Moreira, 2021), observando-se que mais da metade da turma apresenta dificuldades em acompanhar as aulas de Física por métodos tradicionais, o que

justifica a necessidade de metodologias ativas de aprendizagem, como a ABI, para estimular esses educandos a aprenderem a Física como algo inerente a sua realidade.

Gráfico 4 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 5A



Fonte: Elaborado pelo autor

Contudo, diante desse cenário, 35,9% dos estudantes afirmaram compreender os conteúdos abordados, embora tenham que 'se esforçar'. Esse dado sugere que, mesmo diante de obstáculos cognitivos, essa parcela dos discentes mantém um nível de comprometimento com a disciplina, compensando as dificuldades didáticas com um esforço individual adicional para atribuir significado ao que foi ensinado. Ademais, apenas 10,3% têm uma confiança plena no entendimento dos assuntos lecionados, o que revela um cenário de significativa insegurança cognitiva, tendo em vista que a grande parte da turma ainda não consolidou a crença na sua própria capacidade de apropriação dos conteúdos de Física.

5.2 Análise dos resultados do formulário pós-aula

De acordo com o Apêndice C, foram aplicadas sete questões em um questionário aplicado em um momento pós-aula, de forma que as questões 1B e 6B são discursivas e as demais objetivas. Neste formulário, o objetivo foi avaliar a compreensão sobre os conceitos-chave de nanociência, sobre os fenômenos ópticos que ocorreram na atividade experimental e verificar, a partir de quatro alternativas, qual seria a resposta satisfatória para a explicação fenomenológica da investigação experimental. Vale mencionar, primeiramente, que apenas 34

alunos responderam ao formulário, visto que, durante a aula, alguns precisaram se ausentar em virtude de atividades extraclasse, o que levou a uma diferença numérica nas equipes formadas, sem prejuízo à execução da intervenção didática.

A primeira questão do formulário pós-aula (Pergunta 1B) teve como objetivo fazer um levantamento de respostas sobre o que a turma compreendia sobre o conceito de nanociência, a partir das observações e das discussões feitas em sala de aula sobre esse tema.

Nesse sentido, tentou-se explorar respostas que tivessem foco nas propriedades que ocorrem na escala nanométrica, sendo que elas não precisariam de um rigor acadêmico, mas, pelo menos, um entendimento mínimo sobre o que trata a nanociência, mesmo que os discentes não tivessem tido algum contato prévio com essa área.

Classificou-se, então, as respostas em quatro níveis de compreensão: a primeira baseia-se em uma definição científica precisa, citando a ordem de grandeza corretamente ou uma comparação adequada, além da menção a como as propriedades da matéria podem mudar nesse nível. Nessa categoria estão 41,2% dos alunos, pois demonstraram essa compreensão sólida (Tabela 3), com destaque ao Aluno 26 que apresentou a melhor definição: “Nanociência é o estudo de fenômenos e da manipulação da matéria em escala nanométrica (um bilionésimo de metro), onde as propriedades de um material podem ser diferentes das observadas em tamanhos maiores”.

Tabela 3 – Respostas de alguns alunos sobre a Pergunta 1B

Pergunta 1	Com base no que você observou e discutiu na aula de hoje, explique com suas palavras o que é "Nanociência".
Aluno 5	Estudo sobre partículas bilhões de vezes menor que um ponto
Aluno 6	A ciência que estuda coisas bilhoes de vezes menores que um ponto
Aluno 9	É a ciência de partículas bilhões de vezes menor que um ponto
Aluno 11	e diferente porque mesmo o material sendo isso dependendo do seu tamanho pode ter efeitos diferentes
Aluno 15	Nanociência pode ser entendida como a parte da física q estuda pequenas partículas, q é bilhoes de vezes menor q o metro
Aluno 20	o que torna usa a área especial é a area em que essa ciência atua, essa ciência estuda materiais tão pequenos, bilhões de vezes menor que um metro, que só se pode ver com o uso de um microscópio eletrônico
Aluno 22	Nanociência, esse campo estuda o universo abaixo da escala do microscópio. Ela é especial por isso por estudar esses fenômenos , já que são diferentes
Aluno 25	nanociencia é uma área que estuda objetos bilhões de vezes menor que o metro e tm propriedades diferentes
Aluno 26	Nanociência é o estudo de fenômenos e da manipulação da matéria em escala nanométrica (um bilionésimo de metro), onde as propriedades de um material podem ser diferentes das observadas em tamanhos maiores

Aluno 27	è a área que lida com partículas bem pequenas, bem menores do que células e bactérias
Aluno 30	Nanociência está relacionada a coisas minúsculas bilhões de vezes menor que objetos comuns
Aluno 32	é uma área da ciência que lida com fenômenos em escala bem pequena, bilhões de vezes menor que um ponto
Aluno 33	nanociência é a área da ciência que estuda coisas bastante pequenas, menores até que bactérias e células

Fonte: Elaborado pelo autor

Denota-se que, a partir das respostas da Tabela 3, vários alunos fizeram um comparativo da escala trabalhada em nanociência, como algo “bilhões de vezes menor que um ponto ou um metro”. Além disso, alguns discentes estabeleceram comparações com células e bactérias, provenientes de uma interdisciplinaridade com as ciências biológicas, e alguns relataram ocorrer a mudança de propriedades na nanoescala, o que tornou essas respostas válidas do ponto de vista científico, embora não exista algum rigor.

No segundo nível de compreensão, as respostas ficaram limitadas a definições bem generalistas, composto por 32,4% dos discentes. Nesse caso, esses estudantes entenderam que a nanociência se trata de uma ordem de grandeza bastante “pequena”, fazendo uso de termos vagos como “coisas pequenas”, “partículas pequenas” ou “extremamente pequenas”, sem fazer alguma diferenciação da escala nanométrica para a escala micrométrica.

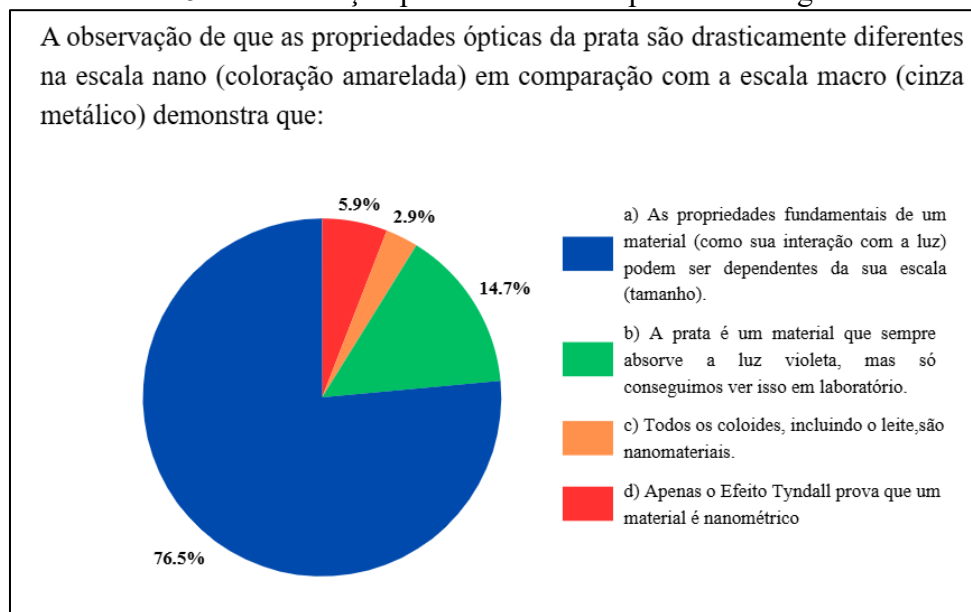
No terceiro nível de compreensão estão os alunos que admitiram erros conceituais, formado por 14,7% do total, seja com equívocos sobre a ordem de grandeza em si (especificamente, o Aluno 7 definiu nanociência como “micropartículas” e o Aluno 17 definiu como “coisas microscópicas”) ou com confusões sobre o experimento (por exemplo, os Alunos 8, 14 e 21 restringiram nanociência apenas ao experimento realizado). Tais equívocos podem refletir a dificuldade intrínseca em diferenciar escalas que fogem à percepção sensorial humana, onde termos como 'micro' e 'nano' acabam sendo assimilados como sinônimos de 'invisível' no repertório prévio dos estudantes. Além disso, a associação restrita ao experimento sugere que, para parte da turma, a apresentação fenomenológica pode ter se sobreposto à definição formal, indicando que a transição do exemplo prático para a generalização teórica requer uma mediação docente ainda mais enfática. Por fim, 11,8% dos discentes não souberam responder ou deixaram o campo de resposta em branco.

Portanto, fica evidente que houve um avanço significativo na apropriação de vocabulário científico, visto que 41% da turma conseguiu verbalizar definições precisas relacionando nanociência com as ordens de grandeza correspondentes, o que é um excelente

resultado para uma intervenção inicial, dado que esse conteúdo não faz parte da grade curricular da disciplina de Física. Contudo, de forma geral, mais de 73% dos alunos estão situados no contexto correto da definição sobre a Pergunta 1B, havendo apenas a necessidade de reforçar o aprendizado para que seja um entendimento melhor dessas definições por parte dos educandos.

Na questão 2B, foi perguntado sobre como as propriedades ópticas da prata podem ser drasticamente diferentes na escala nanométrica com relação a escala macroscópica, ou seja, como a escala influencia na prata coloidal da Amostra 3, que apresenta coloração amarelada, enquanto a prata proveniente de uma joia tem aspecto cinza brilhante. De acordo com os dados obtidos e expressos no Gráfico 5, 76,5% dos alunos responderam corretamente que as propriedades ópticas de um material dependem diretamente da sua escala de tamanho (alternativa A), enquanto 14,7% assinalaram erroneamente a alternativa D, no caso, que apenas o efeito Tyndall é capaz de provar se um material é nanométrico ou não. Logo, é indiscutível que a minoria da turma que errou na constatação dessa pergunta não entendeu as diferenças ópticas que ocorrem nos nanomateriais, embora essa diferenciação da área superficial de materiais *nano* e *bulk* seja de difícil absorção para um discente do Ensino Médio.

