

ONDAS GRAVITACIONAIS NO ENSINO MÉDIO: UMA ABVORDAGEM UTILIZANDO EXPERIMENTOS DE BAIXO CUSTO

Gravitational Waves in High School: An Approach Using Low-Cost Experiments

Francisco Ernaldo da Silva [ernaldo.silva@aluno.uece.br]

Makarius Oliveira Tahim [makarius.tahim@uece.br]

José Robson Maia [jose.robson@uece.br]

Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Faculdade de Educação, Ciências e Letras do Sertão Central (FECLESC),

Rua José de Queiroz Pessoa, 2554, Planalto Universitário, Quixadá-Ceará

Recebido: 18/01/2026

Aceito: 02/03/2026

Resumo

Este trabalho traz uma proposta pedagógica para o ensino de física clássica e física de fronteira de forma prazerosa e eficiente para os alunos. Esta proposta deve proporcionar aos alunos se tornarem protagonistas em sua aprendizagem por meio de uma sequência didática (SD) a partir das UEPS de Moreira elaboradas com base na teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, tendo como norte o desenvolvimento das competências e habilidades propostas na BNCC, nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) para o Ensino Médio. Nesse sentido, vem o desafio: De que maneira ensinar Ondas Gravitacionais (OG) no ensino médio? É preciso ir além do tradicional. Inicialmente, aulas expositivas com recursos audiovisuais sobre as ondas mecânicas e eletromagnéticas serviram como ancoragem às ondas gravitacionais. Adicionalmente foram utilizados experimentos de baixo custo, simuladores e IA e simulações. Foi gerado um produto educacional que inclui por cartões educacionais (EC) que auxiliaram a SD que simula fenômenos desde as ondas mecânicas às ondas gravitacionais que por sua vez auxilia no entendimento no ensino de física às turmas do 3º ano do ensino médio de uma escola da rede pública estadual.

Palavras-chave: EC; UEPS; onda gravitacional; BNCC; PCN; Ausubel, ensino de física.

Abstract

This work presents a pedagogical proposal for teaching classical and frontier physics in a pleasant and efficient way for students. This proposal aims to empower students to become protagonists in their learning through a didactic sequence (DS) based on Moreira's UEPS (Units of Educational Practices) developed using David Ausubel's theory of meaningful learning, guided by the development of the competencies and skills proposed in the BNCC (National Common Core Curriculum) and the PCNs (National Curriculum Parameters) for High School. In this sense, the challenge arises: How to teach Gravitational Waves (GW) in high school? It is necessary to go beyond the traditional approach. Initially, lectures with audiovisual resources on mechanical and electromagnetic waves served as an anchor for gravitational waves. Additionally, low-cost experiments, simulators, AI, and simulations were used. An educational product was created that includes educational cards (EC) that assisted in the SD simulation of phenomena ranging from mechanical waves to gravitational waves, which in turn helps in understanding physics concepts for 3rd-year high school classes in a state public school.

Keywords: EC;UEPS; gravitational wave; BNCC; PCN; Ausubel, physics teaching.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços científicos do século XXI, especialmente na área da Física, têm se mostrado de grande relevância no cenário mundial. A comprovação experimental das ondas gravitacionais, realizada em 2015 pelo observatório LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), foi resultado de uma busca iniciada com as previsões de Albert Einstein em 1916 que possibilitou uma nova forma de observação do universo. Entretanto, observa-se um descompasso significativo entre o dinamismo da ciência de fronteira e a estagnação dos currículos e materiais didáticos do Ensino Médio no Brasil.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, a Base Nacional Comum Curricular e os livros didáticos distribuídos pelo Programa Nacional do Livro Didático não acompanham essa evolução científica. Uma análise de conteúdo das coleções aprovadas pelo PNLD desde 2010 revela a ausência quase total do tema ondas gravitacionais nos materiais que chegam às salas de aula. Essa omissão curricular transmite, ainda que implicitamente, a ideia de que esse conhecimento é irrelevante para a formação dos estudantes.

Apesar da relevância científica, conteúdos relacionados às ondas gravitacionais permanecem praticamente ausentes dos currículos e dos materiais didáticos do Ensino Médio. Esse cenário contribui para o distanciamento entre este ramo da ciência de fronteira e o ensino escolar. Diante desse contexto, surge o problema de pesquisa deste artigo: como desenvolver e aplicar uma sequência didática que possibilite a transposição didática do tema ondas gravitacionais, tornando-o acessível e significativo para estudantes do Ensino Médio?

Em resposta a essa problemática, este artigo tem como objetivo desenvolver, aplicar e avaliar uma sequência didática que promova a transposição didática do conhecimento sobre ondas gravitacionais, tornando-o acessível para estudantes do 3º ano do Ensino Médio. A proposta ancora-se pedagogicamente na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e ainda faz uso da estrutura das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas, criada por Marco Antônio Moreira, buscando integrar o tema às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular.

Para atingir esse objetivo, definiram-se um conjunto de ações apresentadas a seguir: (1) elaborar uma sequência didática que integre os conceitos de ondas gravitacionais aos conteúdos curriculares do Ensino Médio, em conformidade com a BNCC; (2) identificar e selecionar conceitos fundamentais da ondulatória mecânica e eletromagnética que atuem como subsunçores para a ancoragem do conhecimento sobre ondas gravitacionais; (3) aplicar princípios da Aprendizagem Significativa e das UEPS na organização progressiva do conhecimento; (5) avaliar a eficácia da sequência didática por meio de instrumentos de avaliação formativa e somativa.

2. REFERENCIAL TEORICO

A inserção de temas da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio impõe desafios de natureza conceitual, cognitiva e pedagógica. Esses conteúdos apresentam elevado nível de abstração e, em geral, não fazem parte da experiência cotidiana dos estudantes. Diante desse cenário, torna-se necessário adotar referenciais teóricos que considerem os processos cognitivos envolvidos na aprendizagem. Nesse contexto, a Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel, constitui o principal fundamento pedagógico desta pesquisa. Segundo Ausubel, a aprendizagem ocorre de maneira significativa quando novas informações se relacionam, de forma não arbitrária e substantiva,

a conceitos relevantes já existentes na estrutura cognitiva do estudante (Ausubel, Novak & Hanesian, 1980). Essa perspectiva contrapõe-se à aprendizagem mecânica, caracterizada pela memorização literal de informações, sem integração conceitual. A aprendizagem significativa implica, portanto, uma reorganização cognitiva, na qual o novo conhecimento modifica e é modificado pelos conhecimentos prévios.

Nesse processo, os conhecimentos prévios desempenham papel central e são denominados subsunçores. Os subsunçores funcionam como elementos de ancoragem cognitiva, permitindo que novos conceitos sejam assimilados de maneira estruturada. Quando esses elementos não são considerados no planejamento didático, a aprendizagem tende a ocorrer de forma fragmentada, com baixa retenção e compreensão superficial dos conteúdos. Este artigo enfatiza que a identificação e a ativação dos subsunçores são condições fundamentais para o ensino de conteúdos abstratos da Física Moderna. Ausubel destaca ainda que a aprendizagem significativa não ocorre de forma espontânea, mas depende de duas condições essenciais: (1) a disposição do estudante para aprender significativamente e (2) a apresentação de materiais potencialmente significativos. Esses materiais devem possuir organização lógica interna e estabelecer relações claras com o conhecimento já existente. No contexto escolar, isso exige do professor um planejamento cuidadoso das atividades e da sequência de apresentação dos conceitos.

Com base nessa perspectiva teórica, Moreira propôs as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) como uma estratégia de organização didática alinhada à teoria de Ausubel. As UEPS visam estruturar o ensino a partir de situações-problema e de uma sequência lógica de atividades, promovendo a diferenciação progressiva dos conceitos e a reconciliação integradora do conhecimento (Moreira, 2011). Essa estrutura busca evitar a fragmentação conceitual e favorecer a construção gradual de significados. A diferenciação progressiva refere-se à apresentação inicial de conceitos mais gerais, que vão sendo progressivamente especificados ao longo da unidade de ensino. Já a reconciliação integradora diz respeito ao estabelecimento de relações entre conceitos previamente estudados, evitando contradições e promovendo uma visão mais coerente do conhecimento científico. Este trabalho ressalta ainda que esses princípios são particularmente relevantes no ensino de ondas gravitacionais, devido à complexidade conceitual envolvida.

No contexto específico do ensino de ondas gravitacionais, a utilização das UEPS possibilita a integração entre conteúdos já trabalhados no currículo, como ondas mecânicas e eletromagnéticas, e conceitos da Física Moderna. Esses conteúdos prévios atuam como subsunçores, permitindo a ancoragem do novo conhecimento de forma progressiva e contextualizada. Essa integração é apontada neste artigo como elemento central para mitigar o elevado nível de abstração associado ao tema. A proposta didática fundamentada na Aprendizagem Significativa e nas UEPS também dialoga com as diretrizes da Base Nacional Comum Curricular, ao valorizar o desenvolvimento do pensamento científico, crítico e investigativo. A BNCC enfatiza a importância de compreender a ciência como construção humana, o que converge com a perspectiva ausubeliana de aprendizagem baseada em significados. Nesse sentido, a organização do ensino a partir desses referenciais contribui para a superação de práticas tradicionalistas e para a aproximação entre a ciência de fronteira e o ensino escolar.

A estrutura da UEPS é sintetizada no Quadro 1 esquemático que apresenta as etapas da unidade de ensino, desde o levantamento dos conhecimentos prévios até os momentos de avaliação. Neste artigo, esse quadro é mantido como uma síntese conceitual, destacando apenas a sequência lógica das etapas, sem detalhamento operacional excessivo.

Quadro 1 – Etapas de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (síntese)

Etapas	Descrição geral
Situação inicial	Levantamento dos conhecimentos prévios
Problematização	Apresentação de situações desafiadoras
Organização do conhecimento	Diferenciação progressiva dos conceitos

Aplicação	Integração e reconciliação dos significados
Avaliação	Instrumentos formativos e somativos

Fonte: Adaptado de Moreira (2011).

