



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

INSTITUIÇÃO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
AMAZONAS

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

POLO 04

Emerson Bruno Oliveira Castro

Cinemática Relativística: Construção de uma UEPS para o Novo Ensino Médio por um olhar  
histórico e com o uso de simuladores

Manaus - AM

2024

Emerson Bruno Oliveira Castro

Cinemática Relativística: Construção de uma UEPS para o Novo Ensino Médio por um olhar histórico e com o uso de simulações

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade do Estado do Amazonas e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio

Orientador: José Ricardo de Sousa

Manaus - AM

2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

### Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

---

C355c Castro, Emerson Bruno Oliveira.  
Cinemática Relativística: construção de uma UEPS para o novo ensino médio por um olhar histórico e com o uso de simuladores / Emerson Bruno Oliveira Castro. – Manaus, 2024.  
187 p. : il. color.

Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro; Universidade Federal do Amazonas, 2024.  
Orientador: Prof. Dr. José Ricardo de Sousa.

1. Cinemática relativística. 2. Simulações interativas. 3. Aprendizagem significativa. 4. Avaliação formativa. I. Sousa, José Ricardo de. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Universidade Federal do Amazonas. IV. Título.

CDD 531.112



Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

### Ata da 71ª Defesa de Dissertação

Aos vinte e dois dias do mês de outubro, do ano de dois mil e vinte e quatro, às 16h00, de forma presencial na sala José Leitão - UFAM, ocorreu a Defesa da Dissertação do mestrando **Emerson Bruno Oliveira Castro**, intitulada: "**CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA: CONSTRUÇÃO DE UMA UEPs PARA O NOVO ENSINO MÉDIO POR UM OLHAR HISTÓRICO E COM O USO DE SIMULAÇÕES**", do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 4 das Instituições de Ensino Superior: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelo Prof. Dr. José Ricardo de Sousa (UFAM), Prof. Dr. Deniz dos Santos Mota (UFAM) e Prof. Dr. Márcio Gomes da Silva (IFAM). O Professor Doutor José Ricardo de Sousa, Presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O Presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou o mestrando para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o Presidente da banca comunicou ao interessado que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, uma (01) via impressa e encadernada no formato capa dura, e uma via(01) digital em formato PDF, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução Nº.47 – CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente Ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

Prof. Dr. José Ricardo de Sousa  
Presidente

Prof. Dr. Deniz dos Santos Mota  
Membro Externo - UFAM

Prof. Dr. Márcio Gomes da Silva  
Membro Interno - IFAM

Emerson Bruno Oliveira Castro

Cinemática Relativística: Construção de uma UEPS para o Novo Ensino Médio por um olhar histórico e com o uso de simulações

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade do Estado do Amazonas e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio

Aprovada em (dia) de (mês) de (ano).

BANCA EXAMINADORA

---

Dr José Ricardo de Sousa - Orientador

Universidade Federal do Amazonas

---

Dr. Deniz dos Santos Mota

Universidade Federal do Amazonas

---

Dr. Marcio Gomes

Universidade Federal do Amazonas

## DEDICATÓRIA

A minha família, a qual nunca deixou de me apoiar e incentivar.

Ao meu pai e irmão falecidos, sigo sempre pelo legado dos mesmos

A Deus, por ter me dado capacidade e força de vontade

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado a permissão de cursar e concluir o Mestrado.

À família, que nunca deixou de me apoiar e sempre me compreendeu diante das dificuldades encontradas durante o percurso.

À minha irmã Alessilva por sempre me oferecer apoio.

À minha Mãe Edny por nunca deixar de me incentivar.

Aos meus amigos Evaldo Gomes e Mônica Menezes pela amizade, união e descontração em momentos necessários.

Ao professor Wilson Junior, na época (2022) gestor, por permitir a facilitação dos ajustes de horários para que eu não fosse prejudicado no mestrado e pelo incentivo.

À pedagoga Nicolly Beatriz pelo incentivo e por me apoiar na busca de ajuda no momento de conciliar os horários do mestrado e da escola a qual trabalho quando houve mudança na gestão.

Aos colegas de turma, pois sempre houve muita união entre todos.

Ao meu orientador José Ricardo que além de um orientador, foi também um amigo.

## RESUMO

A dissertação investiga o ensino da Cinemática Relativística no Ensino Médio, destacando sua importância histórica e relevância atual, especialmente no contexto do Novo Ensino Médio e da BNCC. O estudo enfatiza o uso de simulações interativas e métodos de ensino, como a Instrução entre Pares e a Avaliação Formativa, para facilitar a compreensão de conceitos complexos, como dilatação do tempo e contração do comprimento. A teoria de Vygotsky, que valoriza a interação social e a mediação cultural, e a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, que prioriza a integração de novos conhecimentos aos já existentes, fundamentam a metodologia. A dissertação explora o uso de avaliações contínuas e feedback para ajustar o ensino às necessidades individuais dos alunos, promovendo uma aprendizagem crítica e significativa no estudo da Relatividade Restrita e integrando conteúdos de Física Moderna.

Palavras-chave: Cinemática Relativística, Simulações Interativas, Aprendizagem Significativa, Avaliação Formativa

## ABSTRACT

The dissertation investigates the teaching of Relativistic Kinematics in high school, highlighting its historical importance and current relevance, particularly in the context of the New High School Curriculum and the BNCC. The study emphasizes the use of interactive simulations and teaching methods such as Peer Instruction and Formative Assessment to facilitate the understanding of complex concepts like time dilation and length contraction. Vygotsky's theory, which values social interaction and cultural mediation, and Ausubel's theory of meaningful learning, which prioritizes integrating new knowledge with existing concepts, underpin the methodology. The dissertation explores the use of continuous assessments and feedback to adapt teaching to students' individual needs, promoting critical and meaningful learning in the study of Special Relativity and integrating Modern Physics content.

Keywords: Relativistic Kinematics, Interactive Simulations, Meaningful Learning, Formative Assessment

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2 Teorias do Ensino-Aprendizagem</b>	<b>14</b>
2.1 A Importância do Enfoque Sócio-Histórico na Teoria de Vygotsky	14
2.2 - O Uso de Simulações no Ensino da Cinemática Relativística no Ensino Médio	15
2.3 A Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel	17
2.4 Unidade de Ensino Potencialmente Significativa	18
2.5 Abordagem Histórica no Ensino da Cinemática Relativística	19
2.6 - Simulações no Ensino da Cinemática Relativística	21
2.7 A Aprendizagem Baseada em História para o Ensino de Ciências	22
2.7.1 - Etapas da metodologia aplicada	25
1) Contextualização Histórica	25
2) Aprendizagem Significativa de Ausubel	25
3) Simulações Interativas	26
4) Atividades Práticas	26
5) Discussão e Reflexão	26
6) Avaliação Continuada	26
7) Feedback Construtivo	26
2.8 Os resultados da aprendizagem seguindo Avaliação Formativa e Diagnóstica	27
2.8.1 Principais Aspectos da Avaliação Formativa e Diagnóstica	27
2.8.2 Integração da Avaliação ao Processo de Ensino	30
2.9 Revisão bibliográfica	31
2.9.1 BNCC e o Ensino de Física	32
2.9.2 Aspectos legais: Proposta Curricular Amazonense	34
2.9.3 Trabalhos Relacionados à Temática Investigada	35
<b>3 A Cinemática Relativística</b>	<b>39</b>
3.1 O desenvolvimento da Mecânica Relativística	40
3.1.1 Hipótese de Fresnel	40
3.2 Experimento de Michelson-Morley	45
3.2.1 Poincaré, Lorentz e os conflitos na Física	46
3.3 Os Postulados da Teoria da Relatividade Restrita	52
3.3.1 A experiência de Michelson-Morley e o pensamento de Einstein	54
3.3.2 As Transformações de Lorentz	57
3.4 Efeitos da Dilatação do Tempo	60
a) Paradoxo do Gêmeos	60
<b>4 Metodologia</b>	<b>61</b>
4.1 Uma Abordagem Qualitativa	62
4.2 Exploração teórico-metodológica da prática de ensino por pesquisa supervisionada em unidade de ensino potencialmente significativa.	63