Gráfico 5 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 2B



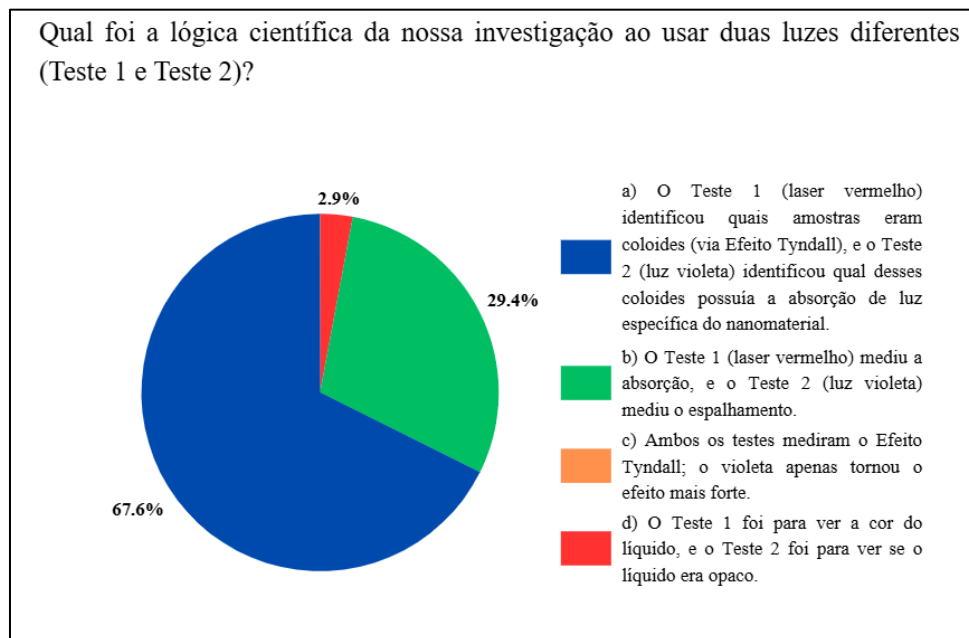
Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação a Pergunta 3B, objetivou-se averiguar a lógica dedutiva da experimentação por parte dos educandos. Conforme as respostas (Gráfico 6), 67,6% dos discentes assinalaram a alternativa que explica que o Teste 2 identificou quais amostras tinham o efeito Tyndall bem proeminente e o Teste 3 identificou quais amostras eram capazes de absorver a luz violeta

(alternativa A), ou seja, os alunos compreenderam o sentido dos testes solicitados durante a experimentação para verificar as propriedades ópticas de cada amostra.

Em contraponto, 29,4% dos educandos assinalaram a opção que afirma exatamente o contrário da alternativa A, isto é, houve uma inversão técnica dos conceitos físicos de absorção e espalhamento que os levou a escolha dessa resposta, possivelmente. Isso indica que a postura investigativa foi assimilada por quase toda a turma (por 97% dos estudantes, ao somar os percentuais das alternativas A e B), mesmo que uma parcela expressiva tenha se equivocado na sinalização errada da alternativa.

Gráfico 6 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 3B



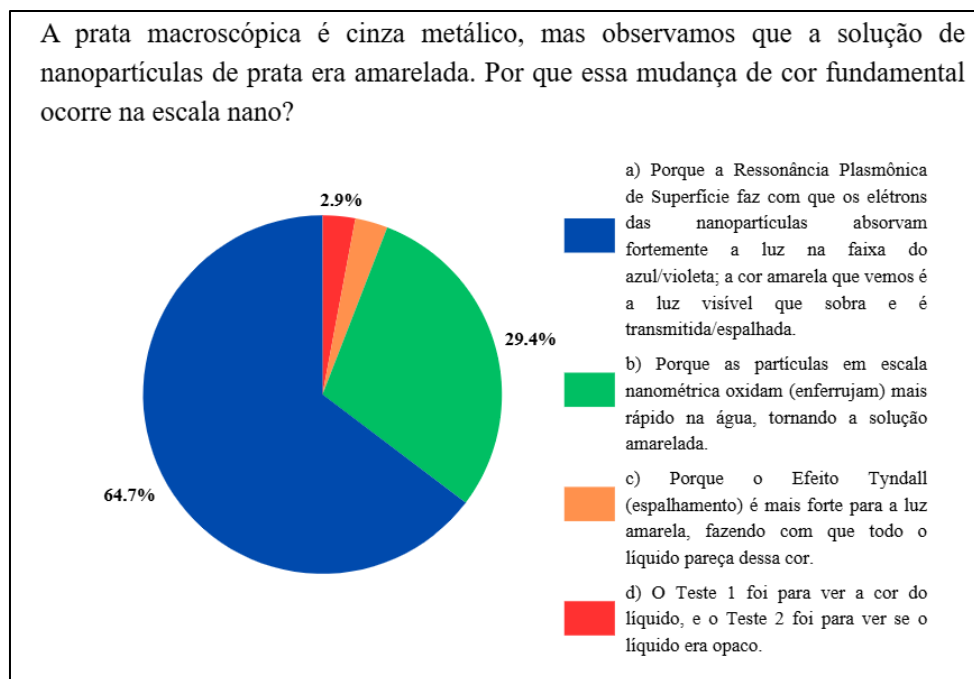
Fonte: Elaborado pelo autor

A fenomenologia da coloração amarelada das nanopartículas de prata foi também colocada como um questionamento aos discentes, pois o objetivo disso se fundamenta em verificar a compreensão dos motivos que levam essas nanopartículas a possuírem tal cor, dado que a prata comercial tem aspecto totalmente divergente. De acordo com os dados (Gráfico 7), 64,7% dos alunos assinalaram o fenômeno de ressonância plasmônica de superfície como a causa das propriedades ópticas das NPAG's (alternativa A), o que demonstra uma assimilação satisfatória de um conceito de FMC.

Todavia, é evidente também que 29,4% da turma atribuiu o fenômeno de cor da prata nanométrica como um processo decorrente da oxidação dessas nanopartículas na água (alternativa B). Esse dado sugere que, diante de um aspecto novo e contraintuitivo (visto que

os discentes possuem apenas uma ideia do metal prata), uma parcela dos alunos recorreu a subsunções prévias de reações químicas que ocorrem no cotidiano para ancorar essa nova informação, ou seja, o fato de a prata coloidal possuir o aspecto amarelado se daria erroneamente a um processo de ferrugem (oxidação). Ademais, uma minoria (composta por 5,9%) assinalou as causas mais improváveis, dado pelas alternativas c e d.

Gráfico 7 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 4B



Fonte: Elaborado pelo autor

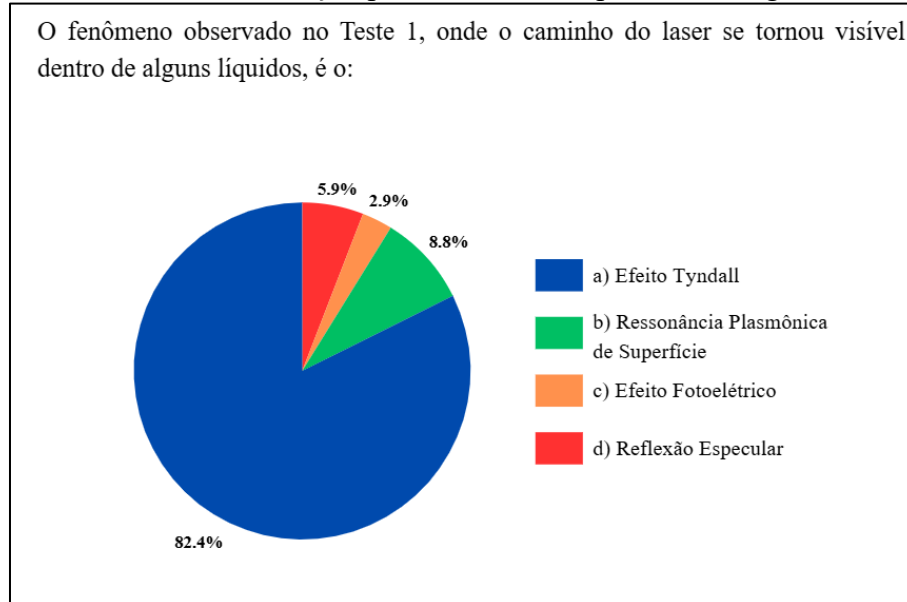
Para corroborar o prognóstico da Pergunta 3A, a Pergunta 5B questionou os alunos qual seria o efeito físico relacionado ao fenômeno observado no Teste 2 em algumas amostras, especialmente nas amostras de NPAg's e de leite diluído, em que foi possível visualizar o caminho do feixe do laser e a zona de radiação propagado por ele dentro de cada amostra coloidal (ilustrado no Gráfico 8).

Nesse sentido, mais de 80% da turma relacionou corretamente o fenômeno de espalhamento de cada coloide com o efeito Tyndall (alternativa A). Esse alto desempenho sugere que a natureza visual e concreta do experimento facilitou a ancoragem cognitiva do conceito, confirmando a eficácia das demonstrações visuais no ensino de Óptica, observação esta já relatada na literatura por (Azevedo *et al.*, 2009).

Adicionalmente, uma minoria da turma (composta por 8,8%) confundiu o efeito dado com a reflexão especular, um erro conceitual plausível, uma vez que o espalhamento, sob uma perspectiva microscópica, é dado por uma série de reflexões difusas, sendo uma tentativa válida

de racionalização por parte desses alunos. Ainda, 5,9% e 2,9% atribuíram o fenômeno à ressonância plasmônica de superfície e ao efeito fotoelétrico, respectivamente, o que indica que esses estudantes não compreenderam o mecanismo físico observado no Teste 1.