3. METODOLOGIA

3.1. Trabalhos relacionados

A pesquisa bibliográfica teve como objetivo situar o estudo no contexto das produções acadêmicas já existentes sobre o ensino de ondas gravitacionais. Para isso, foram consultados livros, artigos científicos, periódicos e, principalmente, dissertações. A busca concentrou-se em trabalhos que abordassem os temas “ondas gravitacionais” e “ondas eletromagnéticas”, tendo como principais fontes o Banco de Dissertações do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), o Google Acadêmico e a plataforma Research Rabbit. No banco de dados do MNPEF, estavam disponíveis 938 trabalhos publicados, dos quais apenas um tratava especificamente do tema ondas gravitacionais com foco no Ensino Médio. Na plataforma Research Rabbit foram identificados três artigos relacionados à divulgação científica das ondas gravitacionais e à aplicação de sequências didáticas sobre o tema. No Google Acadêmico, foram localizados cinco trabalhos voltados ao ensino de ondas gravitacionais, sendo que três deles também constavam na base da Research Rabbit.

Os trabalhos identificados evidenciam que, apesar da ampla produção científica sobre ondas gravitacionais, ainda são escassas as pesquisas que abordam esse tema sob a perspectiva do ensino de Física no Ensino Médio. Os estudos analisados foram sistematizados nos Quadros 2 e 3 a seguir, destacando seus títulos, autores, referenciais teóricos e metodologias empregadas.

Quadro 2 –Trabalhos relacionados: títulos, autores, ano e tipo de produção (Dados da pesquisa, 2025)

Item	Título do trabalho	Autor	Ano	Tipo
T1	Surfando nas OG	Gomes da Silva	2022	Dissertação
T2	OG no EM	Amilcar Costa	2021	Dissertação
T3	Uso de vídeos...buracos negros e	João P.Netto; Ricardo	2022	Artigo
T4	SD ensino de OG e interferência	Fco F. M. Fontele; João C. N.	2020	Artigo
T5	OG: da detecção às salas de aula	Larissa C.N.Santana,Ricardo	2018	Artigo

Quadro 3 –Trabalhos relacionados: referenciais teóricos e metodologias (Dados da pesquisa, 2025)

Item	Teóricos	Metodologia	Embasamento
T1	Leontiev; Morán; UEPS de	Phet; Situação problemas	Mapas Conceituais
T2	Ausubel;UEPS Moreira;	Phet; Vídeo; Experimento	Mapas Conceituais
T3	Piassi;Pietrocola; Moreira;	Divulgação científica	-
T4	Ausubel; Biggs; Tang ; Sanches;	Análise de uma SD	Mapas conceituais
T5	Ferreira;Langhi; Nardi Pesquisa	Pesquisa	-

A análise dos trabalhos relacionados permite observar a convergência teórica de parte significativa das pesquisas com este estudo, especialmente no que se refere ao uso da Teoria da Aprendizagem Significativa e das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas como fundamentos pedagógicos. Observa-se também que as metodologias empregadas nos trabalhos analisados dialogam com a proposta desta pesquisa, sobretudo no uso de sequências didáticas e de tecnologias digitais como recursos didáticos.

Apesar disso, os resultados do levantamento evidenciam a escassez de estudos voltados especificamente ao ensino de ondas gravitacionais no Ensino Médio, o que reforça a relevância e a originalidade da proposta desenvolvida nesta pesquisa.

3.2. Sobre a pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como explicativa, uma vez que busca compreender como os estudantes constroem significados ao longo de uma intervenção pedagógica estruturada. A escolha por esse tipo de pesquisa está associada ao interesse em analisar relações entre estratégias de ensino, conteúdos abordados e processos de aprendizagem, especialmente no contexto do ensino de conceitos abstratos da Física Moderna. O estudo fundamenta-se na elaboração, aplicação e avaliação de uma sequência didática, compreendida como um conjunto articulado de atividades planejadas com objetivos claros, início, desenvolvimento e encerramento definidos. Essa concepção está alinhada à perspectiva de sequência didática adotada na dissertação, na qual o planejamento das atividades considera a integração entre conteúdos, metodologia e avaliação.

3.3. Público-alvo e contexto da pesquisa

A intervenção pedagógica foi realizada com estudantes do 3º ano do Ensino Médio, noturno, em uma escola da rede pública, conforme descrito no trabalho original. A escolha desse público-alvo justifica-se pelo fato de que os conteúdos de ondulatória e gravitação já fazem parte do currículo escolar nesse nível de ensino, podendo atuar como conhecimentos prévios para a abordagem do tema ondas gravitacionais. O turno noturno apresenta um perfil singular e não homogêneo, caracterizado por:

1. Ampla variação etária entre os discentes;
2. Diversidade de trajetórias, incluindo alunos trabalhadores;
3. Níveis de proficiência e base matemática heterogênea não consolidada.

O contexto escolar regular influenciou diretamente o planejamento da sequência didática, especialmente no que se refere à organização do tempo didático, ao espaço físico disponível e à constituição dos grupos de trabalho. Esses elementos são compreendidos, na dissertação, como variáveis metodológicas relevantes para o desenvolvimento da intervenção e para a análise dos resultados.

3.4. Sequencia Didática

A metodologia adotada estrutura-se a partir dos princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa e da organização didática das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas. A sequência didática foi planejada tomando como base as UEPS, buscando favorecer a diferenciação progressiva dos conceitos e serem lecionados, conforme resumo no Quadro 4.

Para mitigar as dificuldades antevistas, como a possível carência de familiaridade dos alunos com ferramentas computacionais (simuladores, IA), e garantir a eficácia da intervenção, adotou-se as seguintes premissas:

1. **Diário de bordo:** Foi mantido um registro contínuo e acurado durante cada encontro, permitindo documentar a receptividade, as dificuldades e os insights dos alunos, além de orientar ajustes didáticos em tempo real;

2. **Dosagem e clareza:** Os conteúdos foram planejados para apresentar índice de dificuldade crescente, partindo de conceitos básicos;
3. **Ancoragem em subsunçores:** A estratégia central baseou-se em mapear e ativar os subsunçores prévios existentes na estrutura cognitiva dos aprendizes, utilizando-os como alicerce para a construção de novos conhecimentos, tal como preconizado por Ausubel (AUSUBEL, 2003);
4. **Metodologias ativas:** A implementação de simulações, interações e experimentos de baixo custo, realizados pelos próprios alunos sob mediação docente, visou minimizar os efeitos da heterogeneidade e da abstração dos conceitos, transformando a aula em um espaço de investigação e descoberta.

Quadro 4 – Atividades da sequência didática (Dados da pesquisa, 2025)

Item	Título	Atividades	Objetivos específicos
01	Pré-Teste	Aplicação do Pré-teste; Vídeo introdutório: “O que é uma onda? ; Aula expositiva; Experimento; Lista de exercícios; Registro no Diário	Diagnosticar os subsunçores existentes; Apresentar um organizador prévio visual para ambientar os alunos ao fenômeno ondulatório; Visualizar concretamente a propagação de pulsos e ondas.
02	Ondas Mecânicas	Vídeos: 1.“O que é uma onda?” 2.“Ondas: O que são e para que servem”; Aula expositiva; Interação com IA; Simulação PhET; Experimentos de baixo custo; Tarefa de palavras cruzadas em sala de aula; Educational Card; Registro no Diário	Apresentar as grandezas físicas das ondas; Elaborar prompts inteligentes; Permitir a manipulação e visualização dinâmicas das ondas em simulador; Visualizar concretamente a propagação das ondas. Propor revisão ativa e lúdica dos conceitos trabalhados no encontro.
03	Ondas Eletromagnéticas (OEM)	Vídeo -2: “Espectro eletromagnético: O código universal da tecnologia moderna”; Aula expositiva; Interação com IA; Simulação PhET; Experimentos de baixo custo; Tarefa de palavras cruzadas em sala de aula; Registro no Diário	Buscar organizadores prévios para facilitação da assimilação das aplicações cotidianas; Explicitar as diferenças entre ondas mecânicas e eletromagnéticas e introduzir as grandezas do espectro; Demonstrar fenomenologicamente propriedades das OEM; Propor uma pesquisa sobre aplicações tecnológicas, promovendo conexões com o cotidiano.
04	Ondas Gravitacionais (OG)	Vídeos: 3. Universo cheio de ondas;4. OG explicadas PHDCOMICS;5. Trecho do filme: “Interestelar; Aula expositiva; Interação com IA; Simulação PhET; Experimentos de baixo custo: 1. Tecido Espaço-Tempo-peneira; 2. Tecido Espaço-Tempo-grades e tecido elástico; Avaliação Lúdica (Kahoot!); Educational Card Nº 01, 02 e 03; Registro no Diário	Contextualizar historicamente o conceito; Fornecer representações visuais impactantes do fenômeno abstrato; Introduzir o conceito de OG, seu mecanismo de geração e detecção, promovendo a reconciliação integrativa com os tipos de onda anteriores ; Simular concretamente a curvatura do espaço-tempo e a geração de ondulações por corpos massivos; Demonstrar coletivamente o fenômeno com maior impacto visual; Buscar interação e aprendizagem do grupo.

05	Pós-Teste	Aula expositiva; Experimento Final: Simulação de Coalescência dos buracos negros; Aplicação do Pós-Teste; Registro no Diário	Revisar o percurso da SD, destacando a evolução conceitual; Fazer agradecimentos a turma por proporcionar a aplicação da SD; Simular de forma lúdica e concreta o mecanismo de geração de OG por um sistema binário; Avaliar somativamente a compreensão significativa dos conceitos, comparando com a avaliação diagnóstica.
----	-----------	--	---

O primeiro encontro da SD teve como objetivos: (1) apresentar aos discentes o propósito da pesquisa e a estrutura geral da SD; (2) realizar uma avaliação diagnóstica do conhecimento prévio da turma sobre fenômenos ondulatórios e ondas gravitacionais e (3) introduzir o tema por meio de um organizador prévio multimodal, conforme preconizado pela teoria ausubeliana.

Inicialmente, foram fornecidas informações introdutórias sobre o desenvolvimento do processo, explicitando o propósito da pesquisa e a relevância do tema no contexto da Física moderna. Na sequência, foi aplicado um pré-teste e posteriormente um vídeo introdutório conforme Figura 1, com informações contextuais e visuais sobre o comportamento ondulatório na natureza, sem aprofundamento em definições conceituais. Ao final do encontro foi distribuído uma lista de questões como tarefa extra sala de aula.