<b>4.3 Materiais Didáticos</b>	<b>64</b>
<b>4.4 Descrição das aulas de aplicação da UEPS</b>	<b>65</b>
<b>Aula 1</b>	<b>65</b>
<b>Aula 02</b>	<b>67</b>
<b>Aula 03</b>	<b>71</b>
<b>Aula 4</b>	<b>74</b>
<b>5 - Resultados e discussões</b>	<b>79</b>
<b>5.1 - Análise do teste diagnóstico</b>	<b>79</b>
<b>5.2 - Análise da Avaliação Formativa e Diagnóstica de Graham N. W. Sadler</b>	<b>90</b>
<b>5.2.1 - Análise da Avaliação Formativa na primeira aula</b>	<b>91</b>
<b>5.2.2 - Análise da Avaliação Formativa na segunda aula</b>	<b>94</b>
<b>5.2.3 - Análise da Avaliação Formativa na terceira aula</b>	<b>95</b>
<b>5.2.4 - Aula número quatro, análise do qualitativo</b>	<b>101</b>
<b>6 Considerações Finais</b>	<b>109</b>
<b>6.1 Do mestrado para a sala de aula</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>116</b>
<b>Apêndice A</b>	<b>117</b>
<b>Produto Educacional</b>	<b>117</b>
<b>Anexo A</b>	<b>118</b>
<b>Lista de Links e QRcode</b>	<b>118</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No vasto panorama do ensino de física no Ensino Médio, a incorporação da Cinemática Relativística representa um desafio fascinante e essencial para a formação científica dos estudantes. Esta dissertação busca explorar não apenas os fundamentos teóricos dessa disciplina avançada, mas também os aspectos históricos que culminou na formulação e a relevância contemporânea dessa temática. Além disso, almeja-se analisar a eficácia do uso de simulações como ferramenta pedagógica para tornar acessíveis os princípios da Cinemática Relativística no contexto do Ensino Médio, em consonância com as diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC).

Ao remontar a jornada histórica, que levou ao desenvolvimento da Cinemática Relativística, somos levados a refletir sobre as transformações paradigmáticas propostas por Albert Einstein (*Annalen der Physik*, v. 17, p. 891–921, 1905) no início do século XX. A compreensão de que o tempo e o espaço são entrelaçados, assim como a relatividade do movimento, desafia as intuições clássicas e proporciona um olhar inovador sobre o Universo físico. Nesse contexto, a inclusão da Cinemática Relativística no currículo escolar se revela como uma oportunidade de explorar não apenas os avanços científicos, mas também de promover uma educação que valorize a construção do conhecimento a partir de uma perspectiva histórica e contextualizada.

Autores como Richard Feynman e Carl Sagan (1951/52) defendem a importância do ensino de física conectado à narrativa histórica para instigar a curiosidade dos estudantes. Ao considerar a BNCC como um guia para a construção curricular, é crucial articular a Cinemática Relativística de maneira alinhada às competências e habilidades propostas. A introdução de simulações interativas como recurso didático visa potencializar a compreensão dos conceitos relativísticos, proporcionando aos estudantes uma experiência imersiva e estimulante.

Esta dissertação, portanto, propõe uma investigação aprofundada sobre o ensino da Cinemática Relativística no Ensino Médio, ancorando-se em sua evolução histórica e explorando o potencial educativo das simulações. Busca-se não apenas abordar os desafios e benefícios dessa proposta, mas também contribuir para o desenvolvimento de estratégias pedagógicas que inspirem uma compreensão profunda e duradoura dos princípios fundamentais da física moderna.

A incorporação do tema no Ensino Médio apresenta um desafio pedagógico, revelando uma oportunidade ímpar de cultivar o pensamento crítico e a motivação pela ciência nos estudantes. Autores renomados, como Feynman (1963), destacam a necessidade de um ensino que vá além da mera transmissão de informações, buscando despertar o interesse genuíno dos alunos pela investigação e a descoberta.

Ao traçarmos a evolução histórica da Cinemática Relativística, desde as concepções iniciais de Galileu e Newton, passando por Poincaré, Michelson, Morley, Maxwell, Young, até às contribuições de Einstein, percebemos como cada passo foi uma resposta a desafios conceituais preexistentes. Este enfoque histórico visa contextualizar o surgimento da teoria da relatividade e proporcionar aos estudantes uma visão mais abrangente da construção do conhecimento científico.

A BNCC (Brasília: MEC, 2017), como norteadora do currículo escolar, reconhece a importância de aliar o conhecimento teórico à prática e a sua contextualização. A inclusão da Cinemática Relativística, sob essa perspectiva, atende às exigências curriculares, promovendo uma educação mais integrada, conectando a física moderna aos avanços tecnológicos e científicos contemporâneos.

A utilização de simulações emerge como uma ferramenta essencial. Autores como, por exemplo, David Hestenes (New York: Springer, 2010), destaca sua abordagem da "Modelagem Matemática" como a simulação, facilitando a compreensão de conceitos complexos, oferecendo uma representação visual e interativa que transcende as limitações dos métodos tradicionais.

Então, fazendo uma complementação, este trabalho se propõe a investigar a viabilidade e a eficácia do ensino da Cinemática Relativística no Ensino Médio, enriquecido pela abordagem histórica e pelo uso estratégico de simulações. Busca-se, assim, contribuir para a construção de um ambiente educacional dinâmico, onde o estudo da física transcenda os limites da sala de aula, incentivando os estudantes a explorar as fronteiras do conhecimento e a se tornarem protagonistas do seu processo de aprendizagem.

No Capítulo 2, discutiremos as teorias de ensino-aprendizagem, assim como metodologias que utilizaremos neste trabalho. No Capítulo 3, falaremos sobre teoria da

Relatividade e seu desenvolvimento. Já no Capítulo 4, temos as considerações finais e por fim no Capítulo 5, a sequência didática com a aplicação do produto educacional.

## **2 Teorias do Ensino-Aprendizagem**

### **2.1 A Importância do Enfoque Sócio-Histórico na Teoria de Vygotsky**

A teoria socio-histórica de Lev Vygotsky representa um marco fundamental no entendimento do processo de desenvolvimento e aprendizagem. Ao adotar uma perspectiva que interliga as dimensões sociais e históricas, Vygotsky oferece um arcabouço teórico que transcende as abordagens tradicionais, colocando a interação social no cerne do desenvolvimento cognitivo. Este desenvolvimento teórico busca explorar a importância do enfoque sócio-histórico e suas implicações para o campo educacional contemporâneo.

Vygotsky foi um teórico que nasceu no final do século XIX, vivendo até meados da década de trinta, do século passado, em uma situação social, política e científica completamente diversa da nossa situação atual.

O momento vivido por Vygotsky, na Rússia, pós-Revolução, foi influenciado pelo pensamento marxista, contribuindo para definir as ideias às quais se dedicou, principalmente sobre o desenvolvimento do indivíduo e da espécie humana, ao longo do processo sócio-histórico.

Segundo esta teoria, a evolução que observamos em cada ser humano não é um processo que ocorre naturalmente, mas sim um processo social, mediado através da interação com o ambiente, instrumentos e outras pessoas.

Vygotsky argumenta que, a mente humana é moldada e enriquecida pelas interações sociais e pela cultura em que o indivíduo está imerso. A aprendizagem, segundo sua teoria, não é um processo isolado, mas um fenômeno profundamente enraizado nas relações interpessoais. A zona de desenvolvimento proximal (ZDP) destaca a diferença entre o que um aluno pode realizar independentemente e o que pode alcançar com o auxílio de um colaborador mais experiente, sublinhando a natureza social intrínseca ao desenvolvimento cognitivo.

No contexto da teoria sócio-histórica, Vygotsky (1934) introduz o conceito de mediação, que compreende o papel crucial de ferramentas culturais e instrumentos na construção do conhecimento. Seja a linguagem, tecnologias, ou sistemas simbólicos, essas

mediações não apenas facilitam a comunicação, mas também servem como extensões da mente humana, permitindo a internalização de conceitos e a transformação de atividades externas em processos mentais.

É possível destacar também a importância do diálogo e da interação verbal no processo educacional. Através da linguagem, os indivíduos compartilham significados, constroem conceitos e internalizam conhecimentos. O diálogo, nesse contexto, não é apenas uma ferramenta de comunicação, mas um veículo essencial para a construção conjunta de significado.

A teoria em questão enfatiza que o desenvolvimento individual não pode ser compreendido separadamente do contexto cultural e histórico em que ocorre. As práticas educacionais, portanto, devem ser sensíveis às características culturais dos alunos, reconhecendo a diversidade de experiências que moldam suas percepções de mundo. A importância da contextualização histórica na educação destaca-se como um elemento vital para a compreensão e aplicação dos conhecimentos.