Gráfico 8 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 5B



Fonte: Elaborado pelo autor

As duas últimas questões do formulário pós-aula centraram-se na avaliação da intervenção didática aplicada, em como os educandos reagiram a esse novo tipo de proposta pedagógica. Diante disso, a Pergunta 6B foi: “*O que você achou da atividade de investigação (o mistério dos 4 líquidos)? Ela ajudou você a entender por que os nanomateriais são diferentes dos materiais comuns? Explique sua opinião.*”.

Em conformidade com os dados obtidos (disponível na Tabela F-2 do Apêndice F), classificou-se o nível de satisfação e a percepção de aprendizado em quatro categorias distintas. Essa categorização foi realizada *a posteriori*, mediante uma leitura flutuante de todas as respostas para a identificação de padrões semânticos recorrentes. O critério de agrupamento baseou-se na similaridade dos relatos, considerando tanto a valoração afetiva (gostar ou não) quanto a declaração explícita sobre a contribuição do experimento para o entendimento do conteúdo. O quantitativo de 45,2% das respostas foi classificado na primeira categoria (“*Aprovação do Método e Sensação de Aprendizado*”), baseado no quão a aula foi atrativa para esses alunos, de modo a facilitar o entendimento dos conceitos apresentados.

A segunda categoria “*Aprovação do Método, mas com dificuldade no conteúdo*” teve um quantitativo de 11,8% da sala, de maneira que eles validam a metodologia aplicada,

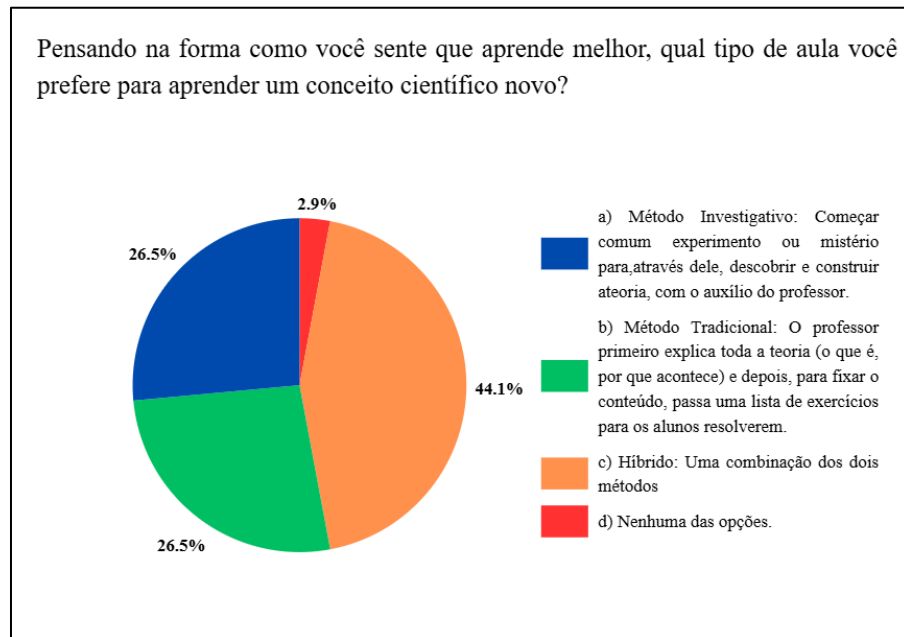
entretanto sinalizam que os conceitos abordados são complexos e que precisam de mais tempo ou reforço para assimilação do conteúdo. Uma parcela expressiva de 26,5% das respostas submetidas foi classificada como “*Apenas Aprovação*”, dado que esses discentes não detalharam suas opiniões a despeito da proposta aplicada. Por fim, 17,6% das respostas foram enquadradas na categoria “*Não Gostaram / Não Responderam*”. Neste caso, esses alunos responderam negativamente ou deixaram a pergunta sem resposta.

Sendo assim, a aceitação da metodologia investigativa foi altíssima, com mais de 80% da turma aprovando a ABI, e em contraste disso, em torno de 20% da turma sinalizou a necessidade de reforço e discussão dos conceitos teóricos, de modo que essa parcela consiga a conexão dos efeitos experimentais observados com a teoria física. Esse é um problema esperado em uma aula introdutória de um tema complexo, sugerindo que o momento de discussão no pós-experimento é essencial para garantir que as hipóteses desenvolvidas na etapa experimental se traduzam em conceitos sólidos para os discentes.

A última questão do formulário pós-aula questionou os alunos sobre as suas preferências metodológicas de ensino (Gráfico 9), em que os resultados mostram um cenário bem diversificado. A opção predominante foi uma metodologia híbrida (que seria uma combinação da abordagem tradicional com a abordagem investigativa), escolhido por 44,1% da turma, o que indica que os estudantes reconhecem o valor da experimentação investigativa, mas ainda necessitam de uma sistematização teórica característicos do ensino tradicional, provavelmente pelo fato de já estarem acostumados a esse tipo de ensino.

Além disso, observa-se uma polarização de resultados entre as metodologias tradicional e a ativa: 26,5% optaram pelo método investigativo, dado a rápida adaptação e gosto pelo protagonismo científico desses discentes durante a intervenção pedagógica, enquanto idênticos 26,5% mantiveram a preferência pelo método tradicional. Essa quantidade expressiva de alunos que preferem uma abordagem tradicional corrobora com as discussões teóricas sobre a resistência discente a novas abordagens pedagógicas, efeito esse já observado por Andrews et al., (2022). Nesse contexto, o processo de sair de uma conduta de aprendizagem passiva para uma atitude ativa requer um esforço cognitivo que pode gerar insegurança. Tal fenômeno foi perceptível durante a intervenção, manifestando-se tanto na hesitação de alguns grupos em formular hipóteses sem a validação prévia do docente, quanto em relatos nos questionários, onde discentes expressaram ter se sentido 'perdidos' durante a execução autônoma do experimento. Isso justifica, provavelmente, essa preferência majoritária por uma estratégia didática que equilibre o método investigativo com o suporte explicativo do método tradicional.

Gráfico 9 – Distribuição percentual das respostas da Pergunta 7B



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Percepções da intervenção pedagógica

Depois de os alunos responderem ao formulário pré-aula, iniciou-se uma discussão dialogada (com uso do quadro branco) a respeito dos conceitos centrais que seriam abordados no experimento, como absorção, espalhamento, ressonância e transmissão da luz. De início, foi perguntado aos discentes a respeito da definição de luz. Nessa pergunta, denotou-se que os alunos não compreendiam exatamente o que é a luz em sua forma mais natural. Enquanto alguns definiram a luz como uma partícula, outros respondiam como algo que faz brilhar ou que causa luminosidade, além de que outros alunos chegaram a responder como uma “onda que carrega calor”. Ou seja, a maioria dos estudantes não compreendem integralmente o conceito de luz, embora haja no imaginário popular deles como “algo que brilha e que realiza fenômenos”, como refração e reflexão.

Discutiu-se, também, sobre como funciona a formação das cores em um objeto. Os educandos chegaram no consenso de que a cor é algo inato da matéria, ou seja, a tampa de uma caneta é vermelha, por exemplo, pelo simples fato de o vermelho ser uma propriedade desse material, no caso fazer parte dos constituintes desse material. Nessa pergunta, tentou-se perceber se os discentes entendiam os conceitos de absorção e reflexão (ou espalhamento), todavia, durante a discussão, o docente percebeu que os alunos não compreendiam esses conceitos e nem como eles se relacionavam com a formação de cor em um objeto.

Ademais, quanto ao conceito de espalhamento, os educandos demonstraram total desconhecimento desse fenômeno, mesmo que eles tenham reconhecido que o espalhamento ocorre em partículas de poeira suspensas no ar, visto que, no formulário pré-aula, uma das questões abordavam essa situação. Ainda, poucos discentes confundiram o espalhamento com o conceito de reflexão, mas, de forma geral, esse fenômeno óptico não fora sequer lecionado em sala de aula, conforme os relatos dos próprios alunos. O fenômeno de ressonância, de maneira igual, não foi reconhecido inicialmente pelos discentes, embora estivesse no conteúdo programático da disciplina.

Por essa perspectiva, denota-se preliminarmente a falta de subsunções por parte dos estudantes, em que tal situação dificulta, pela TAS, a construção de um conhecimento significativo. Diante disso, para tentar contornar esse cenário, o docente elaborou uma aula de revisão, em forma expositiva, em que foram abordados todos os tópicos de óptica necessários, que serão usados como ferramentas para a compreensão da aula investigativa a ser conduzida posteriormente. Especificamente, nessa aula, foram discutidos os assuntos sobre a natureza da luz e os fenômenos ópticos, como absorção, transmissão, espalhamento e ressonância. Vale ressaltar que não foi realizado um aprofundamento desses conteúdos, sendo exposto apenas os princípios básicos.

Posteriormente, solicitou-se que os alunos formassem equipes de seis integrantes. Contudo, verificou-se que existiam equipes com sete e com nove integrantes, enquanto havia uma equipe com apenas duas pessoas. Nesse caso, que determinados integrantes apresentaram alguma resistência à solicitação inicial do docente, preferiu-se manter a disposição arranjada pelos próprios alunos, como meio de manter a colaboratividade deles para com a intervenção em execução. Esses fenômenos socioculturais, já reportados por Villas (2009), são decorrentes das redes de sociabilidade formadas naturalmente no espaço escolar. Assim, foram distribuídos os kits experimentais (Figura 8) juntamente com os roteiros de condução experimental (Apêndice C), instigando os educandos a realizarem a investigação com o auxílio dos roteiros e do professor (que estava em uma função mais orientativa, como um facilitador, do que um mero transmissor de conhecimentos).