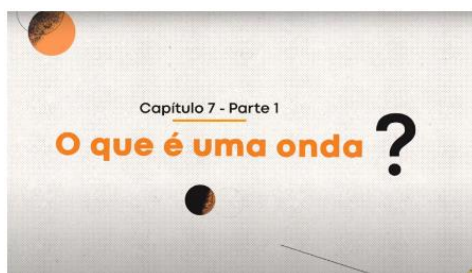


Figura 1 – Vídeo-1: O que é uma onda?

Fonte: autoria própria

O segundo encontro (Ondas Mecânicas) da SD teve como objetivo central estabelecer os conceitos fundamentais da mecânica ondulatória, que servirão como subsunçores essenciais para a ancoragem dos conhecimentos mais complexos e abstratos a serem introduzidos posteriormente, como as ondas gravitacionais. A sessão iniciou-se com uma discussão mediada sobre o vídeo-1 exibido no encontro anterior, um segundo vídeo conforme Figura 2, também foi apresentado e por fim a lista de questões distribuída como tarefa. Este momento foi fundamental para validar o organizador prévio, sanar dúvidas iniciais e ativar cognitivamente os alunos para o tema. A metodologia empregada nos encontros foi intencionalmente multimodais, combinando:

- Aula expositiva dialogada com utilização de quadro branco e slides;
- Recursos audiovisuais (vídeos do YouTube) como organizadores prévios;
- Interação com Inteligência Artificial Generativa (ChatGPT);
- Simulações computacionais via plataforma PhET;
- Experimentação com materiais de baixo custo.

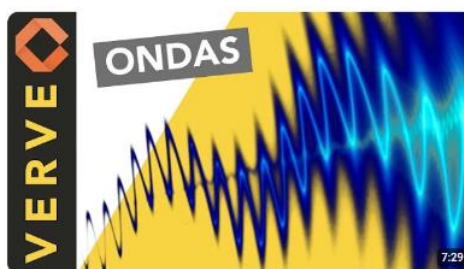


Figura 2 – Vídeo-2: Ondas: o que são e para que servem
Fonte: autoria própria

Para consolidar a aprendizagem e promover a abstração a partir do concreto, realizou-se uma atividade no laboratório de informática com formulações de prompts. Isso permitiu os alunos expressarem e buscarem respostas de forma a contribuir para a aprendizagem. Em seguida eles realizaram simulações através do PhET e também uma atividade experimental com materiais de baixo custo como molas metálicas e de pvc, cd e miçangas, conforme Figura 3.

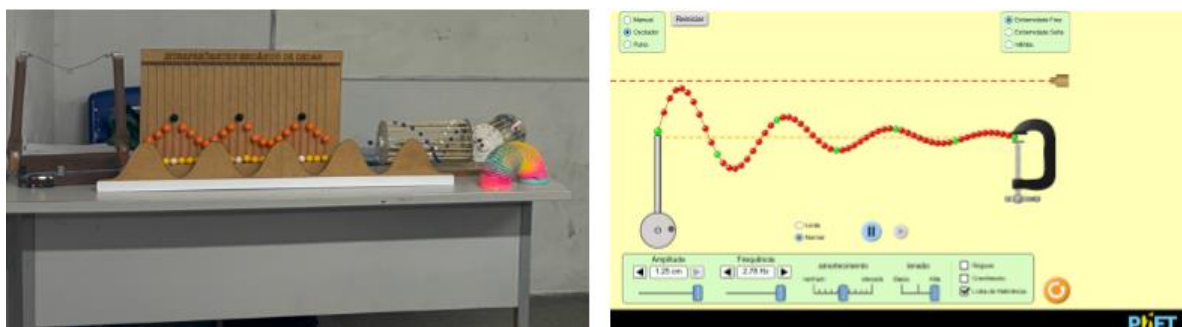


Figura 3 – Materiais de baixo custo e Plataforma PhET
Fonte: autoria própria

O terceiro encontro da Sequência Didática teve como objetivo geral estabelecer uma clara diferenciação progressiva entre ondas mecânicas e eletromagnéticas, com ênfase na característica fundamental de que estas últimas não necessitam de um meio material para se propagarem. Os objetivos incluíram introduzir o espectro eletromagnético e as relações entre suas grandezas físicas constitutivas (velocidade, frequência e comprimento de onda). A relevância das ondas eletromagnéticas é algo que deve impressionar os estudantes, sua aplicabilidade é perceptível em todos os setores, presente, da medicina a mais alta tecnologia da Astrofísica e Astronomia.

A sequência iniciou-se com a exibição do vídeo “Espectro eletromagnético: O código universal da tecnologia moderna”, conforme Figura 4.



Figura 4 – Vídeos e Trecho de filme

Em seguida, os alunos realizaram uma atividade de interação com IA utilizando seus celulares para formular prompts de pesquisa sobre ondas eletromagnéticas e uma sessão experimental com materiais de baixo custo, conforme Figura 5, incluindo uma Bobina de Tesla, demonstrações de indução eletrostática, um carregador de celular por placa solar e por Bluetooth, uma Gaiola de Faraday e uma adaptação do experimento de Hertz com o coesor de Branly. Sob a ótica das UEPS, este material é potencialmente significativo, pois busca facilitar proativamente a ancoragem em subsunçores, uma condição imprescindível para o ensino que vise uma aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011). O encontro foi finalizado com a distribuição de uma tarefa para casa consistindo em uma pesquisa sobre aplicações tecnológicas das ondas eletromagnéticas no cotidiano.



Figura 5 – Experimentação em sala de aula – Eletromagnetismo

Fonte: autoria própria

O quarto encontro (Ondas Gravitacionais) representou o ponto mais alto da SD, tendo como objetivo central introduzir o conceito de ondas gravitacionais, culminando pelo menos no processo de diferenciação progressiva do conceito de onda e de certa forma colocar em evidência uma reconciliação integrativa entre os conhecimentos construídos sobre ondas mecânicas, eletromagnéticas e resultando nas gravitacionais.

A sequência iniciou-se com a exibição de dois vídeos didáticos sobre ondas gravitacionais e um trecho do filme Interestelar de Christopher Nolan. Estes recursos se apresentam como um organizador prévio multimodal no sentido de que fornece a mesma informação textual ou dialogada realizada pelo professor de diferentes modos, agregando além do texto e som, imagens que aumentam a possibilidade de ancoragem e consequentemente uma aprendizagem significativa. Conforme (KRESS; LEEUWEN,

2006), modos semióticos diferentes oferecem maneiras distintas de representar objetos e seus processos, e a integração intencional destes modos, a multimodalidade, que potencializa a criação de significados e a ancoragem em subsunçores diversos presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Em seguida, uma aula expositiva foi iniciada com a pergunta norteadora: "O que são ondas gravitacionais?". A exposição foi apoiada por slides e quadro branco, iniciando-se pela historicidade do conceito das ondas gravitacionais, seu mecanismo de geração (fusão de buracos negros e estrelas de nêutrons) e seu moderno método de detecção pelo LIGO.

A etapa prática consistiu em dois experimentos de baixo custo sequenciais, projetados para concretizar a abstração do tecido espaço-tempo:

I. Experimento em grupos (peneira/tecido) conforme Figura 6: Os alunos, em seus grupos predefinidos, utilizaram materiais como tecido elástico, peneiras de bordado e esferas de diferentes massas (bolas de gude, de aço) para simular a curvatura do espaço-tempo e a geração de ondulações.

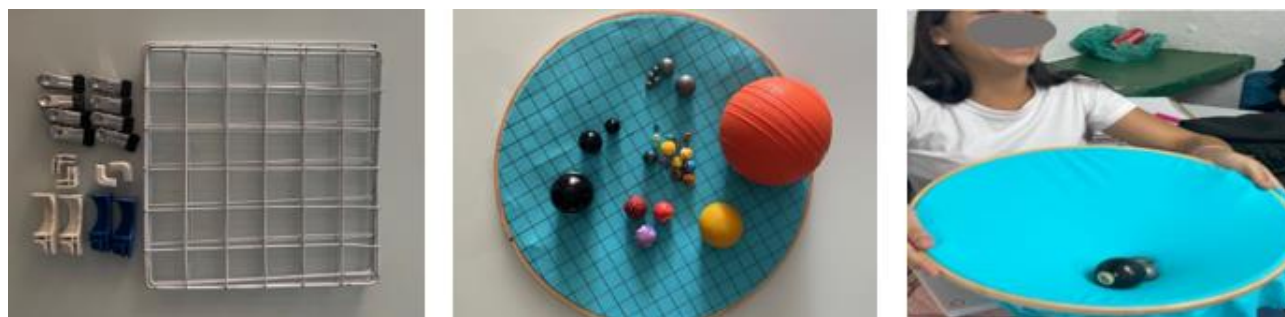


Figura 6 – Experimentos de baixo custo – Experimentação Espaço-tempo em sala de aula
Fonte: autoria própria

II. Experimento em maior escala (grade metálica/tecido) Figura 7: Utilizou-se uma estrutura maior (grade de ferro) para uma demonstração coletiva e de maior impacto visual, permitindo que os alunos montassem e executassem o experimento.



Figura 7 – Demonstração do tecido espaço-tempo
Fonte: autoria própria

Para finalizar e avaliar a aprendizagem de forma lúdica e engajadora, foi realizada uma sessão no aplicativo Kahoot! conforme Figura 8. A atividade, realizada em grupos, consistiu em um QUIZ com perguntas desafiadoras sobre o conteúdo do encontro. Esta ferramenta proporcionou um feedback

instantâneo e permitiu uma avaliação formativa do grau de compreensão alcançado pela turma, num clima de saudável competição.



Figura 8 – Interação com aplicativo KAHOOT!

Fonte: autoria própria

O quinto e último encontro da Sequência Didática (SD) teve como objetivos centrais: (1) realizar uma avaliação final do processo de aprendizagem, comparando com a avaliação diagnóstica inicial; (2) promover uma síntese integradora do percurso realizado e (3) finalizar a abordagem experimental com uma simulação lúdica do mecanismo de geração de ondas gravitacionais.