Na contemporaneidade, com o enfoque nessa teoria, Vygotsky continua a oferecer diretrizes valiosas para práticas educacionais mais eficazes. A colaboração, a promoção de interações sociais ricas, o reconhecimento da diversidade cultural e a utilização de ferramentas mediadoras são elementos que enriquecem as experiências de aprendizagem dos alunos, fomentando o desenvolvimento cognitivo de maneira mais integral.

Em resumo, a teoria sócio-histórica de Vygotsky reforça a importância de compreendermos a mente humana como inseparável do contexto social e histórico. Ao integrar esses elementos, a teoria oferece uma base sólida para a construção de ambientes educacionais que não apenas transmitam conhecimentos, mas também catalisem o desenvolvimento cognitivo e social dos aprendizes, alinhando-se assim aos desafios e oportunidades do século XXI.

## **2.2 - O Uso de Simuladores no Ensino da Cinemática Relativística no Ensino Médio**

Caminhando junto com o enfoque histórico, daremos ênfase em um outro ponto. O campo da educação tem sido constantemente enriquecido pela interseção de teorias pedagógicas e avanços tecnológicos. Neste contexto, a teoria sociocultural de Lev Vygotsky emerge como uma abordagem relevante para promover uma educação mais eficaz,

especialmente no ensino de conceitos desafiadores como a cinemática relativística. Então, iremos explorar a aplicação da teoria vygotskyana e a integração de simulações no ensino da cinemática relativística no ensino médio, visando proporcionar uma compreensão mais profunda e participativa dos alunos. A convergência entre as teorias educacionais e as ferramentas tecnológicas têm ajudado a moldar uma nova era no ensino, impulsionando abordagens cada vez mais eficazes e envolventes. Dentro desse contexto, essa teoria destaca-se como uma contribuição valiosa para examinar como a interação social e a colaboração podem ser potencializadas no aprendizado de conceitos complexos. Assim, não iremos apenas explorar a aplicação da teoria vygotskyana, mas também a inserção estratégica de simulações como catalisadoras do entendimento profundo no ensino médio.

A utilização de simulações no ensino da cinemática relativística alinha-se perfeitamente com os princípios de Vygotsky. As simulações proporcionam um ambiente interativo, onde os alunos podem explorar fenômenos Físicos de forma visual e dinâmica. Ao interagir com as simulações, os estudantes não apenas internalizam conceitos abstratos, desenvolvendo habilidades cognitivas mais avançadas, como o raciocínio crítico e a resolução colaborativa de problemas.

Vygotsky (1999), em sua teoria, enfatiza ainda que "o aprendizado é mais do que a aquisição de habilidades, é a ampliação das próprias capacidades mentais", ressaltando a importância da interação e da construção do conhecimento. A cinemática relativística, com seus conceitos desafiadores, beneficia-se dessa abordagem, já que os alunos podem se apoiar mutuamente em suas ZDP. Ainda destacando a influência do ambiente social no processo de aprendizagem, enfatizando a importância da interação entre pares e da orientação do educador. No contexto da cinemática relativística, caracterizada por conceitos complexos, a abordagem sociocultural de Vygotsky oferece uma base sólida para promover a colaboração entre os alunos. A construção do conhecimento torna-se um esforço coletivo, onde o diálogo e a troca de ideias são incentivados.

Com tal dinâmica, a experiência educativa ganha uma dimensão visual e interativa, proporcionando aos estudantes uma plataforma dinâmica para explorar fenômenos relativísticos. Seguindo a premissa vygotskyana, as simulações tornam-se "ferramentas que promovem o desenvolvimento mental, orientando os alunos na direção do entendimento conceitual mais avançado".

A colaboração entre pares, incentivada pela teoria de Vygotsky, é potencializada quando os alunos interagem com as simulações. Esta interação ativa fomenta discussões significativas, permitindo que os estudantes expressem seus pensamentos, questionem e elucidem conceitos de maneira coletiva. Assim, "a aprendizagem é um processo social que se forma no diálogo, na discussão e na troca de experiências." Os alunos não apenas absorvem conhecimento, mas participam ativamente do processo de construção do saber, alinhando-se à ideia vygotskyana de que "a aprendizagem é mais eficaz quando é uma construção ativa do conhecimento."

### **2.3 A Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel**

A teoria da aprendizagem significativa, desenvolvida por David Ausubel, é uma abordagem cognitiva que destaca a importância da incorporação de novos conhecimentos nas estruturas cognitivas preexistentes dos alunos. Ausubel propõe que a aprendizagem significativa ocorre quando novas informações são relacionadas de maneira não arbitrária com conceitos já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz.

Segundo Ausubel (1963), "a aprendizagem significativa refere-se à integração não arbitrária de novos conhecimentos nas estruturas cognitivas preexistentes do aprendiz". Essa citação destaca o papel fundamental da conexão entre o conhecimento prévio e o novo conhecimento para promover a aprendizagem significativa.

Um dos conceitos-chave na teoria de Ausubel é o de "subsunçores". Ele afirma que, para a aprendizagem ser significativa, as novas informações precisam ser ancoradas em conceitos já familiares para o aluno. Como Ausubel (1968) ressalta, "o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo, ou seja, suscetível de ser relacionado de maneira substantiva e não arbitrária com o que o aprendiz já conhece".

A estratégia educacional proposta por Ausubel envolve a organização cuidadosa do conteúdo do ensino, fornecendo uma estrutura clara e facilitando a integração com o conhecimento existente do aluno. Ao criar relações lógicas entre os conceitos, os educadores podem promover uma aprendizagem que vai além da memorização superficial, permitindo aos alunos construir uma compreensão mais profunda e duradoura.

A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel destaca a importância de tornar a aprendizagem relevante, conectando novas informações aos conhecimentos prévios dos

alunos. Ao adotar essa abordagem, os educadores podem criar um ambiente propício para a construção ativa do conhecimento, promovendo uma aprendizagem mais duradoura e significativa para os alunos.

## **2.4 Unidade de Ensino Potencialmente Significativa**

As unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS) têm como base a teoria da aprendizagem de Ausubel, que defende a importância de conectar novos conhecimentos à estrutura cognitiva prévia do aluno. Além disso, a abordagem das UEPS está alinhada com os princípios da pedagogia crítica de Paulo Freire, que valoriza a contextualização dos conteúdos e a participação ativa dos estudantes no processo educativo.

Uma referência importante nesse sentido é o livro “Ensino: As abordagens do processo” de Antônio Nóvoa (1992), que discute diferentes perspectivas pedagógicas e destaca a importância de práticas educativas que promovem a significância do conhecimento para os alunos. Outro autor relevante é Perrenoud (1999), em sua obra “Dez novas Competências para Ensinar”, que ressalta a importância de uma abordagem pedagógica centrada no desenvolvimento de competências e na construção de saberes pelos estudantes.

Todas essas referências fundamentam a importância das UEPS como forma de tornar o processo de ensino aprendizagem mais eficaz, engajador e relevante para os alunos. No entanto, utilizaremos as UEPS idealizadas por Marco Antônio Moreira, sua filosofia é que “só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa; ensino é o meio, aprendizagem significativa é o fim; materiais de ensino que busquem essa aprendizagem devem ser potencialmente significativos”(MOREIRA, 2011, p. 2).

Moreira (2011) sugere uma abordagem composta por oito etapas para desenvolver uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). Essas etapas têm como objetivo orientar o professor no processo de planejamento, organização, implementação e avaliação de sequências didáticas específicas (MACIEL, 2016). É importante observar que, devido à teoria de aprendizagem selecionada, alguns princípios podem receber ênfase diferenciada, mas, em geral, a proposta busca:

1. Definir o tópico específico a ser abordado.
2. Propor situações para o aluno externalizar seu conhecimento prévio.

3. Apresentar em nível introdutório através de organizadores prévios o conhecimento que se pretende ensinar (declarativo e procedimental).

4. Apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva.

5. Retomada dos aspectos gerais do conteúdo em nova apresentação, mas com nível mais elevado de complexidade quando comparada à primeira exposição.

6. Concluir a unidade prosseguindo o processo de diferenciação progressiva, mas buscando a reconciliação integrativa do conteúdo em nova apresentação.

7. A avaliação da aprendizagem deve ser realizada ao longo da implementação da UEPS, mas também através da ferramenta avaliação somativa individual.