Figura 8 – Kit experimental da intervenção didática



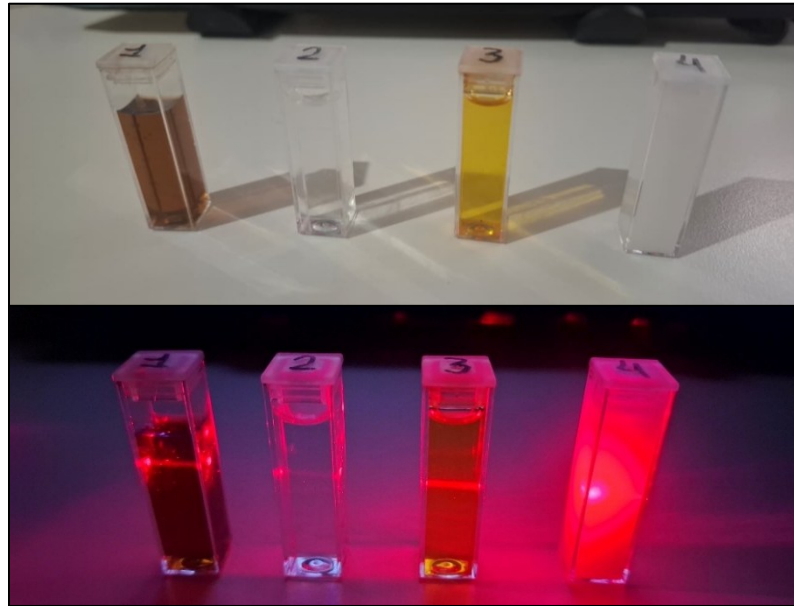
Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta atividade investigativa, foi perguntado aos discentes qual dos quatro fluidos fornecidos era o nanomaterial (no caso, NPAg's). Os alunos, inicialmente, não conheciam o conceito de nanociência, de modo que foi necessário fazer a introdução desse conceito a partir da discussão do docente com cada equipe durante a experimentação. Sequencialmente, os alunos incidiram o laser vermelho sobre cada amostra (Figura 9) e, depois, a luz violeta foi projetada na amostra e no anteparo de papel (Figura 10).

Este experimento teve como objetivo identificar em quais amostras haveria o fenômeno de espalhamento e de absorção da luz, além de que, ao longo da atividade, foi fornecida uma orientação para auxiliar a identificação do nanomaterial, que seria, nesse caso, a combinação das duas propriedades ópticas já mencionadas. Ainda assim, algumas equipes apresentaram interpretações equivocadas e selecionaram uma amostra que não correspondia ao nanomaterial.

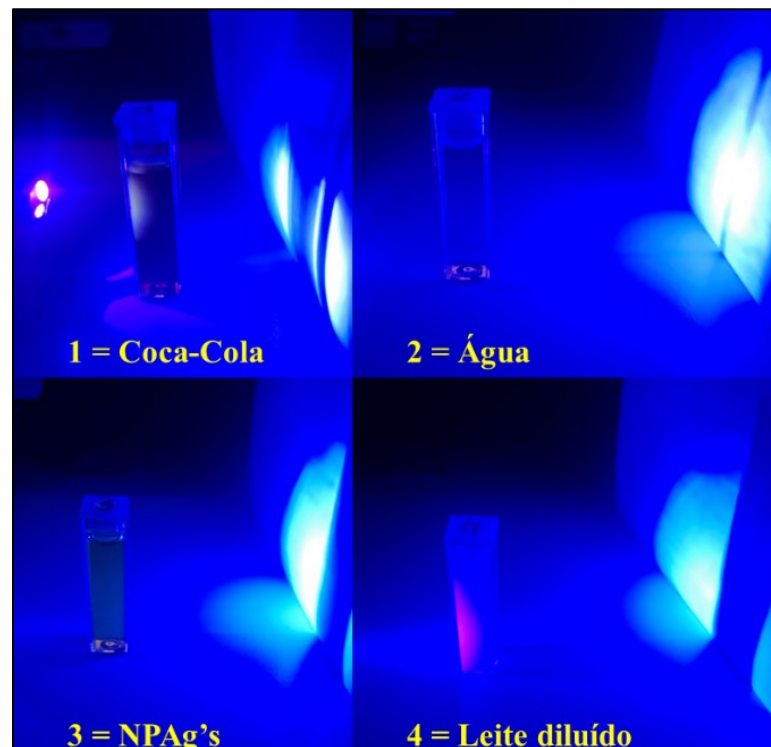
Durante o procedimento de interação do laser vermelho (Teste 1), apenas as Amostras 3 e 4 tem o efeito Tyndall bem proeminente, de modo que é possível ver a trajetória do laser e uma zona de radiação que ilumina toda a amostra. A Amostra 1 tem a trajetória do feixe visualizado na Figura 9 possivelmente pelo contraste da exposição de luz durante a obturação da imagem, o que não foi visto durante a experimentação. A interação da luz violeta com as amostras líquidas (Teste 2) revelou que: nas Amostras 1 e 4 ocorreu espalhamento da luz, enquanto na Amostra 2 a luz violeta foi totalmente transmitida, contudo, na Amostra 3, houve total absorção da luz incidida.

Figura 9 – Amostras antes e depois da incidência do laser vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 – Incidência da luz violeta nas Amostras 1, 2, 3 e 4



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, muitas equipes ainda se confundiram com os conceitos elementares de óptica, seja assimilando o fenômeno de espalhamento com o fenômeno de transmissão ou se enganando entre os fenômenos de espalhamento e reflexão. Por exemplo, determinadas equipes relataram que estava ocorrendo espalhamento, justificando essa conclusão pelo simples fato de

o laser conseguir atravessar o recipiente. Contudo, sob a perspectiva física, deve-se esclarecer que a passagem da luz através de um meio transparente caracteriza o fenômeno de transmissão, e não necessariamente o de espalhamento, como equivocadamente interpretado pelos grupos. Outra equipe associou o comportamento da Amostra 4 (leite diluído) a uma possível reflexão (visto na Figura 9), argumentando que o feixe do laser não estava visível dentro do líquido. Entretanto, a explicação científica para esse caso é que ocorre, de fato, um espalhamento intenso, capaz de gerar uma zona de radiação difusa que ilumina toda a amostra, diferindo da visualização de um feixe linear e definido. Assim, durante a intervenção, essas equipes foram auxiliadas pelo docente, para que estes equívocos fossem devidamente explicados de maneira correta.

Ao fim da investigação, o docente mediou uma discussão entre as próprias equipes, para que elas pudessem expor as suas hipóteses e eventuais justificativas. Observou-se que metade das equipes acertou qual amostra seria o nanomaterial (no caso, as NPAg's). Todavia, duas equipes afirmaram que a Amostra 4 seria o nanomaterial, baseando sua hipótese na aparência do líquido e na alegação de que o efeito Tyndall não era “perceptível”. Na análise do docente, contudo, nota-se que o efeito estava presente, manifestando-se como uma zona de radiação devido à alta concentração de partículas, o que gerou a confusão interpretativa por parte dos estudantes. Outra equipe afirmou que a Amostra 1 seria o nanomaterial, baseando-se na ocorrência de um brilho durante a incidência do laser. Analisando o ocorrido, infere-se que tal efeito visual observado pelos discentes foi provocado, provavelmente, pela reflexão da luz em poucas bolhas residuais de CO₂ do refrigerante (retidas na amostra, embora ela tenha sido exposta na preparação experimental para eliminação dos resíduos gasosos), confundindo a interpretação do grupo. De forma geral, observou-se que todos os alunos se engajaram para a resolução da investigação, o que contribuiu para uma aula mais dinâmica e descontraída.

Por fim, cabe uma reflexão crítica sobre a natureza dos conhecimentos mobilizados. Considerando que a intervenção utilizou o Efeito Tyndall e as propriedades ópticas de NPAg's como objeto de estudo, observa-se que a apropriação conceitual dos estudantes se deu predominantemente através das leis da Óptica (espalhamento, reflexão e absorção). Nesse sentido, a N&N não figuraram apenas como um conteúdo informativo isolado, mas atuaram como o contexto integrador que deu sentido a esses fenômenos físicos. Portanto, embora a estrutura cognitiva construída pelos discentes tenha bases na Óptica Clássica, o trabalho cumpriu o papel de alfabetização científica inicial em N&N, introduzindo o conceito fundamental de que as propriedades da matéria (neste caso, a cor e a interação com a luz) se

alteram drasticamente na escala nanométrica, despertando a curiosidade científica para esse campo emergente.

6 CONCLUSÃO

Uma sequência didática de Física, contendo conceitos elementares de Nanociência e Nanotecnologia (N&N), que estabelece conexão e contextualização com o conteúdo ministrado em Óptica e Física Moderna no Ensino Médio. A partir dos resultados obtidos pela intervenção didática, que explorou as propriedades ópticas de nanopartículas de prata (NPAg's) em comparação com outras soluções (coloidais ou não), especialmente o efeito Tyndall, foi possível constatar que a inserção de conteúdos contemporâneos, realizada com auxílio de metodologias ativas (no caso, a ABI), promove um melhor engajamento dos discentes em relação à aprendizagem e favorece a sua alfabetização científica.

Inicialmente, a avaliação diagnóstica aplicada antes da intervenção revelou a carência de subsunçores científicos específicos (como a definição formal de nanociência ou espalhamento) na estrutura cognitiva dos alunos. Contudo, isso não inviabilizou a ocorrência da aprendizagem significativa, pois a metodologia investigativa permitiu mobilizar subsunçores mais gerais e observacionais presentes na estrutura cognitiva dos discentes, como a percepção visual da luz e noções intuitivas sobre misturas. Dessa forma, a intervenção atuou promovendo a diferenciação progressiva, partindo desses conceitos intuitivos (âncoras) para a construção dos novos significados científicos.

De acordo com os dados obtidos, apenas 28,2% desses discentes conseguiram definir o conceito de luz de forma suficientemente aceitável do ponto de vista físico, embora essa turma já tivesse estudado esses conceitos elementares de luz anteriormente, além das confusões conceituais entre os fenômenos de espalhamento e reflexão. Esse cenário, por sua vez, reforça a necessidade de organizadores prévios e de uma intervenção que ancorasse os novos conceitos de nanociência com os conhecimentos elementares de Óptica.