O encontro iniciou-se com uma sessão de síntese e encerramento, na qual foi revisado o caminho percorrido, desde os conceitos basilares de ondas mecânicas até a abstração das ondas gravitacionais. Em seguida, foi realizada a última atividade experimental conforme Figura 9, uma simulação lúdica da geração de ondas gravitacionais por um sistema binário de buracos negros em coalescência, utilizando duas bolas de tênis.

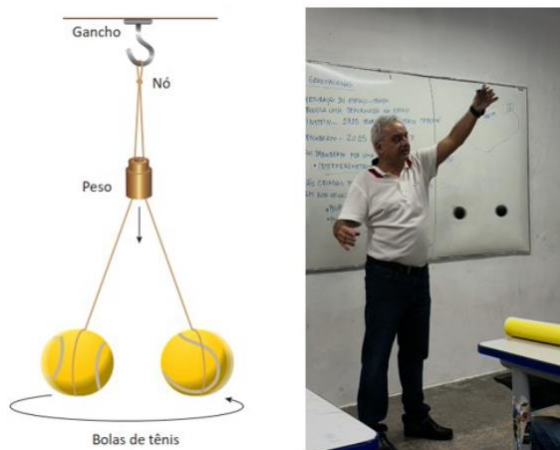


Figura 9– Simulação de colisão de buracos negro

Fonte: autoria própria

Por fim, foi aplicado o pós-teste, instrumento fundamental que, em conjunto com o pré-teste, as atividades de cada encontro e os registros do diário de bordo, permitirá uma análise robusta e triangulada da ocorrência (ou não) de indícios de uma aprendizagem significativa ao longo da intervenção pedagógica conforme veremos na seção 4.2.

4.0 Resultados

Os resultados desta pesquisa são apresentados a partir da análise da aplicação da (SD), estruturada segundo os princípios das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas. Esta escolha permite observar como os estudantes perceberam a apresentação dos conteúdos ao longo da aplicação da SD e também identificar indícios de aprendizagem significativa. Os dados quantitativos e qualitativos obtidos durante a aplicação da SD são discutidos de acordo com o referencial teórico adotado, buscando articular teoria e prática pedagógica.

Para preservação do anonimato dos participantes da pesquisa, utilizamos uma codificação adotando as seguintes siglas: letra A, seguida dos números 1 a 30 (A1, A2, A3 ...) aleatoriamente atribuídos para identificar cada aluno. Para facilitar a representação das questões, identificamos as questões pela letra Q seguida dos numerais (Q1, Q2, Q3 ...).

Para facilitar a compreensão da análise de aprendizagem o Quadro 6 apresentamos as perguntas fechadas e abertas que foram aplicadas nos pré-teste e pós-teste:

Quadro 6 – Atividades da sequência didática (Dados da pesquisa, 2025)

PRÉ-TESTE	PÓS-TESTE
01. Qual das alternativas a seguir melhor descreve uma onda mecânica: a) Uma perturbação que se propaga no vácuo sem necessidade de um meio material. b) Uma perturbação que requer um meio material para se propagar. c) Uma onda composta por campos elétricos e magnéticos oscilantes. d) Uma onda que se propaga apenas em meios gasosos.	01. Você está assistindo a um vídeo em que uma corda é agitada de um lado, gerando uma onda que se move até o outro extremo. O que é necessário para essa onda se propagar? a) Um campo magnético oscilante. b) Um vácuo, pois esse ambiente permite maior velocidade. c) Um meio material que transmita a perturbação. d) Um gerador de corrente elétrica.
02. Um exemplo de onda mecânica presente no cotidiano é: a) A luz emitida por uma lâmpada. b) O som produzido por uma buzina. c) O sinal de Wi-Fi em uma casa. d) A radiação ultravioleta do sol.	02. Em qual das situações abaixo ocorre a propagação de uma onda mecânica? a) A tela de um celular emitindo luz. b) Um rádio tocando música. c) Um cabo de internet transmitindo dados. d) Um sino tocando dentro d'água.
03. As ondas eletromagnéticas diferem das ondas mecânicas porque: a) Propagam-se apenas em meios materiais. b) Necessitam de um meio material para se propagar. c) Podem se propagar no vácuo. d) São sempre longitudinais.	03. Se retirarmos todo o ar de uma campânula (um <u>vaso</u> de <u>metal</u> ou de <u>vidro</u> em forma de <u>sino</u>) e tocarmos uma campainha dentro dela, deixamos de ouvir o som. O que esse experimento demonstra sobre as ondas mecânicas? a) Que ondas mecânicas se propagam melhor no vácuo. b) Que ondas mecânicas precisam de um meio material. c) Que ondas mecânicas são formadas por campos magnéticos. d) Que ondas mecânicas são eletromagnéticas.
04. Qual das opções abaixo é um exemplo de onda eletromagnética: a) Ondas sonoras. b) Ondas em cordas. c) Ondas de rádio. d) Ondas sísmicas (terremotos).	04. Qual das alternativas representa uma aplicação prática da radiação eletromagnética? a) Vibrações em uma mola. b) Sinais de rádio transmitidos por antenas. c) Ondas produzidas por terremotos. d) Voz ecoando em uma montanha.
05. Qual das seguintes aplicações utiliza ondas eletromagnéticas: a) Comunicação por rádio. b) Transmissão de som em tubos de ar. c) Propagação de ondas em cordas. d) Ondas provocadas por Tsunamis.	05. Em qual dos contextos abaixo ocorre o uso direto de ondas eletromagnéticas? a) Um violão emitindo som após ser tocado. b) Um tambor sendo percutido em uma sala. c) Uma televisão recebendo sinal digital via antena. d) Uma conversa entre pessoas em um túnel.
06. Em relação à velocidade de propagação, é correto afirmar que: a) Ondas mecânicas e eletromagnéticas sempre se propagam à mesma velocidade. b) A velocidade das ondas mecânicas independe do meio em que se propagam. c) Ondas eletromagnéticas se propagam mais rapidamente no vácuo do que em meios materiais. d) Ondas mecânicas podem se propagar no vácuo sem alteração de velocidade.	06. Quando comparadas no vácuo, como se comporta a velocidade da luz (onda eletromagnética) em relação ao som (onda mecânica)? a) Ambas têm a mesma velocidade. b) A luz se propaga mais devagar que o som. c) O som se propaga mais rápido, pois vibra partículas. d) A luz se propaga muito mais rápido que o som.

07. Qual das alternativas caracteriza corretamente uma onda eletromagnética: a) Necessita de um meio material para se propagar. b) É composta por oscilações de campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si e à direção de propagação. c) Propaga-se apenas em meios sólidos. d) É sempre longitudinal.	07. O que torna as ondas eletromagnéticas capazes de viajar pelo espaço sideral, como no caso da luz solar chegando à Terra? a) O fato de serem ondas longitudinais. b) Sua dependência de meios líquidos. c) Sua composição por campos elétricos e magnéticos que se sustentam mutuamente. d) Sua origem em fenômenos sísmicos
08. Existem muitos motivos de se estudar as ondas gravitacionais. Dentre os relacionados abaixo, indique aquele que mais se identifica com a importância de estudar ondas gravitacionais: a) Sua velocidade ser maior que a da luz. b) Ajudar a compreender a origem do universo. c) Compreender a origem dos buracos negros. d) A gravidade do espaço-tempo.	08. O aquecimento de alimentos em um forno micro-ondas acontece devido: a) À fricção do ar ao redor do alimento. b) À propagação de ondas sonoras de alta frequência. c) À vibração de moléculas de água por ondas eletromagnéticas. d) À condução térmica promovida por resistências metálicas.
09. Explique as principais diferenças entre ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, fornecendo exemplos de cada tipo presentes no cotidiano.	09. Diferencie como as ondas mecânicas e eletromagnéticas interagem com os meios em que se propagam. Dê dois exemplos para cada tipo de onda no contexto cotidiano, explicando a diferença na forma de propagação.
10. Ondas gravitacionais são um dos fenômenos mais fascinantes da física moderna. Você saberia dizer o que são ondas gravitacionais e como foram detectadas?	10. Ondas gravitacionais são fenômenos raros e difíceis de detectar. Que tipo de fenômeno pode originar essas ondas e como podem ser detectados aqui na Terra?

4.1 Identificação dos conhecimentos prévios

A primeira etapa da SD teve como objetivo identificar os conhecimentos prévios dos estudantes acerca de conceitos relacionados à ondulatória e à gravitação. Essa etapa corresponde ao momento inicial da UEPS e desempenha papel central na Teoria da Aprendizagem Significativa, uma vez que a aprendizagem ocorre quando novas informações se ancoram em conceitos relevantes já existentes na estrutura cognitiva do aluno.

No pré-teste 08 perguntas tratavam de forma objetiva voltadas especificamente para o tema geral da ondulatória das ondas mecânicas/eletromagnéticas e uma sobre gravitacionais. Na forma subjetiva 02 perguntas cada uma tratava de temas distintos: ondas eletromagnéticas e gravitacionais.

As respostas no pré-teste, quando corretas, sugerem um conhecimento baseado em subsunçores isolados e pouco elaborados (não diferenciados). Por exemplo, alguns alunos identificaram ondas mecânicas (Q1) e sonoras (Q2), mas falharam em questões que exigiam a diferenciação crucial sobre a necessidade de um meio de propagação material (Q3, Q6). Isso indica que o conceito de onda era uma ideia geral e pouco diferenciada na estrutura cognitiva inicial.

O aluno A5 demonstrou subsunçores pouco alicerçado, conforme respostas corretas as questões: Q2, Q3, Q4, Q5, Q7, mas falhando em conceitos-chave como a velocidade no vácuo (Q6) e a natureza das ondas eletromagnéticas (Q1 incorreta, Q7 correta).

Outro exemplo no pré-teste referente ao aluno A6, onde a única questão correta (Q7) poderia ser fruto de um chute, conforme Figura 10. O perfil inicial indicava uma estrutura cognitiva com subsunçores muito pouco alicerçadas/frágeis como pode ser comprovado com a maioria das respostas incorretas.