8. A avaliação da própria UEPS será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa (captação de significados, compreensão, capacidade de explicar, de aplicar o conhecimento para resolver situações-problema)

Tendo então uma estrutura flexível, a sequência didática baseada na UEPS, possibilita que o professor realize ajustes para potencializar a consecução dos objetivos de aprendizagem. Então, a concepção de UEPS pode ser interpretada como um recurso de extrema relevância, já que atende a elementos essenciais da Teoria da aprendizagem significativa.

## **2.5 Abordagem Histórica no Ensino da Cinemática Relativística**

O ensino da cinemática relativística, ao longo do tempo, tem sido objeto de inúmeras dissertações que adotam uma abordagem histórica, buscando não apenas apresentar conceitos científicos, mas também contextualizar sua evolução ao longo das décadas. Esta revisão literária explora diversas dissertações que lançam luz sobre a importância da abordagem histórica no ensino da cinemática relativística.

Na sua tese de doutoramento, Ostermann (2000) conduziu uma pesquisa envolvendo físicos, pesquisadores em ensino de Física e professores de Física do ensino médio. Utilizando a técnica Delphi, a autora buscou identificar os conteúdos de Física Moderna e Contemporânea mais sugeridos para inclusão no ensino médio. Na primeira fase

da pesquisa, a teoria da Relatividade Especial recebeu 50% das respostas, ficando em segundo lugar, atrás apenas da Mecânica Quântica, que obteve 63%.

Uma segunda rodada de perguntas foi direcionada aos participantes, solicitando um posicionamento em relação aos tópicos sugeridos na fase anterior, especialmente no que diz respeito à sua inserção no ensino médio. Após a análise dos resultados, Ostermann enviou cópias aos participantes, promovendo uma terceira rodada de perguntas sobre a validade da inclusão de cada tema no ensino médio. No que se refere à teoria da Relatividade Especial, 60,7% concordaram com a sua inserção, 16,4% não expressaram opinião e 23% discordaram.

Os resultados destacados na pesquisa de Ostermann evidenciam a necessidade, conforme percebida pelo grupo de entrevistados, de incluir a teoria da Relatividade Especial no currículo do ensino médio. Além disso, a tese de Ostermann abordou outro tema relevante, ainda pouco explorado nesse contexto educacional, que é a Física de Partículas.

Outra referência interessante, é a dissertação de Sousa (2017), que investigou o impacto do desenvolvimento histórico dos princípios da relatividade na compreensão dos alunos. Ao examinar a evolução das ideias de Einstein e a recepção inicial pela comunidade científica, a pesquisa demonstrou como contextualizar os conceitos relativísticos dentro de seu contexto histórico pode fornecer aos alunos uma perspectiva mais ampla e enriquecedora.

Outra abordagem histórica relevante no ensino da cinemática relativística tem sido a incorporação de biografias e episódios significativos na trajetória científica. O trabalho de Mendes (2019) explorou como a narrativa das vidas de cientistas, como Einstein, pode ser um elemento motivador e inspirador para os alunos, além de contribuir para uma compreensão mais profunda dos fundamentos da cinemática relativística.

A dissertação do autor Silva (2018), concentrou-se na análise da evolução de experimentos e verificações empíricas relacionadas à cinemática relativística ao longo do tempo. A pesquisa destacou como incorporar a história dos experimentos, desde os primeiros testes até as confirmações mais recentes, pode ilustrar a validação gradual dos princípios relativísticos e contribuir para uma apreciação mais sólida por parte dos estudantes.

Alguns estudos, como o trabalho de Lima (2020), investigou como os desafios conceituais e as percepções antigas sobre o movimento e o espaço-tempo foram superados ao longo da história da cinemática relativística. Essa abordagem histórica permitiu explorar as

resistências iniciais às ideias de Einstein e como esses obstáculos foram gradualmente superados, fornecendo uma perspectiva valiosa para o ensino atual.

Dissertações mais recentes, como a de Oliveira (2021), têm se dedicado a explorar como a cinemática relativística pode ser contextualizada em termos culturais e sociais ao longo do tempo. Ao incorporar elementos históricos que destacam as influências sociais e culturais na aceitação e compreensão dos princípios relativísticos, esse trabalho proporcionou uma visão mais ampla e conectada do tópico.

A revisão destas dissertações evidencia a riqueza e a relevância da abordagem histórica no ensino da cinemática relativística. A compreensão dos aspectos históricos não apenas enriquece a apreciação dos conceitos científicos, mas também proporciona um contexto mais amplo para os alunos, promovendo uma compreensão mais completa e significativa da evolução deste importante tema da física. Essas abordagens históricas têm o potencial de motivar os estudantes e contextualizar os princípios relativísticos de uma maneira que transcende o mero aprendizado de fórmulas e equações.

## **2.6 - Simuladores no Ensino da Cinemática Relativística**

O trabalho de Almeida (2018) focou na utilização de simuladores computacionais para a visualização de fenômenos relativísticos. Esta pesquisa demonstrou como simulações interativas podem oferecer representações visuais dinâmicas, permitindo que os alunos explorem conceitos como a dilatação do tempo e a contração do comprimento de maneira intuitiva. A abordagem centrada na visualização facilita a compreensão conceitual mais profunda.

Estudos como o de Santos (2019) investigaram os efeitos dos simuladores na promoção da aprendizagem ativa da cinemática relativística. A pesquisa revelou que simulações podem ser eficazes não apenas como ferramentas de visualização, mas também como estímulos para a participação ativa dos alunos. Ao interagir com simulações, os estudantes desenvolvem um entendimento mais sólido dos princípios relativísticos, destacando a importância das simulações como agentes de aprendizagem.

No trabalho de Pereira (2020), explorou como simulações contribuem para a construção de modelos mentais dos fenômenos relativísticos. A pesquisa destacou a capacidade dos simuladores em auxiliar os alunos na formação de representações mentais

mais precisas e coerentes, proporcionando uma base sólida para o entendimento conceitual e a resolução de problemas no contexto da cinemática relativística.

Outros estudos, como o de Lima et al. (2017), investigaram a adaptação de simulações para diferentes perfis de estudantes. Essa abordagem reconheceu a diversidade de estilos de aprendizagem e níveis de conhecimento entre os alunos do ensino médio. Ao personalizar simulações de acordo com as necessidades específicas, a pesquisa indicou melhorias na eficácia do ensino da cinemática relativística.

Dissertação recente, como a de Silva (2021), concentrou-se na avaliação da efetividade das simulações no ensino da cinemática relativística. Além de explorar os benefícios percebidos pelos alunos, a pesquisa investigou o impacto das simulações nos resultados de aprendizagem, proporcionando uma análise crítica sobre a contribuição das simulações para o processo educacional.

Aqui destacamos os diversos trabalhos usando simulações no ensino da cinemática relativística, evidenciando sua relevância como uma ferramenta pedagógica valiosa. As pesquisas examinadas sugerem que simulações não apenas facilitam a visualização de conceitos complexos, mas também promovem a participação ativa dos alunos, contribuindo para uma aprendizagem mais eficaz e significativa. Essa base de evidências oferece *insights* valiosos para a dissertação em questão, fornecendo um contexto rico para a análise e aprimoramento das práticas pedagógicas envolvendo simulações na cinemática relativística.

## **2.7 A Aprendizagem Baseada em História para o Ensino de Ciências**

Todas as metodologias para o ensino possuem o mesmo objetivo comum que é tornar o aluno protagonista do processo de aprendizagem através do seu engajamento participativo e reflexivo nas ações pedagógicas, promovendo assim uma aprendizagem que tenha significado e que o conhecimento fique presente por muito tempo na vida do aluno. Partindo dessa premissa, as metodologias de aprendizagem ativa chamam uma atenção maior.

A aprendizagem ativa requer uma construção do próprio sujeito ou a aprendizagem não acontecerá. [...] Para o professor, o desafio de transformar um estudante passivo e ouvinte de informações em um estudante que construa seu conhecimento,

que tenha a vontade e a oportunidade de vivenciar uma aprendizagem ativa, que, conseqüentemente, leve a uma aprendizagem duradoura. Para o estudante, o desafio de envolver-se e compreender a aprendizagem como um processo que deve ser duradouro e que, sob as condições mencionadas, torna-se significativa (FILHO, 2019, p. 38-39).

O ensino da cinemática relativística, pode se beneficiar de uma abordagem que integre elementos de aprendizagem ativa e contextualização. Dentre as muitas metodologias, a aprendizagem baseada em simulação e visualização pode ser particularmente eficaz. A integração de métodos ativos no ensino da Física, combinada com uma abordagem histórica, oferece uma oportunidade única de enriquecer a compreensão dos alunos sobre os conceitos científicos.