A transposição didática, que foi estruturada em um ciclo investigativo, demonstrou ser eficaz, dado que a comparação com os resultados pré-aula e pós-aula revelou uma evolução predominante. Ficou evidenciado que 76,5% dos estudantes compreenderam a influência da escala de um material em função das suas propriedades fundamentais, sobretudo as ópticas, que foram o foco deste trabalho. Além disso, 64,7% da turma conseguiu assimilar a coloração amarelada das NPAg's como consequência do fenômeno de Ressonância Plasmônica de Superfície dos elétrons ao absorverem a luz na frequência específica do azul/violeta. Mais de 80% dos discentes compreenderam o efeito Tyndall como ferramenta visual para determinação das amostras coloidais.

Quanto à percepção dos estudantes sobre a metodologia, verificou-se uma alta taxa de aprovação da intervenção pedagógica aplicada, de mais de 80% da turma. Contudo, quanto à escolha (ou preferência) do modelo de aula, a maioria dos alunos, composto por 44,1%, optou por uma metodologia mista/híbrida, que possa combinar a teoria tradicional (que comumente aplicada em sala de aula) com a investigação experimental. Esse resultado sugere que, mesmo que a ABI fomente o protagonismo científico, a mediação docente na construção dos conceitos permanece indispensável no processo de ensino-aprendizagem, a fim de garantir uma segurança cognitiva, principalmente na docência de temas de difícil compreensão.

Portanto, este trabalho evidencia que é viável e necessário integrar a N&N ao currículo do Ensino Médio. A proposta experimental apresentada se mostrou capaz de transformar a sala de aula em um laboratório, em que a Física passa a ser vista como algo além de fórmulas e equações para se tornar parte da realidade visual dos educandos, até nas suas escalas mais fundamentais. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação desta sequência didática em um universo amostral ampliado, abrangendo um maior número de turmas e contextos escolares. Sugere-se também a retomada do tema Nanociência e Nanotecnologia (N&N) articulado a outros conteúdos programáticos obrigatórios da disciplina de Física, permitindo assim avaliar a consolidação e a retenção desses conhecimentos a longo prazo.

REFERÊNCIAS

AHIRE, Satish Arvind; BACHHAV, Ashwini Ashok; PAWAR, Thansing Bhavsing; JAGDALE, Bapu Sonu; PATIL, Arun Vitthal; KOLI, Prashant Bhimrao. The Augmentation of nanotechnology era: A concise review on fundamental concepts of nanotechnology and applications in material science and technology. **Results in Chemistry**, [S. l.], v. 4, p. 100633, 2022.

ANDREWS, Madison; PRINCE, Michael; FINELLI, Cynthia; GRAHAM, Matthew; BORREGO, Maura; HUSMAN, Jenefer. Explanation and Facilitation Strategies Reduce Student Resistance to Active Learning. **College Teaching**, [S. l.], v. 70, n. 4, p. 530-540, 2022.

ANTUNES FILHO, Sérgio; BACKX, Bianca Pizzorno. Nanotecnologia e seus impactos na sociedade. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 16, n. 40, 2003.

ANTUNES FILHO, Sérgio; SANTOS, Mayara Santana; BACKX, Bianca Pizzorno. É possível falar de nanotecnologia na escola? Uma proposta de artigo científico para crianças e adolescentes. **Revista Educação Pública**, [S. l.], v. 23, maio 2023.

AUSUBEL, David P. **Educational Psychology: A cognitive view**. 1. ed. New York: Holt, Rinehart and Winston, Inc, 1968.

AZEVEDO, Hernani Luiz; JUNIOR, Francisco Nairon Monteiro; SANTOS, Thiago Pereira dos; CARLOS, Jairo Gonçalves; TANCREDO, Bruno Nogueira. O uso do experimento no ensino da Física: tendências a partir do levantamento dos artigos em periódicos da área no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7., 2009, Florianópolis. **Atas** [...]. Florianópolis: ABRAPEC, 2009.

BATISTA, Poliana Targino. **O uso das tecnologias digitais no ensino de física: recursos, percepções e desafios**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ensino de Ciências e Matemática) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Patos, 2020.

BATISTA, Selton Jordan Vital; PEREIRA, Ademir de Souza. Análise das habilidades e competências específicas da BNCC com enfoque em Ciências da Natureza: aproximações oportunidades pela perspectiva CTSA. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 14., 2023, Campina Grande. **Anais** [...]. Campina Grande: Realize Editora, 2023.

BAYDA, Samer; ADEEL, Muhammad; TUCCINARDI, Tiziano; CORDANI, Marco;

RIZZOLIO, Flavio. The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine. **Molecules**, [S. l.], v. 25, n. 1, 2020.

BENETTI, Angelisa; WATANABE, Marcio. Abordagem da nanociência e nanotecnologia a partir da escala. **Novas Tecnologias na Educação**, [S. l.], v. 15, jul. 2017.

BOHREN, Craig F.; HUFFMAN, Donald R. **Absorption and Scattering of Light by Small Particles**. 1. ed. [S. l.]: Wiley-VCH, 1998.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília, 2000.

CADIOLI, Luiz Paulo; SALLA, Luzia Dizulina. Nanotecnologia: um estudo sobre seu histórico, definição e principais aplicações desta inovadora tecnologia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, [S. l.], v. 1, 2006.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Fundamentos Teóricos e Metodológicos do Ensino por Investigação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 765-794, 2018.

CHEN, Junqi; WEI, Shiqin; XIE, Haoyan. A Brief Introduction of Carbon Nanotubes: History, Synthesis and Properties. In: JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, 2021. **Proceedings** [...]. [S. l.]: IOP Publishing Ltd, 2021. v. 1948.

COSTA JUNIOR, João Fernando; LIMA, Presleyson Plínio de; ARCANJO, Cláudio Firmino; SOUSA, Fabrícia Fátima de; SANTOS, Márcia Maria de Oliveira; LEME, Mário; GOMES, Neirivaldo Caetano. Um olhar pedagógico sobre a Aprendizagem Significativa de David Ausubel. **Revista Brasileira de Ensino e Aprendizagem**, [S. l.], v. 5, p. 51-68, 2023.

CUNHA MICHEL, Ricardo. **Introdução a Nanociência e Nanotecnologia para o Ensino Médio**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

DREXLER, K. Eric. Engines of Construction. In: DREXLER, K. Eric. **Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology**. [S. l.]: Anchor Books, 1986.

DREXLER, Eric; PETERSON, Chris; PERGAMIT, Gayle. **Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution**. [S. l.]: William Morrow and Company, Inc, 1991.

FASOLINO, A.; LOS, J. H.; KATSNELSON, M. I. Intrinsic ripples in graphene. **Nature Materials**, [S. l.], v. 6, n. 11, p. 858-861, 2007.

FECHINE, Pierre Basilio Almeida Fechine; ANDRADE NETO, Davino Machado; CARNEIRO, Samuel Veloso. Introdução aos Nanomateriais. In: FECHINE, P. B. A. (org.). **Avanços no desenvolvimento de nanomateriais**. 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2020.

FEU, Karla S.; ASSIS, Francisco F. De; NAGENDRA, Siddavatam; PILLI, Ronaldo A. O prêmio nobel de química em 2016: Máquinas moleculares. **Química Nova**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 113-123, 2017.

FEYNMAN, Richard P. **There's Plenty of Room at the Bottom An Invitation to Enter a New Field of Physics**. [S. l.]: Resonance (Caltech), 2011.

FRANCISCO CACHAPUZ, António; SHIGUNOV NETO, Alexandre; COELHO DA SILVA, André. Formação inicial de professores de Física no Brasil e em Portugal: uma análise comparativa de modelos de formação. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, [S. l.], v. 101, n. 257, 2019.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. **Nature Materials**, [S. l.], v. 6, p. 183-191, 2007.

GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.

HECHT, Eugene. **Optics**. 5. ed. [S. l.]: Pearson, 2017.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

HOCELLA JR., Michael F. Nanoscience and technology: the next revolution in the Earth sciences. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 203, p. 593-605, 2002.

HUGHES, Kevin J.; IYER, Kavita A.; BIRD, Robert E.; IVANOV, Julian; BANERJEE, Saswata; GEORGES, Gilles; ZHOU, Qionqiong Angela. Review of Carbon Nanotube Research and Development: Materials and Emerging Applications. **ACS Applied Nano Materials**, [S. l.], v. 7, n. 16, p. 18695-18713, 2024.

KELLY, K. Lance; CORONADO, Eduardo; ZHAO, Lin Lin; SCHATZ, George C. The Optical Properties of Metal Nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment. **The Journal of Physical Chemistry B**, [S. l.], v. 107, n. 3, p. 668-677, 2003.

LEONEL, André Ary; LAMY-PERONNET, Rafaela Samagaia. Nanociência e Nanotecnologia: Do debate público à sala de aula. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 9., 2013, Águas de Lindóia. **Atas [...]**. Águas

de Lindóia, 2013.

LIMA, Maria Consuelo A.; JOSÉ, Maria; ALMEIDA, P. M. Articulação de textos sobre nanociência e nanotecnologia para a formação inicial de professores de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 34, 2012.

LIRA, Aline Telma Silva; SENNA JUNIOR, Vicente Antonio de. Desafios na aplicação de práticas laboratoriais de ciências e biologia nas escolas públicas. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 10, n. 10, p. 5697-5710, 2024.

LUCKESI, Cipriano Carlos. **Avaliação da aprendizagem escolar: Sendas Percorridas**. 1992. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 1992.

MARTINS, Roberto de Andrade; SILVA, Cibelle Celestino. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 37, n. 4, 2015.

MONTEIRO, Maiara Mota. **A inserção dos conceitos de nanotecnologia no Ensino Médio: Uma revisão sistemática da literatura**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal do Alagoas, Maceió, 2024.

MORAN, José. Tecnologias digitais para uma aprendizagem ativa e inovadora. *In*: MORAN, José. **A Educação que Desejamos: novos desafios e como chegar lá**. 5. ed. São Paulo: Papyrus, 2007.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. 1. ed. São Paulo: Editora Moraes, 1982.