PRÉ-TESTE - 1º ENCONTRO

SEQUENCIA DIDÁTICA NO ENSINO: NAVEGANDO
COM AS ONDAS GRAVITACIONAIS À PROCURA DA ORIGEM DO UNIVERSO

MNPEF

Ministério da Educação
 Universidade Federal do Rio de Janeiro

ALUNO: Diogo Roberto de Godoy - 3º ANO - G - NOITE

CIÊNCIAS DA NATUREZA - PROF. ERNALDO SILVA - DATA: 22/04/2025

07. Qual das alternativas caracteriza corretamente uma onda eletromagnética:

- a) Necessita de um meio material para se propagar.
- b) É composta por oscilações de campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si e à direção de propagação. C
- c) Propaga-se apenas em meios sólidos.
- d) É sempre longitudinal.

08. Existem muitos motivos de se estudar as ondas gravitacionais. Dentre os relacionados abaixo, indique aquele que mais se identifica com a importância de estudar ondas gravitacionais:

- a) Sua velocidade ser maior que a da luz.
- b) Ajudar a compreender a origem do universo. X
- c) Compreender a origem dos buracos negros.
- d) A gravidade do espaço-tempo.

09. Explique as principais diferenças entre ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, fornecendo exemplos de cada tipo presentes no cotidiano.

R: nao precisa de um meio para se propagar, radio, tv, microondas. X

10. Ondas gravitacionais são um dos fenômenos mais fascinantes da física moderna. Você saberia dizer o que são ondas gravitacionais e como foram detectadas?

R: _____ X

Figura 10: Respostas do aluno A6 no pré-teste. Fonte: autoria própria

Seguindo a análise percebeu-se que as respostas incorretas revelavam um conflito cognitivo oriundo de subsunçores cotidianos, por exemplo ao relacionar se ver primeiro o raio e em seguida ouvir o som do trovão. A distinção fundamental entre ondas mecânicas (que requerem meio) e eletromagnéticas (que não requerem meio) tornou-se um organizador prévio consolidado para a turma.

No quesito de questões abertas, inicialmente escolhemos as respostas dos alunos às questões Q9 e Q10, lendo todas as respostas sem fazer julgamentos, apenas para se familiarizar com o conjunto, captar impressões gerais e formular as primeiras hipóteses de forma identificar, à luz da teoria de Ausubel e das UEPS de Moreira, evidências de aprendizagem significativa sobre ondas gravitacionais. A maioria dos alunos não respondeu ou esboçou um certo conhecimento em Q9, conforme Figura 11 e 100% não respondeu a Q10, conforme Figura 12, que tratava das ondas gravitacionais, algo compreensível, face ser um tema pouco explorado no ensino médio.

09. Explique as principais diferenças entre ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, fornecendo exemplos de cada tipo presentes no cotidiano.

R: não precisa de um meio para se propagar, rádio, TV, microondas.

A6

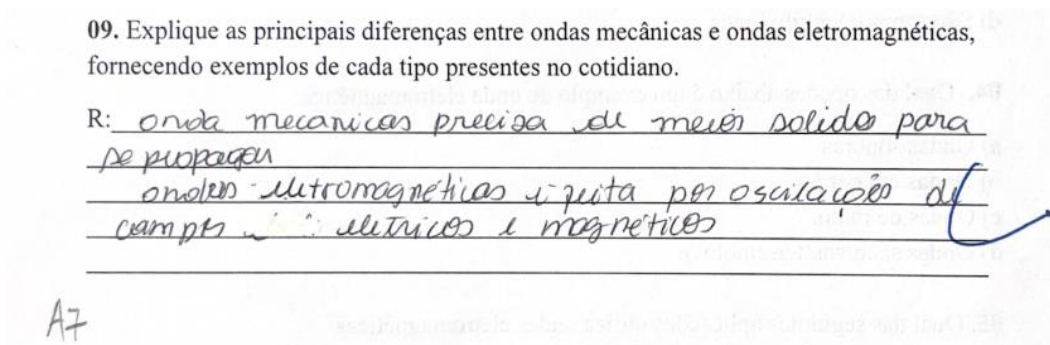


Figura 11– Respostas dos alunos A6 e A7 à Q9. Fonte autoria própria

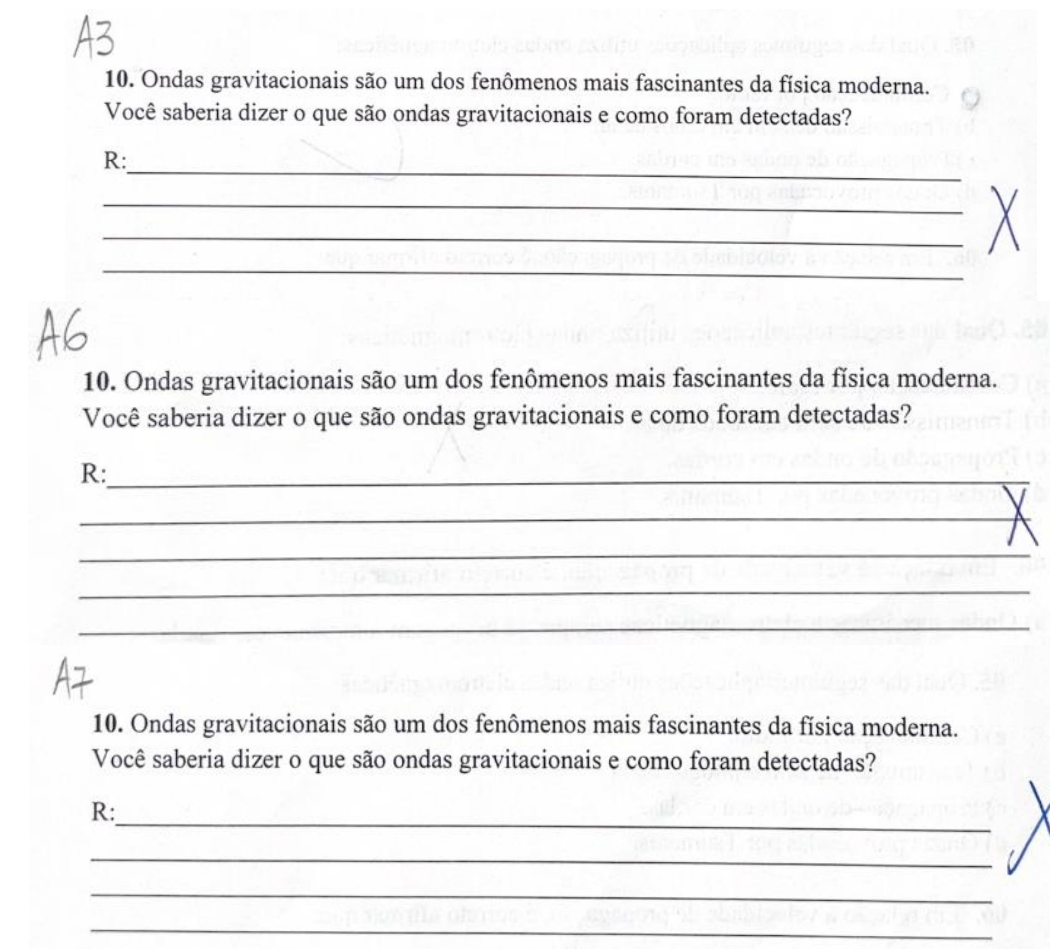


Figura 12– Respostas dos alunos A3, A6 e A7 à Q10. Fonte: autoria própria

Este pré-teste juntamente com listas de perguntas, palavras cruzadas, quizzes, vídeos, simulações, experimentos de baixo custo, diário de bordo, foram importantes para conhecer os alunos, permitiu gerenciar e ajustar os encontros subsequentes e encaminhá-los para a aprendizagem das ondas gravitacionais.

As falas dos estudantes analisadas inicialmente e no decorrer dos encontros indicavam que os estudantes passaram de uma estrutura conceitual indiferenciada para uma organização mais integrada dos conceitos, o que podemos caracterizar indícios de aprendizagem significativa. Esta evolução conceitual observada nos estudantes resulta de um percurso gradual de reorganização cognitiva, coerente com os princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa e com a estrutura das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

4.2 Evidências de aprendizagem significativa

Será utilizada a Análise de Conteúdo de Bardin para identificar, traduzir o conteúdo e às respostas escritas pelos alunos em um conteúdo de evidências de aprendizagem significativa à luz da Teoria de Ausubel e das UEPS, dentro da abordagem qualitativa translacional.

Inicialmente foram escolhidas as respostas das questões Q9 e Q10, lendo todas as respostas sem fazer julgamentos, apenas para se familiarizar com o conjunto, captar impressões gerais e formular as primeiras hipóteses de forma identificar evidências de aprendizagem significativa sobre ondas gravitacionais.

Em seguida passou-se a examinar o material identificando as unidades de registro (frases ou conjuntos de frases com um significado completo), contexto (a resposta completa de cada aluno a cada questão) e por fim, categorizando-as. Para (BARDIN, 2011), um conjunto de categorias boas deve possuir as seguintes qualidades:

1. Homogêneas (cada uma analisa um aspecto único);
2. Exclusivas (um trecho não se enquadra em duas ao mesmo tempo);
3. Pertinentes (respondem aos objetivos da pesquisa);
4. Objetivas (de fácil identificação por outro analista);
5. Produtivas (geram interpretações úteis).

Para este trabalho em particular foram definidas as seguintes categorias conforme Quadro 7:

Quadro 7 – Atividades da sequência didática (Elaborado pelo autor)

Categoria	Descrição	Formação Teórica
C1 - Diferenciação conceitual clara	Busca evidências de que o aluno refinou o conceito geral de onda em subconceitos específicos e claros	Diferenciação Progressiva
C2 - Reconciliação integrativa	Busca evidências de que o aluno não só diferenciou, mas também integrou os conceitos, percebendo	Reconciliação Integrativa
C3 - Integração conceitual	Busca evidências de que o novo conhecimento foi ligado de forma não arbitrária a exemplos da vida do aluno, indicando uma assimilação significativa	Aprendizagem Significativa
C4 - Subsunção com conhecimento do dia-a-dia	Busca evidências de que o aluno refinou o conceito geral de onda em subconceitos específicos e claros	Subsunção e Ancoragem
C5 - Subsunção Causa	Busca evidências de que o aluno identifica corretamente pelo menos um fenômeno gerador	Subsunção e Ancoragem
C6 - Subsunção Instrumental	Busca evidências de que o aluno menciona corretamente o princípio de detecção	Subsunção e Ancoragem
C7 - Mecanicismo ou Repetição literal	Busca evidências de que a informação foi armazenada de forma arbitrária e literal, sem ter sido relacionada a subsunções	Aprendizagem Mecânica
C8 - Conceitos chave ausentes	É uma categoria de exclusão	Ausência de subsunções

Iniciaremos nossa análise de forma geral individualizando por questão a partir de um conjunto de categorias que elencamos como se segue:

I- Categorias para Q9 (Diferenciação das ondas mecânicas e eletromagnéticas):

A análise revela que houve sucesso na diferenciação do conceito de onda. A maioria das respostas se enquadra nas categorias C1 e C2.