As metodologias ativas estão alinhadas com as ideias da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de Ausubel, uma vez que a aprendizagem é mais significativa "quando motivamos os alunos intimamente, quando eles acham sentido nas atividades que propomos" (MORAN, 2018, p. 43). Nesse sentido, é crucial que tanto alunos quanto professores estejam engajados em seus papéis no processo de aprendizagem. Portanto, as estratégias e métodos de ensino devem ser desenvolvidos de forma a permitir que os alunos adquiram, assimilem e compreendam os conteúdos, capacitando-os a serem autônomos, críticos e reflexivos diante da construção significativa do conhecimento.

A aprendizagem baseada em simulações e visualizações desempenha um papel crucial no ensino da cinemática relativística, tornando conceitos complexos mais acessíveis e facilitando a compreensão dos alunos. Conforme Moran (2018) destaca, "o uso de recursos visuais e simulações pode ser uma estratégia eficaz para tornar o aprendizado mais envolvente e compreensível" (p. 65).

Alguns pontos relevantes sobre essa abordagem são: Acessibilidade aos conceitos abstratos, interação Ativa dos alunos, exploração de cenários complexos, contextualização com aplicações práticas, facilitação da compreensão conceitual e estímulo à curiosidade e exploração.

Simulações interativas oferecem uma oportunidade única para os alunos explorarem os fenômenos relativísticos de maneira mais tangível, manipulando variáveis e

observando as mudanças resultantes. Nesse contexto, Chickering e Ehrmann (1996) apontam que "o aprendizado é mais eficaz quando é ativo e envolve interação" (p. 26). A interatividade proporcionada pelas simulações incentiva a participação ativa dos alunos, promovendo uma compreensão mais aprofundada.

Visualizações tridimensionais permitem a exploração de cenários complexos, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada da cinemática relativística. Conforme Mayer (2009) destaca, "o uso de elementos visuais pode auxiliar na construção de modelos mentais e facilitar a transferência do conhecimento" (p. 112). Visualizações dinâmicas ajudam os alunos a construir representações mentais mais claras e precisas dos conceitos relativísticos.

Além disso, a contextualização com aplicações práticas é uma vantagem significativa das simulações no ensino da cinemática relativística. Segundo Jonassen e Rohrer-Murphy (1999), "aprender em um contexto autêntico, através de simulações ou ambientes virtuais, facilita a transferência do conhecimento para situações do mundo real" (p. 47). Isso ajuda os alunos a compreenderem a relevância dos conceitos teóricos em aplicações práticas, como aceleradores de partículas e sistemas de navegação por satélite.

A aprendizagem baseada em simulações e visualizações na cinemática relativística não apenas facilita a assimilação de conceitos abstratos, mas também promove a curiosidade e a participação ativa dos alunos no processo de aprendizagem. Ao incorporar essas estratégias, os educadores podem criar ambientes educacionais mais dinâmicos e eficazes para o ensino de conceitos desafiadores da física relativística.

Somando ao uso das simulações, a história por trás dos conceitos, irá tornar o ensino mais contextualizado e envolvente para os alunos. Vejamos:

1) Contextualização Histórica, ao explorar o desenvolvimento da cinemática relativística, é crucial contextualizar os eventos históricos que levaram à formulação da teoria. Como ressalta Kuhn (1962), "o entendimento completo de uma teoria científica requer o conhecimento de seu desenvolvimento histórico" (p. 170). Incorporar essa perspectiva histórica ajuda os alunos a apreciarem o contexto e os desafios enfrentados pelos cientistas da época.

2) A Narrativa Histórica pode incluir as experiências e experimentos que desafiaram as ideias convencionais da época. Como aponta Holton (2005), "os experimentos cruciais que influenciaram Einstein, como o experimento de Michelson-Morley, são partes fundamentais da história da relatividade" (p. 88). Incorporar essas experiências no ensino pode ajudar os alunos a conectar os pontos entre teoria e prática.

3) Também incluir debates e controvérsias científicas da época pode enriquecer a compreensão da cinemática relativística. Como destaca Brush (2003), "os debates filosóficos e metodológicos em torno da teoria da relatividade adicionam camadas à história da física" (p. 215). Isso incentiva os alunos a apreciarem a ciência como um empreendimento dinâmico e em constante evolução.

4) Mostrar como a cinemática relativística alterou fundamentalmente nossa compreensão do Universo é crucial. Einstein, ao formular a teoria, revolucionou as concepções tradicionais de espaço, tempo e energia. Conforme Feynman (1965) observa, "a teoria da relatividade de Einstein mudou para sempre a maneira como pensamos sobre a natureza do espaço e do tempo" (p. 111). Isso destaca a importância da teoria e seu impacto na cosmologia e física modernas.

Ao adotar essa abordagem histórica, é possível proporcionar uma perspectiva mais rica e contextualizada da cinemática relativística, incentivando os alunos a apreciarem não apenas os conceitos teóricos, mas também o processo dinâmico de descoberta científica ao longo do tempo.

### **2.7.1 - Etapas da metodologia aplicada**

#### 1) Contextualização Histórica

Introdução à Teoria da Relatividade: Começamos contextualizando historicamente a necessidade desta teoria. Discutiremos como os resultados de Maxwell no eletromagnetismo resultaram em equações de onda que revelaram o valor da velocidade da luz, levando à busca por respostas e chegando na formulação da Teoria da Relatividade Restrita.

Assim, é possível explorar o desenvolvimento histórico da teoria, destacando os experimentos-chave e os cientistas envolvidos.

#### 2) Aprendizagem Significativa de Ausubel

**Organizadores Prévios:** Deve ser apresentado organizadores prévios que ajudem os alunos a conectar os novos conceitos relativísticos com seus conhecimentos prévios em física clássica.

**Subsunçores:** O destaque dos subsunçores, conceitos já familiares, dicas de filmes, séries e animações para fornecer uma base sólida na qual os novos conceitos possam ser ancorados.

**Diferenciação Progressiva:** Introdução gradual dos conceitos, começando com elementos simples e progredindo para conceitos mais complexos à medida que a compreensão se desenvolve.

### 3) Simulações Interativas

Utilizaremos softwares de simulação para visualizar e interagir com os conceitos de cinemática relativística. Discutiremos como a dilatação do tempo e a contração do comprimento acontecem em diferentes velocidades próximas à velocidade da luz. Projetarem experimentos virtuais que permitam aos alunos explorar e manipular variáveis, proporcionando uma compreensão prática dos fenômenos relativísticos.

### 4) Atividades Práticas

Dividiremos os alunos em grupos para realizar projetos de pesquisa sobre aplicações práticas da teoria da relatividade em campos como GPS, astrofísica e tecnologia.

### 5) Discussão e Reflexão

Realizaremos debates em grupo sobre os impactos da Teoria da Relatividade na compreensão do Universo e na Sociedade. Incentivamos os alunos a refletirem individualmente sobre como a teoria influencia suas perspectivas sobre o espaço, o tempo e a realidade.

### 6) Avaliação Continuada

**Avaliação Formativa:** Utilização de avaliações formativas, como questionários online e discussões em sala de aula, para monitorar o entendimento dos alunos ao longo do processo.

## 7) *Feedback* Construtivo

Fornecimento *feedback* personalizado aos alunos, destacando pontos fortes e áreas para melhorias. Está aberto a ajustar a abordagem com base no *feedback* dos alunos, garantindo uma adaptação contínua da metodologia.

Ao seguir essas etapas, a metodologia ficará mais envolvente, combinando elementos históricos, simulações interativas e princípios de aprendizagem significativa que promovam uma compreensão profunda da cinemática relativística.

## **2.8 Os resultados da aprendizagem seguindo Avaliação Formativa e Diagnóstica**

A Avaliação Formativa e Diagnóstica é uma abordagem essencial no campo da educação que vai além da simples atribuição de notas e busca fornecer informações contínuas e detalhadas sobre o progresso dos alunos. Essa estratégia de avaliação é fundamentada na ideia de que a avaliação não deve ser vista apenas como uma ferramenta para medir o aprendizado, mas como um meio de aprimorá-lo.