MOREIRA, Marco Antonio. Challenges in physics teaching. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 43, p. 1-8, 2021.

MOREIRA, Marco Antonio. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 32, n. 94, p. 73-80, 2018.

MORI, Thiago José de Almeida. **Materiais e técnicas para nanoestruturas magnetoelétricas compostas**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

NOVOTNY, Lukas; HECHT, Bert. **Principles of Nano-Optics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

PANJA, Avirup; PATRA, Prasun. A review on Quantum Dots (QDs) and their biomedical applications. **4open**, [S. l.], v. 6, p. 1, 2023.

PEDASTE, Margus; MÄEOTS, Mario; SIIMAN, Leo A; JONG, Ton de; RIESEN, Siswa A N van; KAMP, Ellen T; MANOLI, Constantinos C; ZACHARIA, Zacharias C; TSOURLIDAKI, Eleftheria. Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. **Educational Research Review**, [S. l.], v. 14, p. 47-61, 2015.

PEDROSA, Márcia Blandina Aparecida de Oliveira; PINTO, Elisângela Silva. Nanociência e nanotecnologia no ensino médio: abordagem no contexto do ensino remoto. **Revista Dynamis**, [S. l.], v. 29, 2023.

PENA, Fábio Luís Alves. A influência dos PCN sobre a pesquisa em ensino de física: um estudo a partir de artigos publicados em periódicos nacionais especializados na área. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7., 2009, Florianópolis. **Atas [...]**. Florianópolis: SBF, 2009.

PEREIRA, L. A. A.; GARCIA, R. C.; GÓMEZ, S. L.; TURCHIELLO, R. F. Espalhamento de luz e o Efeito Tyndall: um laboratório instrucional a nível de graduação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 44, 2022.

PIRES, Gerson Oliveira; SANTOS, Luciano Nascimento; KOHN, Carla Daniela. A avaliação como um instrumento diagnóstico: uma reflexão sobre a metodologia utilizada nas turmas do 4º e 5º anos do Ensino Fundamental da Escola Municipal Recanto de Fada no município de Rio Real Bahia. **Cadernos de Graduação**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 121-136, 2016.

QUINTILI, Mario. Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño. **Centro de Estudios en Diseño y Comunicación**, [S. l.], v. 42, p. 125-155, 2012.

RAFIQUE, Muhammad; TAHIR, Muhammad Bilal; RAFIQUE, Muhammad Shahid; HAMZA, M. History and fundamentals of nanoscience and nanotechnology. In: **Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications**. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 1-25.

ROCO, Mihail C.; MIRKIN, Chad A.; HERSAM, Mark C. **Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook**. [S. l.]: Springer, 2010. v. 1.

RODRIGUES, José Jorge Vale; OLIVEIRA, Eniz Conceição; GUERRA, Cecília. The science-technology-society approach focused on energy in physics teaching: a systematic literature review. **Educação e Pesquisa**, [S. l.], v. 50, 2024.

ROSA, José Eugênio Brum da; KALHIL, Josefina Barrera. Metodologias ativas no ensino de física: um panorama da pesquisa stricto sensu brasileira. **Colloquium Humanarum**, [S. l.], v.

16, n. 4, p. 121-136, 2019.

SANTOS, Leandro José dos; ROCHA, Guilherme Pereira; FREITAS, Rossimiriam Pereira; ALVES, Rosemeire Brondi. Fulereño [C60]: química e aplicações. **Química Nova**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 680-693, 2010.

SYMON, Keith R. **Mecânica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Campos, 1996.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia de pesquisa-ação**. 18. ed. São Paulo: Cortez Editora, 2011.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

TRIPP, David. Pesquisa-ação: uma introdução metodológica. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 443-466, 2005.

VASCONCELOS, Joyciane Coelho; LIMA, Patrícia Verônica Pinheiro Sales; ROCHA, Leonardo Andrade; KHAN, Ahmad Saeed. School infrastructure and public investment in Education in Brazil: the importance of educational performance. **Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação**, [S. l.], v. 29, n. 113, p. 874-898, 2021.

VILLAS, Sara. **Formas de sociabilidade entre alunos de uma escola de ensino médio/técnico**. 2009. 228 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e Física Moderna** - Sears & Zemansky. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

ZYTKUEWISZ, Matheus Almeida Bauer; BEGO, Amadeu Moura. O que é o Ensino por Investigação, afinal? **Chemical Education in Point of View**, [S. l.], v. 7, 2022.

APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA PRÉ-AULA

Olá! Este questionário é anônimo e serve para o professor entender o que você já sabe sobre os temas da aula de hoje. **Não vale nota!** Responda com sinceridade o que você pensa.

1A. O que você acha que é a luz?

2A. Por que uma camisa preta no sol esquenta mais do que uma camisa branca?

3A. Em um quarto com poeira, por que às vezes conseguimos ver o "caminho" do feixe de luz que entra pela janela?

- a) Porque as partículas de poeira espalham no feixe de luz e assim é possível ver a trajetória*
- b) Devido a presença de éter no espaço, que faz com que a luz tenha o caminho 'marcado'*
- c) Não ocorre nenhum fenômeno físico, é apenas uma ilusão de óptica*
- d) Se trata de um fenômeno de refração com as partículas da poeira*

4A. O prefixo "nano" (em nanociência) refere-se a uma escala de tamanho. Essa escala é:

- a) Do tamanho de coisas que podemos ver, como grãos de areia.*
- b) Do tamanho de coisas microscópicas, como uma célula humana ou uma bactéria.*
- c) Milhares de vezes menor que uma célula, próximo da escala dos átomos e moléculas.*
- d) Milhares de vezes menor que um átomo, próximo da escala de subpartículas.*

5A. Durante as aulas de Física na escola, você consegue compreender os assuntos abordados?

- a) Sim, quase sempre: Compreendo os assuntos sem grande dificuldade.*
- b) Na maioria das vezes: Preciso me esforçar, mas geralmente entendo o principal.*
- c) Às vezes: Entendo os tópicos mais fáceis, mas me perco nos mais difíceis.*
- d) Raramente: A Física geralmente parece muito confusa e quase nunca consigo acompanhar.*

APÊNDICE B – ROTEIRO EXPERIMENTAL

Roteiro Investigativo – Física – EEM Eliézer de Freitas Guimarães

Equipe (Nomes):

1. O desafio

Vocês receberam quatro amostras líquidas misteriosas. Elas são quimicamente diferentes. **Apenas uma delas contém nanopartículas de prata.**

A sua missão: Atuar como detetives científicos. Usando apenas ferramentas que geram luz, vocês devem descobrir as propriedades ópticas de cada amostra e, ao final, identificar corretamente a natureza da amostra corresponde a cada líquido.

2. Materiais utilizados

- 4 cubetas transparentes com as amostras misteriosas.
- Laser vermelho (tipo *pointer*)
- Lanterna violeta (LED)
- Um anteparo (parede ou folha de papel branca)

3. A investigação

Fase 1: Inspeção visual

Observem atentamente as quatro amostras.

Descrevam a aparência de cada amostra (cor, transparência etc.):

- Amostra 1:

- Amostra 2:

- Amostra 3:

- Amostra 4:

Fase 2: O teste do laser vermelho (Teste 1)

Vamos descobrir quais amostras são "soluções verdadeiras" e quais são "colóides" usando o Efeito Tyndall.

Instruções:

1. Em um ambiente com pouca luz, apontem o feixe do laser vermelho para que ele atravesse o líquido.
2. Observem atentamente se o caminho (trajeto) do feixe de luz é visível dentro do líquido.

Amostra (laser vermelho)	O caminho do feixe é visível dentro do líquido? (Sim ou Não)
Amostra 1	
Amostra 2	
Amostra 3	
Amostra 4	

Fase 3: O teste da lanterna violeta (Teste 2)

Agora vamos usar a lanterna violeta para testar uma propriedade óptica especial. O objetivo é ver qual amostra absorve (bloqueia) especificamente a luz violeta.

Instruções:

1. Posicionem a amostra bem perto do anteparo (folha de papel).
2. Acendam a lanterna violeta e apontem-na para que a luz atravesse o líquido e atinja o anteparo.
3. Observem a luz que chega no papel. Ela é forte, fraca ou totalmente bloqueada?

Amostra (Lanterna violeta)	A luz violeta atravessa (de forma bem fraca) o líquido e ilumina o papel? (Sim ou Não)
Amostra 1	
Amostra 2	
Amostra 3	
Amostra 4	

4. Análise e Conclusão

Usem os dados de todas as fases para construir seu argumento.

4.1. Resumo das evidências:

Para ajudar na análise, preencham a tabela-resumo com todos os seus resultados.

Amostra nº	Características (Fase 1)	Espalha o laser vermelho? (Fase 2)	Absorve luz violeta? (Fase 3)
1			
2			
3			
4			

4.2. Identificação

Agora, usem a lógica para identificar cada amostra.

- Passo 1: Em quais amostras o laser vermelho foi visível (Teste 1)? Essas são os seus colóides.

Amostras: _____

- Passo 2: Agora, olhe *apenas* para as amostras que você listou acima. Qual foi a diferença de comportamento entre elas no Teste 2 (lanterna violeta)?

4.3. Veredito: Com base na combinação única de propriedades, qual amostra é o nanomaterial?

4.4. Sobre o veredito: Qual foi a explicação que fez identificar o nanomaterial e o diferenciou de todos os outros líquidos misteriosos?

APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA PÓS-AULA

Olá! Este questionário é anônimo e serve para o professor entender o que você compreendeu sobre os temas da aula de hoje. **Não vale nota!** Responda com sinceridade o que você pensa.

1B. Com base no que você observou e discutiu na aula de hoje, explique com suas palavras o que é "Nanociência". O que torna essa área da ciência especial ou diferente da ciência de materiais comuns?