Diferenciação conceitual clara (C1): A distinção entre meio material e vácuo tornou-se um subsunçor objetivo e claro. Os exemplos foram ancorados no cotidiano dos alunos (som, rádio, luz, Wi-Fi), evidenciando uma assimilação não arbitrária e substantiva. As respostas dos alunos A1 e A5 são exemplos claros deste padrão: enxuta, precisa e com exemplos significativos, conforme Figuras 13 e 14:

A1: “As ondas mecânica precisa de um meio material para se propaga, exemplo corda e som, já as ondas eletromagnéticas, não precisam de meio material para se propagar exemplo ondas de rádios e micro-ondas.”

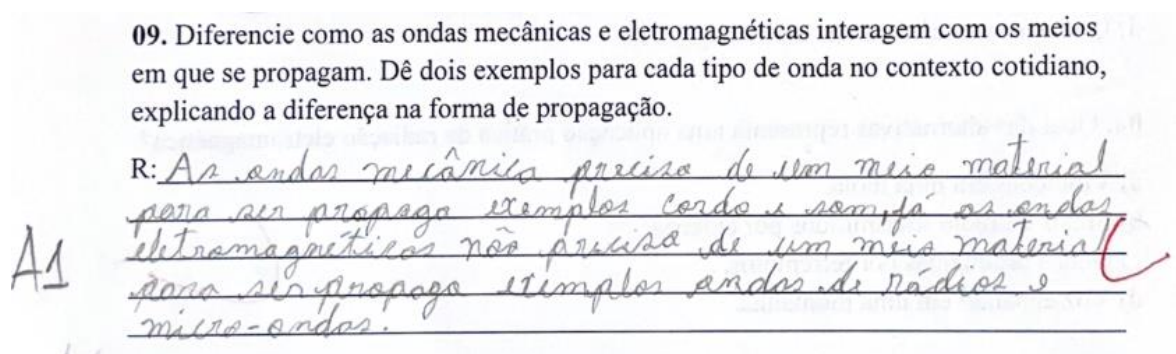


Figura 13– Resposta do aluno A1 à Q9. Fonte: autoria própria.

A5: “As ondas mecânicas como o som e ondas em cordas requerem um meio material sólido, líquido ou gasoso) para se propagarem, enquanto as ondas eletromagnéticas, como a luz e ondas de radio, podem se propagar tanto em meios materiais quanto no vácuo.”

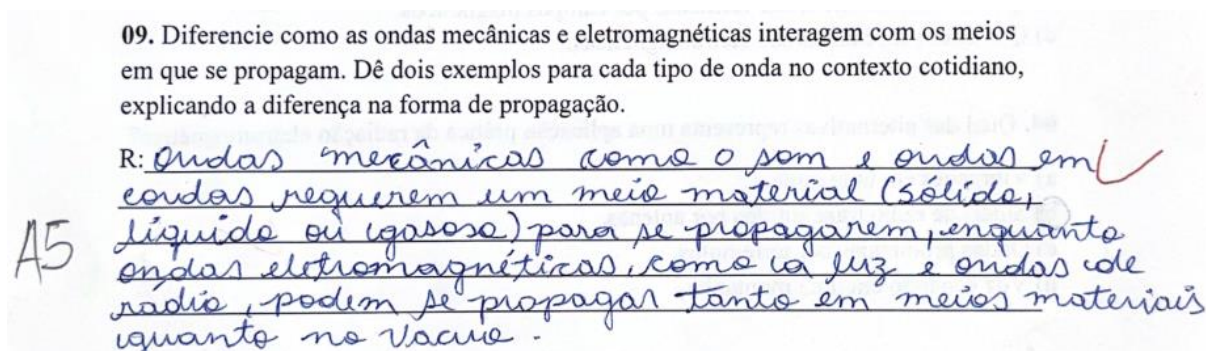


Figura 14– Resposta do aluno A5 à Q9. Fonte: autoria própria

Reconciliação integrativa (C2): Alguns alunos, como o A23 e o A25, não só listaram as diferenças, como as integraram numa explicação comparativa mais elaborada, mencionando os estados da matéria ou a dependência da vibração das partículas. Isto indica que o novo conhecimento veio de subsunçores prévios de outras áreas de estudo, formando uma rede cognitiva mais consistente.

A23: “Ondas mecânicas como o som e ondas em cordas requerem um meio material (sólido, líquido e gasoso) para se propagarem, enquanto ondas eletromagnéticas, como a luz e ondas de rádio, podem se propagar tanto em meios materiais enquanto no vácuo.”

A25: “Ondas mecânicas necessitam de um meio material como o ar, água ou sólido para se propagarem, pois dependem da vibração das partículas do meio. Já as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio material para se propagar e podem se mover no vácuo. Exemplos de ondas mecânicas: som, ondas do mar. Exemplos de ondas eletromagnéticas: luz solar, micro ondas.”

II- Categorias para Q10 - (Ondas Gravitacionais - A Construção de novos subsunçores para um conceito desconhecido e abstrato):

As respostas à Q10 demonstraram que a SD foi eficaz em criar subsunçores onde praticamente não existiam, isso porque os alunos não conheciam nada parecido que pudesse fazer uma associação anterior. Na subsunção causal (C5) e instrumental (C6) houve uma divisão entre os alunos que internalizaram predominantemente a causa (fusão de buracos negros) e aqueles que internalizaram a detecção (LIGO/VIRGO/laser). Isto é esperado e mostra diferentes vias de ancoragem do conhecimento como por exemplo. Integração conceitual (C7) - O Ápice da Aprendizagem Significativa: As respostas mais completas, como as dos alunos A2, A7, A9 e A18 representam o ideal da UEPS, conforme Figuras 15 a 18. Eles não só sabem "o quê", mas "como" e "porquê", conectando causa e efeito numa narrativa científica coerente. O aluno A2, em particular, mostrou aparentemente uma dificuldade na primeira parte do questionário do pré-teste, mas o que ocorreu foi que ele esqueceu de marcar as respostas. Mas no pós-teste demonstrou uma compreensão conceitual profunda do fenômeno, mostrando que houve evidência de uma aprendizagem significativa de forma seletiva e firme em tópicos específicos.

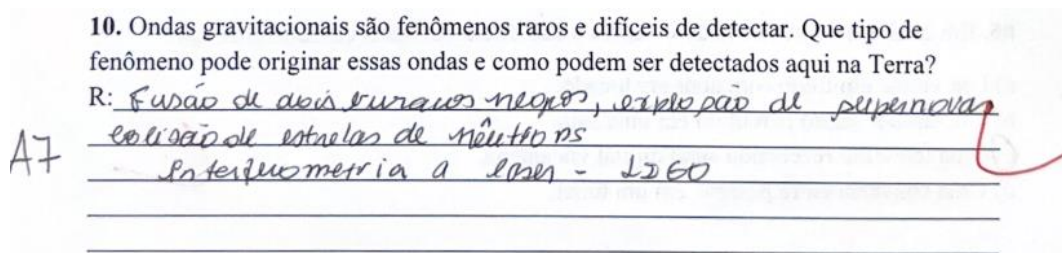
A2: “ondas gravitacionais são causadas por eventos cosmológicos de grande energia como colisões e fusão de buracos negros, estrela de nêutrons. São detectados em geral através de interferômetros como LIGO que mede as pequenas alterações no espaço tempo causadas por essas ondas...”

10. Ondas gravitacionais são fenômenos raros e difíceis de detectar. Que tipo de fenômeno pode originar essas ondas e como podem ser detectados aqui na Terra?

R: ONDAS GRAVITACIONAIS SÃO CAUSADAS POR EVENTOS COSMOLÓGICOS DE GRANDE ENERGIA COMO COLISÕES E FUSÃO DE BURACOS NEGROS ESTRELAS DE NÊUTRONS SÃO DETECTADAS EM TERRA ATRAVÉS DE INTERFERÔMETROS COMO LIGO QUE MEDE AS PEQUENAS ALTERAÇÕES NO ESPAÇO TEMPO CAUSADAS POR ESSAS ONDAS...

Figura 15– Resposta do aluno A2 à Q10. Fonte: autoria própria

A7: “Fusão de dois buracos negros, explosão de supernova, colisão de estrelas de nêutrons. Interferometria a laser - LIGO.”



A9: “São causadas pela aceleração de massas podem ser detectadas como o LIGO.”

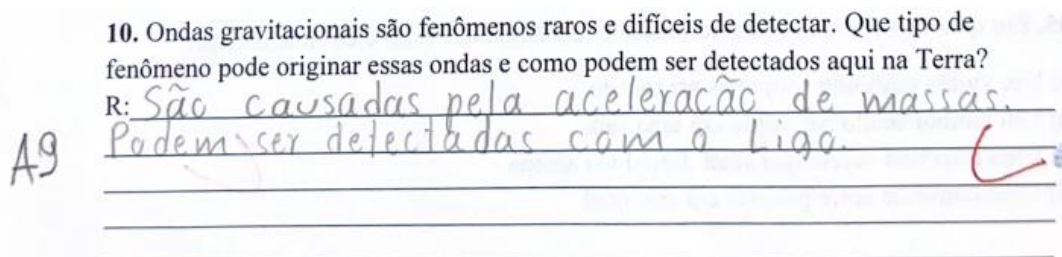


Figura 17– Resposta do aluno A9 à Q10. Fonte; autoria própria

A18: “Elas são detectadas por instrumentos ultra sensíveis como o LIGO e o VIRGO, que usam laser e interferômetros para medir minúsculas mudanças na distância entre espelhos provocados pela passagem dessas ondas.”