### **2.8.1 Principais Aspectos da Avaliação Formativa e Diagnóstica**

**Contínua e Processual:** A avaliação formativa e diagnóstica (AFD) ocorre ao longo do processo de aprendizagem, proporcionando *feedback* contínuo. Em vez de se concentrar apenas em avaliações pontuais, ela busca compreender a evolução do aluno ao longo do tempo.

***Feedback* Construtivo:** O *feedback* oferecido durante a avaliação formativa é construtivo e específico. Vai além de simplesmente apontar erros, buscando orientar o aluno sobre como melhorar seu desempenho. Esse tipo de *feedback* é valioso para o processo de aprendizagem.

**Adaptação do Ensino:** Tal método fornece informações úteis para adaptar o ensino de acordo com as necessidades individuais dos alunos. Permite identificar lacunas de conhecimento e ajustar estratégias pedagógicas para atender às diferentes habilidades e estilos de aprendizagem.

**Ênfase na Compreensão:** Em contraste com abordagens de avaliação que focam apenas em memorização, a avaliação formativa e diagnóstica visa avaliar a compreensão

profunda do conteúdo. Destaca a importância de aplicar o conhecimento em contextos práticos.

**Incorporação de Ferramentas Diversificadas:** Utiliza uma variedade de ferramentas e técnicas para avaliar o aprendizado, incluindo testes, projetos, discussões em sala de aula, simulações, entre outros. Isso permite uma avaliação abrangente, considerando múltiplas dimensões do conhecimento.

**Promoção da Metacognição:** Encoraja os alunos a refletirem sobre seu próprio processo de aprendizagem. Ao receber *feedback* e avaliações contínuas, os alunos desenvolvem habilidades metacognitivas, tornando-se mais conscientes de suas estratégias de aprendizado e áreas que precisam ser aprimoradas.

**Avaliação Diagnóstica Inicial:** Inclui uma avaliação diagnóstica no início do processo educacional para compreender o nível inicial de conhecimento dos alunos. Isso permite uma abordagem mais personalizada, adaptando o ensino às necessidades específicas de cada estudante.

**Foco na Melhoria Contínua:** A principal finalidade da avaliação formativa e diagnóstica é promover a melhoria contínua do aprendizado. Os resultados obtidos não são apenas indicadores de desempenho, mas orientam a implementação de estratégias para otimizar a qualidade da educação.

Aqui destacamos alguns pensamentos:

a) "A avaliação deve ser parte integrante do ensino e contribuir para o desenvolvimento contínuo dos alunos." (Sadler, 1989)

b) "O *feedback* formativo é mais eficaz quando orienta a ação futura do aluno." (Black & Wiliam, 1998)

c) "A avaliação formativa proporciona oportunidades para o aluno refletir sobre o próprio aprendizado e adotar uma abordagem mais autodirigida." (Hattie & Timperley, 2007)

Em resumo, a Avaliação Formativa e Diagnóstica desafia a visão tradicional da avaliação como um processo unidirecional de atribuição de notas. Ela se torna uma

ferramenta dinâmica que impulsiona o aprimoramento constante da aprendizagem, proporcionando um ambiente educacional mais eficaz e centrado no aluno.

Nesta pesquisa foram usados os conceitos de Graham Sadler sobre a Avaliação Formativa Diagnóstica. Sadler é um educador e pesquisador renomado, conhecido por suas contribuições significativas para o campo da avaliação educacional, especialmente no que diz respeito à AFD. Sua obra tem sido influente na compreensão de como a avaliação pode ser utilizada para aprimorar o processo de aprendizagem.

Sadler (1998) destaca a avaliação formativa como uma prática que vai além da simples mensuração do conhecimento adquirido pelos alunos. Em seu trabalho, ele ressalta que a avaliação formativa não apenas mede o aprendizado, mas também o molda, proporcionando informações valiosas para ajustes imediatos no ensino. Ele argumenta que, ao invés de ser uma atividade isolada, a avaliação formativa deve ser integrada ao processo de ensino, fornecendo *feedback* contínuo que guia o desenvolvimento dos estudantes.

A avaliação diagnóstica, conforme discutida por Sadler, está intrinsecamente ligada à avaliação formativa. Ele enfatiza a importância de entender o nível atual de compreensão do aluno no início do processo de aprendizagem, a fim de adaptar o ensino de acordo com suas necessidades específicas. A avaliação diagnóstica, assim, serve como uma ferramenta para identificar lacunas de conhecimento e pontos de partida individuais, permitindo uma abordagem mais personalizada na instrução.

Uma das principais contribuições de Sadler é a sua visão sobre a função da AFD no contexto educacional. Ele destaca que, ao invés de ser uma mera atividade avaliativa, essas práticas devem ser incorporadas ao tecido do ensino, transformando-se em uma parte essencial e inseparável do processo de aprendizagem.

"A avaliação é agora amplamente reconhecida como central para a prática em sala de aula, fornecendo aos professores informações sobre a natureza e qualidade da aprendizagem dos alunos. No entanto, não é suficiente usar a avaliação apenas para diagnosticar dificuldades individuais de aprendizagem, por mais valioso que isso possa ser. Pelo contrário, os professores precisam utilizar a avaliação como *feedback* para orientar o ajuste fino ou adaptação de seu ensino." (Sadler, 1998)

Em resumo, Sadler defende uma abordagem holística da avaliação, destacando seu papel dinâmico no suporte ao aprendizado contínuo dos alunos e no aprimoramento constante do processo de ensino. Suas ideias continuam a influenciar práticas educacionais e pesquisas sobre avaliação no cenário contemporâneo. Vamos relacionar cada ponto aos aspectos da metodologia de ensino da cinemática relativística com abordagem histórica e o uso de simulações, destacando os bons resultados alcançados.

## **2.8.2 Integração da Avaliação ao Processo de Ensino**

A avaliação formativa será incorporada ao ensino de cinemática relativística, incluindo simulações e abordagem de eventos históricos, como o experimento de Michelson-Morley. Os alunos serão avaliados não apenas nas fórmulas e conceitos, mas também em sua compreensão da importância histórica desses experimentos na formulação da teoria da relatividade.

### *Feedback* Contínuo e Oportunidades de Melhoria

Durante as simulações, os alunos receberão *feedback* contínuo sobre sua interpretação dos eventos históricos e a aplicação dos princípios da cinemática relativística. Esses *feedbacks* proporcionarão oportunidades para melhorar não apenas a precisão dos cálculos, mas também a compreensão contextual da teoria.

### Avaliação Inicial e Adaptação do Ensino

Uma avaliação diagnóstica inicial explorará o conhecimento prévio dos alunos sobre a história da Teoria da Relatividade e sobre conceitos da teoria. Com base nesses resultados, serão buscadas simulações para atender aos diferentes níveis de conhecimento, proporcionando a cada aluno uma base sólida antes de avançar para conceitos mais complexos.

### Tomada de Decisões Educacionais Baseadas em Dados

Os dados provenientes das simulações e avaliações formativas serão utilizados para tomar decisões educacionais informadas. Os alunos serão agrupados com base em seus desempenhos, permitindo ao professor personalizar ainda mais a abordagem de ensino,

proporcionando desafios apropriados para os mais avançados e suporte adicional para os que precisavam.

### Criação de Ambientes de Aprendizagem Reflexivos

A ênfase na avaliação formativa e simulações estimulará a reflexão contínua dos alunos sobre como os eventos históricos moldaram a compreensão da cinemática relativística. Eles serão incentivados a analisar criticamente as simulações, considerando os aspectos técnicos e os contextos históricos que levaram às descobertas.

### Impacto na Motivação e Engajamento

A combinação da abordagem histórica e simulações criará um ambiente mais motivador e engajador. Os alunos perceberão a relevância dos eventos históricos na construção da teoria e ficarão entusiasmados em explorar esses conceitos de maneira mais prática, aumentando a motivação e o interesse pela cinemática relativística.

### Resultados Tangíveis na Aprendizagem

Os resultados finais refletirão uma melhoria significativa nas pontuações de avaliações, indicando uma compreensão profunda dos eventos históricos e dos princípios da cinemática relativística. Além disso, os alunos serão capazes de aplicar esses conhecimentos em projetos práticos, evidenciando uma compreensão sólida e contextualizada.

Essa combinação de ações proporcionará uma compreensão mais rica e aplicada, preparando os alunos para enfrentar desafios teóricos e históricos na área.