2B. A observação de que as propriedades ópticas da prata são drasticamente diferentes na escala nano (coloração amarelada) em comparação com a escala macro (cinza metálico) demonstra que:

- a) As propriedades fundamentais de um material (como sua interação com a luz) podem ser dependentes da sua escala (tamanho).*
- b) A prata é um material que sempre absorve a luz violeta, mas só conseguimos ver isso em laboratório.*
- c) Todos os coloides, incluindo o leite, são nanomateriais.*
- d) Apenas o Efeito Tyndall prova que um material é nanométrico.*

3B. Qual foi a lógica científica da nossa investigação ao usar duas luzes diferentes (Teste 1 e Teste 2)?

- a) O Teste 1 (laser vermelho) identificou quais amostras eram coloides (via Efeito Tyndall), e o Teste 2 (luz violeta) identificou qual desses coloides possuía a absorção de luz específica do nanomaterial.*
- b) O Teste 1 (laser vermelho) mediu a absorção, e o Teste 2 (luz violeta) mediu o espalhamento.*
- c) Ambos os testes mediram o Efeito Tyndall; o violeta apenas tornou o efeito mais forte.*
- d) O Teste 1 foi para ver a cor do líquido, e o Teste 2 foi para ver se o líquido era opaco.*

4B. A prata macroscópica é cinza metálico, mas observamos que a solução de nanopartículas de prata era amarelada. Por que essa mudança de cor fundamental ocorre na escala nano?

a) Porque a Ressonância Plasmônica de Superfície faz com que os elétrons das nanopartículas absorvam fortemente a luz na faixa do azul/violeta; a cor amarela que vemos é a luz visível que sobra e é transmitida/espalhada.

b) Porque as partículas em escala nanométrica oxidam (enferrujam) mais rápido na água, tornando a solução amarelada.

c) Porque o Efeito Tyndall (espalhamento) é mais forte para a luz amarela, fazendo com que todo o líquido pareça dessa cor.

d) Porque a luz violeta usada no Teste 2 "tingiu" permanentemente a solução de prata, mudando sua cor para o oposto (amarelo).

5B. O fenômeno observado no Teste 1, onde o "caminho" do laser vermelho se tornou visível dentro de alguns líquidos, é o:

a) Efeito Tyndall

b) Ressonância Plasmônica de Superfície.

c) Efeito Fotoelétrico.

d) Reflexão Especular.

6B. O que você achou da atividade de investigação (o mistério dos 4 líquidos)? Ela ajudou você a entender *por que* os nanomateriais são diferentes dos materiais comuns? Explique sua opinião.

7B. Pensando na forma como você sente que aprende melhor, qual tipo de aula você prefere para aprender um conceito científico novo?

a) Método Investigativo: Começar com um experimento ou mistério para, através dele, descobrir e construir a teoria, com o auxílio do professor.

b) Método Tradicional: O professor primeiro explica toda a teoria (o que é, por que acontece) e depois, para fixar o conteúdo, passa uma lista de exercícios para os alunos resolverem.

c) Híbrido: Uma combinação dos dois métodos.

d) Nenhuma das opções.

APÊNDICE D – PLANO DE AULA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

PLANO DE AULA

1. IDENTIFICAÇÃO

Professor: Gabriel Gilberto Aguiar de Oliveira	Disciplina: Física	Tema: Princípios básicos de Nanociência e Nanotecnologia: Experimentação com o Efeito Tyndall	Data/Hora: 18 de novembro de 2025, 2 horas / aula.
--	------------------------------	---	--

2. PLANO

	OBJETIVOS	CONTEÚDOS	RECURSOS
GERAL	Desenvolver e aplicar uma sequência didática fundamentada na Aprendizagem Baseada em Investigação, na qual os discentes, a partir da experimentação com o Efeito Tyndall e as propriedades ópticas de nanopartículas de prata, são incentivados a formular questões, investigar fenômenos e construir explicações para os conceitos de óptica e nanociência estudados.	✓ Conceitos elementares de Óptica Geométrica e Óptica Física; ✓ Noções de escala; ✓ A nanoescala; ✓ Alguns conceitos de Física Moderna; ✓ Experimentação sobre o Efeito Tyndall com amostras coloidais.	✓ Apontador laser vermelho; ✓ Lanterna de luz violeta; ✓ Solução de nanopartículas de prata; ✓ Solução de líquidos comuns (Coca-Cola, Água e Leite); ✓ Roteiros experimentais impressos; ✓ Pincel para quadro branco; ✓ Apagador; ✓ Quadro branco.

	OBJETIVOS	CONTEÚDOS	RECURSOS
ESPECÍFICOS	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Verificar conhecimentos prévios dos discentes sobre quaisquer tópicos de Nanociência e Óptica; ✓ Revisar alguns aspectos de Física Básica anteriormente já aprendida em sala de aula, no caso, aos conceitos elementares de Óptica; ✓ Submeter os discentes a um procedimento experimental de Nanociência, utilizando a Aprendizagem Baseada em Investigação (ABI), de modo que eles reflitam e levantem hipóteses de como está ocorrendo o Efeito Tyndall na suspensão de nanopartículas de prata. ✓ Levantar hipóteses sobre as características ópticas das nanopartículas de prata. 		

3. PROCEDIMENTOS

INTRODUÇÃO	DESENVOLVIMENTO	CONCLUSÃO
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O questionário diagnóstico é aplicado para aferir os conhecimentos prévios da turma; ✓ A aula começa com uma questão-problema instigante: "Por que não conseguimos ver o caminho de um feixe de laser no ar? E no vácuo?". ✓ A partir do debate inicial dos alunos, o professor inicialmente revisa alguns conceitos de óptica e, assim, introduz a investigação, focada em como partículas invisíveis interagem com a luz. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Divididos em grupos, os alunos realizam a investigação prática em duas etapas: primeiro, exploram o Efeito Tyndall comparando diferentes soluções, observando quando o feixe de luz do laser se torna visível; ✓ Posteriormente, os alunos avaliam o comportamento das amostras na incidência de luz violeta; ✓ Em seguida, analisam as propriedades ópticas da solução de nanopartículas de prata, questionando por que sua cor difere da prata macroscópica; 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Na etapa final, o aprendizado é consolidado conectando os conceitos vistos; ✓ em laboratório com aplicações do mundo real, como o motivo da cor azul do céu e o uso da nanotecnologia em medicina;

✓ O professor deve solicitar aos discentes para que não sejam utilizados aparelhos celulares para realizar pesquisas na internet.

✓ Após a exploração, o professor media uma discussão em que os próprios alunos apresentam suas descobertas, e os conceitos científicos (espalhamento da luz, propriedades da nanoescala) são formalizados para explicar os fenômenos observados.

✓ Por fim, o questionário de avaliação é aplicado para verificar a compreensão dos conceitos e o impacto da aula investigativa.

4. AVALIAÇÃO

- ✓ Será feita por meio da aplicação de dois questionários diagnósticos antes e depois da intervenção, com o objetivo de verificar a evolução da compreensão dos alunos sobre conceitos específicos de óptica e de nanociência;
- ✓ De forma qualitativa, o professor avaliará o engajamento e o desenvolvimento de habilidades científicas dos alunos durante a aula, assim observando a capacidade das equipes em formular hipóteses, discutir os resultados experimentais e conectar os fenômenos observados com o cotidiano.

5. INDICAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

ZANON, R. A.; STRECK, L. **Nanociência e Nanotecnologia: uma abordagem para o Ensino Médio**. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, v. 2, n. 1, 2009.

PEREIRA, L. A. A. et al.. **Espalhamento de luz e o Efeito Tyndall: um laboratório instrucional a nível de graduação**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 44, p. e20220268, 2022.

BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. **Absorption and Scattering of Light by Small Particles**. New York: Wiley-VCH, 1998.

APÊNDICE E – RESPOSTAS DISCURSIVAS DA AVALIAÇÃO PRÉ-AULA

Tabela E-1 – Respostas dos alunos sobre a Pergunta 1A

Pergunta 1	O que você acha que é a luz?
Aluno 1	São partículas de átomo que se propagam no espaço ou gravidade
Aluno 2	são partículas de átomos que se propagam no espaço ou gravidade
Aluno 3	algo luminoso, e que ilumina
Aluno 4	um feixe de claridade que ocorre por conta do sol, ou por lâmpadas
Aluno 5	fontes com mais energia luminoso
Aluno 6	aquela que clareu, que ilumina
Aluno 7	e a junção de todas as cores
Aluno 8	é o que remete luz
Aluno 9	Aquilo que ilumina
Aluno 10	Acho que são raios que emitem iluminosidade de algum objeto ou fonte luminosa que emite luz
Aluno 11	Não sei
Aluno 12	A luz é uma onda eletromagnética, todavia pode se comportar como partículas, em determinando contexto.
Aluno 13	não sei
Aluno 14	São partículas de átomo que se propagam no espaço ou gravidade
Aluno 15	é algo que ilumina, uma fonte luminosa
Aluno 16	Agitação das moléculas
Aluno 17	Luz é algo que ilumina
Aluno 18	não lembro!
Aluno 19	Para mim a luz é um tipo de radiação não perigosa
Aluno 20	é uma onda, que tem pouca radiação da distância da terra para o sol, chamado raio UV
Aluno 21	A luz é um feixe luminoso que expressa calor.
Aluno 22	Aquilo que ilumina
Aluno 23	Todo tipo de fenômeno que emite luminosidade
Aluno 24	ilumina, e existem outros tipos de luz
Aluno 25	algum que ilumina e brilha
Aluno 26	não sei
Aluno 27	Pra mim é algo que iluminou
Aluno 28	e um tipo de energia que pode ser própria ou refletida por outra
Aluno 29	É uma onda
Aluno 30	A luz é uma partícula
Aluno 31	Uma onda de energia
Aluno 32	feixe de ondas luminosas coloridas que juntas formam a luz branca
Aluno 33	Onda de energia
Aluno 34	É uma partícula sem massa e não precisa de nenhum meio para se movimentar

Aluno 35	Luz se trata de uma partícula denominada fóton que não possui massa e se move a cerca de 300000 km/s aproximadamente
Aluno 36	Luz é uma fonte luminosa para iluminar um local
Aluno 37	luz é uma fonte luminosa para iluminar um local
Aluno 38	é aquilo que clareia
Aluno 39	algo que ilumina, brilha