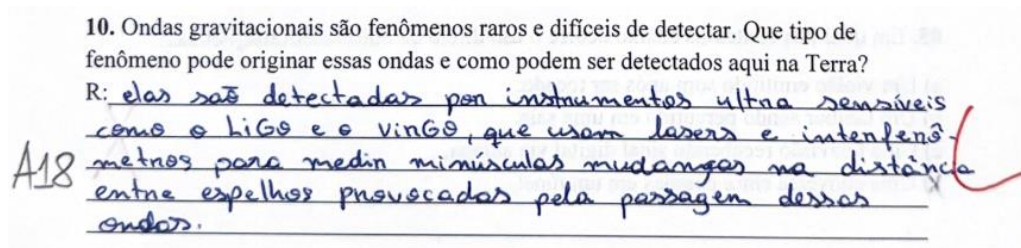


Figura 18– Resposta do aluno A18 à Q10. Fonte:autoria própria

Prosseguindo faremos uma análise de casos pontuais, explorando o desenvolvimento cognitivo de alguns alunos ao longo da SD:

Caso 1: Aluno A5 teve uma evolução conceitual consistente:

Pré-Teste: O aluno demonstrava subsunçores pouco alicerçado, identificando alguns exemplos corretos (Q2, Q3, Q4, Q5, Q7) mas falhando em conceitos-chave como a velocidade no vácuo (Q6) e a natureza das ondas eletromagnéticas (Q1 incorreta, Q7 correta).

Pós-Teste: Apresenta uma diferenciação progressiva marcante. Responde corretamente a todas as questões que exigiam a distinção meio/não-meio de propagação (Q1, Q3, Q6) e a aplicação do conceito (Q2, Q4, Q5, Q8). A resposta a Q7 no pós-teste, embora incorreta, pode indicar um esforço de reconciliação integrativa que ainda não se completou, mostrando que a aprendizagem é um processo contínuo. A evolução sugere que a SD atuou de forma eficaz na ancoragem e no refinamento dos seus subsunçores.

Caso 2: Aluno A24 - teve uma mudança conceitual profunda

Pré-Teste: O perfil inicial indicava uma estrutura cognitiva com subsunçores muito pouco alicerçadas como pode ser comprava, com a maioria das respostas incorretas. A única questão correta (Q7) poderia ser fruto de um chute. Pós-Teste: A mudança é drástica e evidencia uma reorganização conceitual. O aluno responde corretamente a todas as questões objetivas, demonstrando ter construído os subsunçores necessários e realizado uma assimilação significativa do conteúdo. Este caso é um exemplo patente de como a SD, enquanto intervenção pedagógica translacional, pode criar as condições para uma ancoragem eficaz em estudantes que partem de uma base conceitual mais fragilizada.

Caso 3: Aluno A25 - Evolução significativa:

Pré-Teste: O aluno não realizou o pré-teste. Mas conseguiu uma evolução extraordinária durante os demais encontros até a finalização da SD.

Pós-Teste: A mudança é drástica e evidencia uma reorganização conceitual. O aluno responde corretamente a todas as questões objetivas, demonstrando ter construído os subsunçores necessários e realizado uma assimilação significativa do conteúdo. Este caso é um exemplo patente de como a SD, enquanto intervenção pedagógica translacional, pode criar as condições para uma ancoragem eficaz em estudantes que partem de uma base conceitual mais fragilizada ou que não a tenha compreendida inicialmente. As respostas do teste estão conforme Figura 19.

Q9 (C1): Fornece uma explicação clara da diferença, com exemplos. Ao mencionar "*vibração das partículas*" mostra uma tentativa de reconciliação integrativa com provável conhecimento de estrutura da matéria. A frase "*pois dependem da vibração das partículas do meio*" é o grande salto qualitativo. Ele não está apenas descrevendo; ele está explicando o mecanismo físico. Ele reconciliou o conceito de onda mecânica com um subsunçor de outra área: a estrutura corpuscular da matéria. Podemos dizer que isso é a essência da aprendizagem significativa: conectar novos conhecimentos a outros de forma não arbitrária e substantiva.

Q10 (C6): "Na terra, as ondas gravitacionais podem ser detectadas na terra por instrumentos muito sensíveis, como aos detectores LIGO e VIRGO, que medem pequenas variações na distância entre espelhos." Interesse comentar que o aluno assimilou de forma muito significativa uma parte do processo de detecção, mas não a da geração. A causa do fenômeno é omitida, mostrando uma ancoragem mais forte no aspecto tecnológico e instrumental.

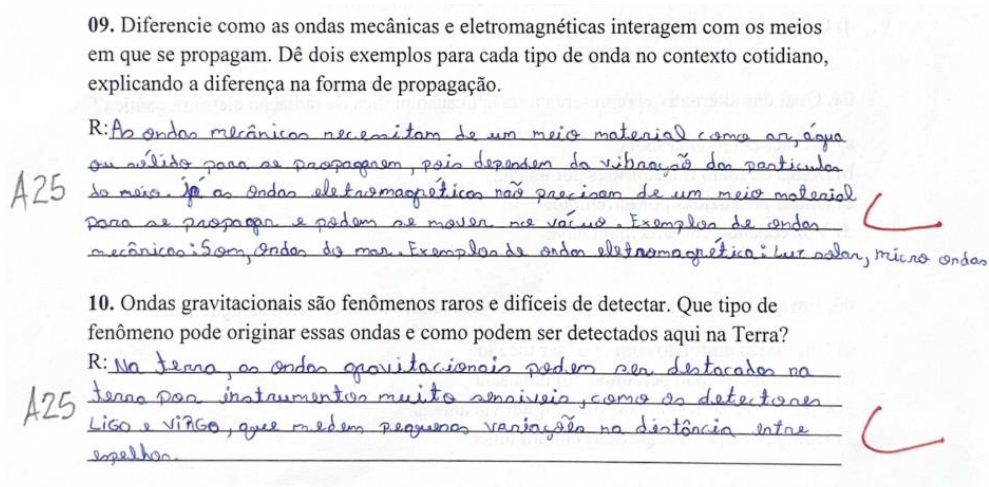


Figura 19– Resposta do aluno A25 à Q9 e Q10. Fonte: autoria própria.

Caso 4: Aluno A7 - Aprendizagem mecânica à significativa:

Pré-Teste: O desempenho no pré-teste indica que o aluno partiu de uma base conceitual muito frágil sobre ondulatória. A única questão que acertou (Q7) pode ter sido um palpite, pois ele errou todas as outras que testavam conceitos fundamentais. Isso sugere que os subsunçores sobre os tipos de onda, suas propriedades e diferenças eram vagas ou inexistentes.

Pós-Teste: A mudança é drástica e evidencia uma reorganização completa da estrutura cognitiva na área de ondulatória. O fato de ter acertado todas as questões, incluindo as mais contextuais e que exigiam aplicação do conhecimento, é um forte indicador de que a aprendizagem não foi mecânica. Ele foi capaz de diferenciar progressivamente os conceitos e aplicá-los em novas situações, o que é um critério de Ausubel para a aprendizagem significativa. As respostas do teste estão conforme Figura 20.

Q9 (C2 - Reconciliação Integrativa): Inicia com uma síntese: "*A diferença esta principalmente em como elas interagem com os meios*". Esta é uma evidência de que o aluno não apenas aprendeu os fatos, mas construiu um modelo mental para a diferença. Esta não é uma simples repetição da diferença, é uma síntese conceitual muito bem elaborada, demonstrando que internalizou a essência do conceito. Os exemplos não são apenas listados; são contextualizados e explicados. Para o som, ele descreve o cenário ("*som de campainha viaja pelo ar*"). Para a corda, ele menciona o mecanismo ("*a energia se move ao longo da corda por meio de vibrações*"). No caso da luz, ele associa corretamente à ideia de não precisar de meio. Este fato demonstra uma reconciliação integrativa onde o aluno organizou os novos conhecimentos conectando-os de forma não arbitrária e não literal, condições defendidas por Ausubel para ocorrência da aprendizagem significativa.

Q10 (C6 - Subsunção Instrumental): O que são e como são detectadas as ondas gravitacionais?

A7: "*Fusão de dois buracos negros, explosão de supernova, colisão de estrelas de nêutrons. Interferometria a laser - LIGO.*"

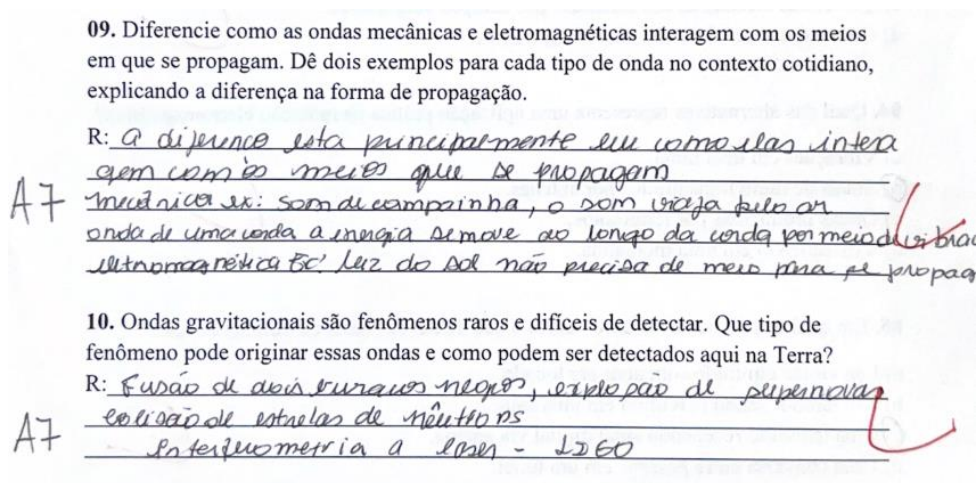


Figura 20– Resposta do aluno A7 à Q9 e Q10. Fonte: autoria própria.

Apesar de não ter definido o que são ondas gravitacionais, talvez por esquecimento, descreve as causas de forma precisa e menciona o método de detecção. É uma resposta completa e precisa neste quesito, demonstrando que o conhecimento foi integrado de forma não arbitrária e não literal(substantiva) à sua estrutura cognitiva. Este caso demonstra que a intervenção pedagógica não

apenas transmitiu informações, mas facilitou a construção de uma estrutura de conhecimento organizada, interconectada e profundamente significativa. O Aluno A26 não "decorou" as respostas; ele construiu entendimento, que é o objetivo final da teoria de Ausubel e das UEPS de Moreira.