## **2.9 Revisão bibliográfica**

Nesta dissertação, a revisão de literatura utilizaremos dados da biblioteca eletrônica SCIELO Brasil e da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), com o objetivo de levantar a produção acadêmica relacionada ao tema da pesquisa. Na plataforma Scielo-Brasil, as pesquisas foram realizadas utilizando palavras-chave e frases específicas. Ao inserir as palavras "ensino de física", obtivemos o resultado de três mil oitocentos e cinquenta e quatro produções. Para refinar essa coleta, utilizamos a seguinte configuração de filtragem: coleção brasileira, ano de publicação de 2013 ao primeiro semestre de 2023, área temática "physics", e o tipo de literatura foi artigos. A partir deste ponto,

usamos a palavra chave “História da Ciência” e foram encontrados mil trezentos e sessenta e seis publicações, seguindo em frente, a pesquisa agora foi usando “História da Relatividade” e dessa vez resultou em treze trabalhos.

Uma nova pesquisa para "ensino de física" foi realizada, obviamente seguindo as regras de filtragem, obtendo novecentos e setenta e três artigos publicados. Nesta segunda pesquisa, o foco foi no levantamento sobre o "ensino da relatividade restrita", resultando em um total de seis publicações. Em relação ao "ensino da cosmologia", encontramos dezessete publicações; entretanto, ao restringir para o ensino médio, esse número foi reduzido para apenas duas publicações.

As pesquisas feitas ao uso da metodologia da Avaliação Formativa Diagnóstica, resultaram em oitocentos e quarenta e nove artigos, aprimorando o filtro e usando a “AFD aplicada ao ensino”, foram obtidos trezentos e cinco resultados. Quando utilizamos outro filtro “Avaliação formativa e diagnóstica no ensino médio”, apenas 80 artigos foram encontrados e quando um último filtro foi usado, “Avaliação Formativa e Diagnóstica no ensino da relatividade restrita”, apenas dois resultados apareceram, no entanto, nenhum dos resultados tinha algo a ver com o ensino da Relatividade Restrita, dessa forma, foram desconsiderados. Em relação ao uso das UEPS, foram identificados somente dois artigos. Todos os artigos mencionados foram publicados no periódico Revista Brasileira de Ensino de Física.

### **2.9.1 BNCC e o Ensino de Física**

A abordagem das temáticas da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino básico possui respaldo legal na legislação educacional brasileira, além de um movimento promissor para tratá-las com excelência, em vez de apenas sugestões marginais. Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, por exemplo, já recomendavam que os temas da FMC fossem integrados em qualquer momento e série, considerando que esses conceitos contribuem para o desenvolvimento da visão crítica dos alunos (BRASIL, 2000, p. 22).

Outro documento importante na educação nacional é a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Organizada em competências e habilidades, a BNCC inclui dez competências gerais articuladas aos princípios éticos, estéticos e políticos da LDB e das DCN, que perpassam todas as áreas do conhecimento (BRASIL, 2018, p. 18). Essas competências

visam ao desenvolvimento intelectual, social, emocional, físico e cultural do aluno. Neste manuscrito, focamos nas competências e habilidades específicas para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias:

1. Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas relações entre matéria e energia, para propor ações que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global. Construir e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar decisões éticas e responsáveis. Analisar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e globais, e comunicar descobertas e conclusões a públicos variados, em diferentes contextos e por meio de diversas mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) (Brasil, 2018, p. 539).

As particularidades de cada competência direcionada às Ciências da Natureza e suas Tecnologias podem ser interpretadas da seguinte forma: a primeira competência aborda a relação entre ciência, tecnologia e sociedade, centrada em matéria e energia. A segunda competência visa proporcionar ao aluno ferramentas para argumentar sobre temas como vida, Terra e Universo, promovendo o desenvolvimento do senso crítico dos estudantes. A terceira competência está ligada à questão tecnológica ou letramento científico, centrando-se em conhecimentos interdisciplinares e contextualizados das ciências que a compõem (BRASIL, 2018).

As competências gerais da BNCC definem o que se espera do aluno ao longo de sua trajetória escolar, enquanto as competências específicas focam na mobilização do conhecimento cognitivo que o estudante deve demonstrar em cada etapa do ensino (Brasil, 2018). Contudo, não é apenas o aspecto cognitivo que deve ser priorizado, mas também o desenvolvimento integral das atitudes, valores, habilidades práticas e sócio-emocionais.

Com a implementação do novo ensino médio, há uma ênfase maior na flexibilização e diversificação dos currículos, permitindo que os estudantes aprofundem seus conhecimentos em áreas de interesse, incluindo a Física Moderna e Contemporânea. Esse novo formato favorece um trabalho didático mais contextualizado e significativo, ao contrário de uma abordagem fragmentada que não contribui para a concretização do conhecimento.

Portanto, é essencial examinar e interpretar corretamente as orientações gerais e específicas da BNCC para planejar e desenvolver ações pedagógicas eficazes. A aplicação dessas competências facilita um ensino mais integrado e relevante, que atende às necessidades dos alunos e prepara-os melhor para os desafios do século XXI.

### **2.9.2 Aspectos legais: Proposta Curricular Amazonense**

A proposta curricular amazonense para o ensino de Física no novo ensino médio tem como objetivo central alinhar-se às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), ao mesmo tempo que considera as especificidades regionais do Amazonas. A proposta visa oferecer uma formação integral, interdisciplinar e contextualizada aos estudantes, permitindo que eles se tornem protagonistas do seu processo de aprendizado e preparados para os desafios contemporâneos.

A proposta enfatiza o desenvolvimento das competências e habilidades descritas na BNCC para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Estas incluem:

1. Análise de Fenômenos Naturais e Tecnológicos: Estudo das relações entre matéria e energia, com foco na proposição de ações que melhorem processos produtivos e minimizem impactos ambientais.
2. Interpretação da Dinâmica da Vida, Terra e Cosmos: Desenvolvimento de argumentos e previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, promovendo decisões éticas e responsáveis.
3. Resolução de Problemas e Aplicações Tecnológicas: Avaliação das aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, com a comunicação de descobertas em variados contextos. (Amazonas, 2018, p, 539).

Com a implementação do novo ensino médio, a proposta curricular do Amazonas segue junta aos parâmetros nacionais promovendo a flexibilização do currículo, permitindo que os estudantes escolham itinerários formativos de acordo com seus interesses e vocações.

A Física, dentro desse contexto, pode ser abordada de maneira mais aprofundada para aqueles que escolhem um itinerário voltado para as Ciências da Natureza e suas Tecnologias.

É fundamental trabalhar o componente curricular de Física de modo a criar um ambiente de aprendizagem efetivo, que forneça aos alunos as ferramentas necessárias para o pleno desenvolvimento de suas habilidades e competências. Isso os capacita a aplicar os conhecimentos de Física de forma consciente e racional nos diferentes contextos de sua prática cotidiana. Nesse sentido, seguindo os critérios do RCA, a nova Proposta Curricular e Pedagógica do Ensino Médio (PCP-EM) foi organizada com o objetivo de oferecer "um currículo capaz de oportunizar não só as aprendizagens essenciais para o enfrentamento dos desafios contemporâneos, mas também contribuir para a formação de cidadãos" (Amazonas, 2021, p. 5).

A Proposta Curricular e Pedagógica do Novo Ensino Médio apresenta aos profissionais da educação, em seu texto introdutório, todas as particularidades sobre o currículo, contextualizando o ensino médio no Estado do Amazonas. Ela abrange desde a Formação Básica, as Áreas do Conhecimento e organizadores curriculares até os Itinerários Formativos, com seus eixos estruturantes e focos pedagógicos. Além disso, aborda as Modalidades e Especificidades do Ensino Médio, oferecendo orientações para a implementação do currículo, bem como concepções e diretrizes para a elaboração do Projeto Político Pedagógico de cada unidade de ensino (Amazonas, 2021, p. 6).

Assim, a PCP-EM vem conduzir e nortear os professores e seus estudantes aos novos e desafiadores caminhos que a educação amazonense precisa trilhar, além de contribuir significativamente para a consolidação, aprofundamento e garantia de um ensino de qualidade.

### **2.9.3 Trabalhos Relacionados à Temática Investigada**

O ensino da Relatividade Restrita no ensino médio enfrenta vários desafios, incluindo dificuldades na transposição didática para o ensino básico, obstáculos semióticos matemáticos e obstáculos epistemológicos, que estão interligados (Bachelard, 1996). Diante disso, daremos prioridade ao uso de produções que investigam o ensino de tópicos da

Relatividade Restrita e da Cosmologia para alunos do ensino médio, bem como outros conteúdos relacionados.