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E-2 – Respostas dos alunos sobre a Pergunta 2A

Pergunta 2	Por que uma camisa preta no sol esquenta mais do que uma camisa branca?
Aluno 1	Por que a camisa branca ela são todas as cores juntas, já a camisa preta ela vai só emitir a cor preta dela
Aluno 2	Porque a cor branca contém todas as cores e a preta é única
Aluno 3	Por ser uma cor mais escura, fazendo com que o Sol reflita na camisa e esquente. E ela não faz parte do conjunto de cores que a cor branca tem (a cor branca possui todas as cores, menos a preta)
Aluno 4	porque a cor branca contém todas as cores, já a preta contém uma só cor fazendo com que esquente
Aluno 5	talvez porque a cor preto não transmite outras cores por ser uma cor mais forte assim acumulando os raios do sol
Aluno 6	porque a cor preta não transmite outras cores por ser uma cor mais parte assim acumulado os raios do sol
Aluno 7	por que a cor preta atrai mais a luz fazendo que ela esquente mais
Aluno 8	o preto absorve a luz solar
Aluno 9	Porque a camisa branca emitir várias cores
Aluno 10	Acho que a cor preta absorve mais o calor que a cor branca
Aluno 11	Porque o branco tem mais cores, enquanto o preto é só uma cor e queimo mais
Aluno 12	Pois a camisa preta absorve mais luz e a branca reflete mais
Aluno 13	Acho que por ser uma cor escura, ela chama mais
Aluno 14	Por que a camisa branca ela são todas as cores juntas, já a camisa preta ela vai só emite a cor preta dela
Aluno 15	Por causa da cor escura, ou talvez ela não transmite outras cores, so pelo raio de sol
Aluno 16	Pois o preto absorve mais calor que o branco
Aluno 17	Porque o branco é a junção de todas as cores, portanto, não absorve calor quanto o preto
Aluno 18	a cor preta é uma cor mais escura, não é como a cor branca que no caso são todas as cores juntas. Então se não me engano seja por isso que o preto esquenta mais
Aluno 19	Porque a cor preta absorve mais calor, já a cor branca reflete mais
Aluno 20	Porque absorve as ondas UV direcionada para ela, sem refletir luz e calor
Aluno 21	Por causa do acúmulo de calor, pois algo preto esquenta mais que algo branco
Aluno 22	A cor branca são todas as cores juntas por isso é mais fresca. Já a preta é somente a cor dele mesmo e o raios de sol fixa mais

Aluno 23	Porque a cor preta absorve calor mais rápido
Aluno 24	por que a cor preta absorve a luz e o calor
Aluno 25	por que a cor preta absorve mais calor
Aluno 26	porque o branco emite várias cores e pega menos sol, já o preto é só um, e acaba que pega mais, por isso é mais quente
Aluno 27	Não sei, mas acho que pelo fato de ser uma cor escura. Tons escuros são mais e os mais claros são mais leves
Aluno 28	porque a luz tem mais dificuldade de passar pela camisa preta do que pela branca
Aluno 29	Porque a cor preta absorve mais calor do que as outras cores
Aluno 30	Pois a cor preta absorve mais calor, em contra partida, ela "libera" calor mais facilmente
Aluno 31	Porque preto não absorve todas as cores
Aluno 32	porque o preto (cor) absorve mais calor
Aluno 33	por conta que a cor preta absorve todas as cores emitidas pelo o sol e a branca reflete todas
Aluno 34	Porque absorve mais luz
Aluno 35	a cor de algo evidencia quais cores do espectro foi absorvido. a preta esquenta mais devido absorver toda ou maioria da luz e não a refletindo. A branca refleti todos.
Aluno 36	Porque a luz não atravessa na cor preta, enquanto o branco atravessa
Aluno 37	porque a luz não atravessa na cor preta, enquanto a branco atravessa
Aluno 38	sol fixa mais
Aluno 39	por conta da cor

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE F – RESPOSTAS DISCURSIVAS DA AVALIAÇÃO PÓS-AULA

Tabela F-1 – Respostas dos alunos sobre a Pergunta 1B

Pergunta 1	Com base no que você observou e discutiu na aula de hoje, explique com suas palavras o que é "Nanociência".
Aluno 1	A nanociência trabalha com coisas pequenas, menores que micro partículas
Aluno 2	A nanociencia e a ciencia que estuda/trabalha com ciencias pequenas
Aluno 3	ela e o estudo de materiais extremamente pequenos, e importante pois futuramente podem trazer avanços tecnológicos
Aluno 4	é a ciência que estuda as coisas pequenas
Aluno 5	Estudo sobre partículas bilhões de vezes menor que um ponto
Aluno 6	A ciência que estuda coisas bilhoes de vezes menores que um ponto
Aluno 7	uma ciência que trabalha com micropartículas
Aluno 8	Torna especial da pra perceber com luzes
Aluno 9	É a ciência de partículas bilhões de vezes menor que um ponto
Aluno 10	Não sei
Aluno 11	e diferente porque mesmo o material sendo isso dependendo do seu tamanho pode ter efeitos diferentes
Aluno 12	Ainda n entende muito bem a nanociência
Aluno 13	E uma ciencia que trabalha com propriedades pequenas
Aluno 14	Nanociência é uma parte da ciência que estuda partículas menores, como a luz por exemplo
Aluno 15	Nanociência pode ser entendida como a parte da física q estuda pequenas partículas, q é bilhoes de vezes menor q o metro
Aluno 16	uma área da ciência que estuda propriedades de materiais muito menores que o metro
Aluno 17	ciencias que estuda as coisas microscopicas
Aluno 18	estudo de objetos fisicos e quimicos de pequenas particulas
Aluno 19	a ciência em nanopartículas, no caso partículas pequenas, não sei bem
Aluno 20	o que torna usa a área especial é a area em que essa ciência atua, essa ciência estuda materiais tão pequenos, bilhões de vezes menor que um metro, que só se pode ver com o uso de um microscópio eletrônico
Aluno 21	Como a luz se comporta em cada material
Aluno 22	Nanociência, esse campo estuda o universo abaixo da escala do microscópio. Ela é especial por isso por estudar esses fenômenos , já que são diferentes
Aluno 23	É uma ciência que trabalha com propriedades de elementos muito pequenas e como elas se comportam
Aluno 24	É uma ciência que trabalha com propriedades de elementos muito pequenos
Aluno 25	nanociencia é uma área que estuda objetos bilhões de vezes menor que o metro e tm propriedades diferentes
Aluno 26	Nanociência é o estudo de fenômenos e da manipulação da matéria em escala nanométrica (um bilionésimo de metro), onde as propriedades de um material podem ser diferentes das observadas em tamanhos maiores
Aluno 27	è a área que lida com partículas bem pequenas, bem menores do que celulas e bacterias
Aluno 28	[SEM RESPOSTA]

Aluno 29	consiste em materiais muito pequenos
Aluno 30	Nanociência está relacionada a coisas minúsculas bilhões de vezes menor que objetos comuns
Aluno 31	nanociência estuda coisas pequenas
Aluno 32	é uma área da ciência que lida com fenômenos em escala bem pequena, bilhões de vezes menor que um ponto
Aluno 33	nanociência é a área da ciência que estuda coisas bastante pequenas, menores até que bactérias e células
Aluno 34	[SEM RESPOSTA]

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela F-2 – Respostas dos alunos sobre a Pergunta 6B

Pergunta 6	O que você achou da atividade de investigação (o mistério dos 4 líquidos)? Ela ajudou você a entender por que os nanomateriais são diferentes dos materiais comuns? Explique sua opinião.
Aluno 1	Sim, foi muito bom, as atividades experimentais são as melhores para aprender
Aluno 2	Sim, muito interessante
Aluno 3	eu achei interessante, aprendi algo que não sabia
Aluno 4	Sim, eu gostei muito porém eu precisaria ver mais ter domínio do conteúdo
Aluno 5	Sim, com as explicações tanto orais e nas práticas foram úteis para o aprendizado
Aluno 6	Não entendi muito bem como funciona
Aluno 7	n
Aluno 8	Muito legal. Ajudou um pouco.
Aluno 9	Sim, é sempre bom ter aulas práticas
Aluno 10	Sim, pois ela vai espelhar ao mesmo tempo ela vai absorver a ela
Aluno 11	Sim me ajudou a entender melhor, acho que deveriam ter mais testes práticos
Aluno 12	Não entende muito bem
Aluno 13	[SEM RESPOSTA]
Aluno 14	Sim
Aluno 15	Eu gostei bastante, foi uma aula diferente e legal
Aluno 16	eu gostei muito, aprender muitas coisas
Aluno 17	gostei! me senti um cientista
Aluno 18	achei legal
Aluno 19	Achei muito interessante, entendi melhor quando foi explicado oralmente. Durante o experimento, me senti perdido sem entender bem
Aluno 20	sim, me ajudou a entender de forma fácil sem ser massante
Aluno 21	Bem legal. Sim!
Aluno 22	Sim, bem interessante
Aluno 23	Achei legal. Sim, o experimento é uma boa forma de fixar o conteúdo
Aluno 24	Achei massa, ajudou muito a criar uma curiosidade para entender esses fenômenos
Aluno 25	Sim, adorei a aula e o experimento que o professor fez
Aluno 26	Sim, a aula foi bastante interessante

Aluno 27	Foi bastante legal fazer essa investigação
Aluno 28	[SEM RESPOSTA]
Aluno 29	Gostei muito da aula, mas acho que precisa de mais aulas para pegar melhor os conceitos
Aluno 30	bastante legal, me sentir uma cientista de verdade
Aluno 31	foi legal
Aluno 32	A atividade prática foi bem interessante, pois coisas novas é sempre legal de aprender
Aluno 33	gostei da aula mais eu acho que precisava explicar melhor
Aluno 34	[SEM RESPOSTA]

Fonte: Elaborado pelo autor