A análise translacional dos dados, à luz de Ausubel e Moreira, permite inferir que a SD baseada nas UEPS foi bem-sucedida em promover uma aprendizagem significativa. Os dados da tabela 1 não mostram apenas "mais acertos"; eles revelam um movimento cognitivo da turma:

1. De conceitos vagos e não-diferenciados para uma estrutura conceitual clara e hierárquica;
2. Da confusão entre categorias para uma diferenciação progressiva estabilizada;
3. Da aplicação limitada do conhecimento para a capacidade de transferir e aplicar conceitos em situações novas e contextuais.

Tabela 1 – Resumo dos acertos por aluno nos pré e pós testes (Dados da pesquisa, 2025)

Questão	Tema principal	Pré-Teste	Pós-Teste
Q1	Conceito de onda mecânica	8	10
Q2	Exemplos de onda mecânica	9	9
Q3	Diferenciação entre onda mecânica e eletromagnética	11	13
Q4	Exemplos de onda eletromagnética	10	12
Q5	Aplicações das ondas eletromagnéticas	9	12
Q6	Velocidade de propagação das ondas	1	15
Q7	Caracterização de onda eletromagnética	13	15
Q8	Importância de se estudar ondas gravitacionais	8	13
Q9	Principais diferenças entre ondas mecânicas e eletromagnéticas	5	12
Q10	Definição de ondas gravitacionais e forma de detecção	0	9

As trajetórias individuais dos casos analisados corroboram essa visão, mostrando que a intervenção foi eficaz em diferentes níveis de conhecimento prévio, facilitando desde a construção de bases até o refinamento de conceitos já existentes. Esta análise fornece, portanto, evidências qualitativas robustas da eficácia da proposta pedagógica.

Já a análise das respostas discursivas traduz com sucesso os princípios teóricos em evidências práticas de aprendizagem significativa. A UEPS mostrou-se eficaz em:

- i. Criar e consolidar subsunçores específicos e estáveis, como a distinção fundamental entre ondas mecânicas e eletromagnéticas.
- ii. Tornar conceitos abstractos (espaço-tempo, ondas gravitacionais) em ideias compreensíveis e relacionáveis, ancorando-os em fenômenos (fusão de buracos negros e estrelas de nêutrons) e tecnologias (LIGO, Interferômetros) concretas.
- iii. Promover a reconciliação integrativa, onde os alunos não armazenam informações isoladas, mas as conectam em explicações causais e coerentes.

Os resultados evidenciam que a SD desenvolvida contribuiu para a promoção da aprendizagem dos estudantes sugerindo indícios de aprendizagem significativa.

As atividades propostas favorecem o desenvolvimento dos conhecimentos prévios, a partir da reorganização conceitual e a construção de novos significados por meio das experiências vivenciadas em sala. Observou-se que, ao longo do processo, os alunos passaram a utilizar com maior segurança

conceitos científicos discutidos nas aulas, revelando avanços na compreensão dos fenômenos e na capacidade de relacionar teoria e prática.

Dessa forma, os dados analisados indicam que a sequência cumpriu seu propósito pedagógico, promovendo um ambiente de aprendizagem mais participativo, reflexivo e contextualizado.

5.0 Conclusão

O presente trabalho teve como intuito central desenvolver, aplicar e avaliar uma Sequência Didática (SD) sobre ondas gravitacionais para o Ensino Médio, fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e na estrutura das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) de Marco Antonio Moreira. Ao final desta pesquisa investigativa, constata-se que os objetivos propostos não apenas foram alcançados, mas geraram um produto educacional e um conjunto de análises que validam a eficácia da abordagem pedagógica adotada. A seguir, apresenta-se uma síntese conclusiva que articula cada objetivo específico com as evidências e realizações decorrentes da pesquisa:

1. Em relação ao objetivo de elaborar uma sequência didática que integre os conceitos de ondas gravitacionais com conteúdos curriculares do Ensino Médio, em conformidade com a BNCC, conclui-se que a SD desenvolvida cumpriu com êxito esta meta. A sequência, organizada em cinco encontros, partiu intencionalmente de competências e habilidades basilares da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, tais como "compreender os movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais" e "identificar diferentes tipos de radiações presentes na vida cotidiana, reconhecendo sua sistematização no espectro eletromagnético" (BNCC). A progressão conceitual desde as ondas mecânicas às eletromagnéticas e, finalmente, às gravitacionais, materializou na prática o princípio da diferenciação progressiva ausubeliana, criando uma trajetória de aprendizagem alinhada tanto com a lógica da Física quanto com as diretrizes curriculares nacionais.
2. Quanto ao objetivo de identificar e selecionar conceitos fundamentais da ondulatória que sirvam como subsunçores para a ancoragem do conhecimento sobre ondas gravitacionais, a pesquisa demonstrou a acuidade do planejamento. Os conceitos de "propagação de energia", "necessidade de um meio material" (para ondas mecânicas) e "propagação no vácuo" (para ondas eletromagnéticas) revelaram-se subsunçores ideais. A análise dos dados, evidencia que estes conceitos foram efetivamente consolidados pela maioria dos alunos, tornando-se âncoras estáveis que permitiram a assimilação não arbitrária da ideia de que o próprio "tecido espaço-tempo" pode atuar como o "meio" para as ondas gravitacionais.
3. No que tange ao objetivo de integrar tecnologias educacionais e experimentação de baixo custo para mitigar a abstração dos fenômenos, os resultados foram decisivos. A multimodalidade da SD, que combinou simuladores PhET, vídeos, inteligência artificial generativa (ChatGPT) e experimentos de baixo custo (como o "tecido espaço-tempo"), mostrou-se uma estratégia poderosa para operacionalizar os organizadores prévios preconizados por Ausubel. Estes recursos não foram meros acessórios, mas elementos essenciais para concretizar o abstrato. A simulação da coalescência de buracos negros com bolas de tênis, por exemplo, traduziu visualmente um fenômeno cósmico inatingível, permitindo aos alunos visualizar a causa das ondas gravitacionais, um elemento frequentemente omitido em abordagens tradicionais.
4. Sobre o objetivo de aplicar os princípios da Aprendizagem Significativa e das UEPS para organizar o conhecimento de forma progressiva, a análise qualitativa translacional fornece as evidências mais contundentes. A trajetória de alunos complementada por respostas discursivas que demonstraram reconciliação integrativa, é a materialização do sucesso desta aplicação. As UEPS

proporcionaram a flexibilidade didática necessária para que os princípios ausubelianos fossem implementados, criando um ambiente onde o protagonismo do aluno foi incentivado por meio da investigação, da problematização e da construção ativa do conhecimento, tal como observado na interação crítica com a IA e na execução dos experimentos de baixo custo.

5. Por fim, no que diz respeito ao objetivo de avaliar a eficácia da SD por meio de instrumentos de avaliação formativa e somativa, a triangulação de métodos permitiu uma conclusão robusta. A avaliação somativa (pré e pós-teste) indicou uma melhoria quantitativa significativa no domínio conceitual. No entanto, foi a avaliação formativa – baseada no diário de bordo, na observação das atividades e, sobretudo, na análise qualitativa das questões discursivas, que revelou a natureza da aprendizagem significativa. Respostas de alguns alunos, que integraram de forma coerente os conceitos de causa, fenômeno e detecção, vão além da memorização, demonstraram a compreensão substantiva e a transformação da estrutura cognitiva que são a essência da teoria que embasa este trabalho.

5.1 Considerações finais

Em síntese, esta pesquisa não apenas desenvolveu e aplicou uma Sequência Didática, mas validou um modelo pedagógico translacional eficaz para o ensino de tópicos complexos e contemporâneos da Física. A articulação bem-sucedida entre a teoria de Ausubel, as UEPS de Moreira, os recursos multimodais e um público heterogêneo, noturno, demonstra a viabilidade e a relevância de se repensar o ensino de Física no Ensino Médio.

Os resultados apontam que é perfeitamente possível levar temas de fronteira, como as ondas gravitacionais, para a sala de aula, desde que estes sejam potencialmente significativos e ancorados em uma estratégia didática intencional e fundamentada. O trabalho deixa, assim, um legado tanto prático, na forma do produto educacional, quanto teórico, ao demonstrar na prática o poder de uma aprendizagem verdadeiramente significativa.

Vale salientar, no entanto, que para o trabalho avançar um pouco mais, é necessário um maior tempo de aplicação da SD, talvez o dobro de encontros com aulas geminadas fosse o ideal. Os experimentos muitas vezes já trazidos e confeccionados, pudessem ser montados desde o princípio pelos próprios alunos e testados no momento da aula. Isto poderia trazer um ganho maior no engajamento e na curiosidade daquilo que eles estão construindo mostrarem um fenômeno físico. A opção do experimento confeccionado, pronto para demonstração foi necessário pelo tempo de cada encontro na SD.

Referências

- Ausubel, D. P., Novak, J. D., & Hanesian, H. (1980). *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana.
- Ausubel, D. P. Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003. 247 p. 1ª Edição.
- Bardin, L. Análise de Conteúdo. 1. ed. São Paulo: Edições 70, 2011. 279 p. 1ª Edição.
- Brasil. Ministério da Educação. (2018). *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: MEC.

- Moreira, M. A. (2011). *Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares*. São Paulo: Editora Livraria da Física.
- Costa, A. (2021). *Ondas gravitacionais no ensino médio*. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). MNPEF.
- Fontele, F. F. M., & Carvalho, J. C. N. (2020). Sequência didática para o ensino de ondas gravitacionais e interferência eletromagnética. *Artigo científico*.
- Gomes da Silva, G. (2022). *Surfando nas ondas gravitacionais*. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). MNPEF.
- Neto, J. P., & Teixeira, R. R. P. (2022). Uso de vídeos sobre buracos negros e ondas gravitacionais no ensino de Física. *Artigo científico*.
- Santana, L. C. N., & Plaza, R. R. (2018). Ondas gravitacionais: da detecção às salas de aula. *Artigo científico*.
- Villatorre, A. M., & Higa, I., & Tychanowicz, S. D. Didática e Avaliação em Física. 1.ed. São Paulo, SP: Editora Saraiva, 2009. 166 p. 1ª Edição.