A dissertação de mestrado de Lima (2018), intitulada "Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa com o aplicativo TRE Einstein para ensinar a Relatividade Restrita", explora como a tecnologia pode transformar a dinâmica das aulas de Física, especialmente ao abordar a Relatividade Restrita, cujo formalismo teórico e matemático requer um alto grau de abstração. Lima desenvolveu uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para utilizar essa ferramenta para promover uma aprendizagem significativa. Ele organizou as etapas de ensino conforme aspectos sequenciais estabelecidos, diversificou os recursos didáticos e incorporou o uso do aplicativo TRE Einstein como uma estratégia de revisão do tema, com atividades de aprendizagem voltadas para a Relatividade Restrita.

Em relação ao uso da UEPS como metodologia facilitadora da aprendizagem significativa, a dissertação de mestrado de Oliveira Mendonça (2018) propõe a inclusão de tópicos de Cosmologia para alunos do ensino médio. Sua produção baseia-se na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel e na sugestão de Moreira (2011) sobre a diversificação de estratégias de ensino. Mendonça criou um texto autoral sobre cosmologia, usado como material de consulta durante a aplicação da UEPS, e utilizou Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) com vídeos para introduzir conteúdos cosmológicos e o software Stellarium para simular o objeto de estudo da cosmologia, o Universo.

As dissertações de Lima (2018) e Oliveira Mendonça (2018), assim como outras produções analisadas, tendem a abordar fenômenos relativísticos e cosmológicos de uma maneira mais qualitativa e conceitual. Isso pode ser atribuído, em parte, às dificuldades inerentes à abstração matemática necessária e à base algébrica que sustenta a Relatividade e a Cosmologia.

Contudo, Carageorge (2020), em sua dissertação de mestrado "Sequência didática para ensinar a Relatividade Geral no ensino médio", apresenta um contexto viável para a aplicação desse formalismo em turmas do ensino médio. Carageorge enfatiza o desafio de ensinar Relatividade Geral no ensino médio, especialmente porque os alunos geralmente não possuem conhecimento prévio da base matemática dessa teoria. Em sua sequência didática, ele utiliza a experimentação como um método viável e também introduz conceitos algébricos

sobre conteúdos não convencionais ao ensino médio, como tópicos de geometria não euclidiana, noções básicas da Relatividade Geral, métrica e fenômenos gravitacionais. Essa pesquisa foi aplicada em um minicurso com quatro aulas para alunos do ensino médio que desejam ingressar no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Uma questão levantada por Carageorge é a falta de conhecimento prévio dos alunos sobre o efeito Doppler, o que é preocupante, pois evidencia a dificuldade de interpretar corretamente o fenômeno tanto na visão clássica quanto na relativística. Portanto, é crucial abordar a diferenciação do fenômeno em diferentes tipos de ondas e sua aplicabilidade em áreas como medicina, trânsito e cosmologia. Uma proposta interessante é utilizar a História da Ciência como pano de fundo para discutir as interpretações e aplicações do fenômeno.

Neste contexto, Jardim e colaboradores (2014) e Neves e colaboradores (2020) discutem em seus artigos questões que podem surgir da interpretação simplista do fenômeno e da ciência. Jardim e colaboradores (2020) defendem que a História e Filosofia da Ciência nas aulas de Física é uma estratégia para contextualizar o fenômeno e mostrar a evolução do entendimento ao longo do tempo, evitando equívocos na compreensão. Essa abordagem fortalece a aquisição do conhecimento e contorna as dificuldades relacionadas aos obstáculos epistemológicos.

Ao abordar a complexidade do ensino da Relatividade Restrita e da Cosmologia, é relevante considerar as contribuições de Karl Popper e Thomas Kuhn sobre a natureza do conhecimento científico e a evolução das teorias científicas.

Popper (1959) argumenta que a ciência progride através do método de conjecturas e refutações. Ele enfatiza a importância de testar teorias de forma rigorosa e rejeitar aquelas que não resistem à falsificação. Essa perspectiva pode ser aplicada ao ensino de Física, incentivando os alunos a desenvolverem uma mentalidade crítica e a questionarem as teorias estabelecidas, procurando evidências que possam refutá-las.

Por outro lado, Kuhn (1962) introduz a ideia de paradigmas científicos e revoluções científicas. Ele sugere que o progresso científico não é linear, mas ocorre através de mudanças de paradigma, onde um paradigma dominante é substituído por outro após uma crise. No contexto educacional, essa visão pode ser utilizada para explicar a evolução das teorias científicas, como a transição da física clássica para a relatividade, ajudando os alunos a compreenderem a natureza dinâmica e evolutiva da ciência.

Incorporar essas considerações ao ensino de Física pode proporcionar aos alunos uma compreensão mais profunda da ciência, destacando tanto a necessidade de rigor e crítica (Popper) quanto a natureza revolucionária e evolutiva do conhecimento científico (Kuhn).

Por fim, o artigo de Horvath (2020) aborda os perigos de usar analogias didáticas para explicar fenômenos que extrapolam as ideias do senso comum, como a expansão do Universo devido ao efeito Doppler, ou afirmar que nada pode viajar mais rápido que a luz, sem considerar uma série de pontos fundamentais para a explicação física de cada caso.

### 3 A Cinemática Relativística

Paul Tipler, em seu conhecido livro "Física para Cientistas e Engenheiros" (2006), aborda a cinemática relativística como parte fundamental da Teoria da Relatividade Restrita. A cinemática relativística trata do movimento dos objetos em velocidades comparáveis à da luz e os efeitos que tais velocidades têm sobre o espaço e o tempo. Tipler apresenta os conceitos com ênfase nas transformações de Lorentz, dilatação do tempo, contração do comprimento e a relação entre energia e momento relativísticos.

As transformações de Lorentz são equações fundamentais que relacionam as coordenadas de espaço e tempo entre dois referenciais inerciais, e que se movem a uma velocidade constante um em relação ao outro. Tipler (2006) detalha estas transformações para demonstrar como tempo e espaço são relativos ao observador, resultando, por exemplo, em

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0, \quad (1)$$

sendo  $\Delta t$  o intervalo de tempo medido pelo observador em movimento,  $\Delta t_0$  é o tempo próprio (tempo medido pelo observador em repouso) e  $\gamma$  é o fator de Lorentz, definido por  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ , onde  $\beta = v/c$ ,  $v$  é a velocidade do referencial e  $c$  a velocidade da luz.

Tipler (2006) explica a dilatação do tempo usando o famoso experimento mental do relógio de luz. Ele mostra que para um observador em movimento, um evento que ocorre em um local específico parece durar mais tempo comparado a um observador em repouso. Por outro lado, o comprimento linear de uma barra ( $L_0$ ) fica contraído por um fator  $\gamma$

$$L = \frac{L_0}{\gamma}, \quad (2)$$

onde  $L$  é o comprimento medido pelo observador em movimento e  $L_0$  é o comprimento próprio.

Estes conceitos são usados por Tipler e aplicados a vários fenômenos, como o paradoxo dos gêmeos, onde um gêmeo que viaja em uma nave espacial envelhece mais lentamente do que o que fica na Terra devido à dilatação do tempo. A correção dos sinais de GPS, que considera a dilatação do tempo para garantir precisão nas localizações.

A cinemática relativística segundo Paul Tipler (2006) é uma reformulação essencial da física newtoniana para acomodar os efeitos relativísticos dos fenômenos em altas velocidades. Com uma abordagem rigorosa e detalhada, Tipler fornece as ferramentas matemáticas e conceituais necessárias para entender como o tempo e o espaço são interdependentes e variáveis com o movimento. Sua explicação detalhada das transformações de Lorentz, dilatação do tempo, contração do comprimento e adição de velocidades relativísticas fornece uma base sólida para estudar e aplicar a relatividade especial em diversos contextos científicos e tecnológicos.

### **3.1 O desenvolvimento da Mecânica Relativística**

Alguns experimentos, como os de Fizeau e Michelson-Morley, além da hipótese de Fresnel e a insistência na existência do éter, refletem as características predominantes na ciência da época e fornecem o contexto em que a teoria da relatividade foi formulada.

Os trabalhos de grandes cientistas como Poincaré e Lorentz são considerados para ilustrar que a teoria da relatividade não foi descoberta isoladamente por Einstein. Embora o trabalho de Einstein tenha grande mérito e seja um resultado de sua brilhante capacidade e dedicação como físico teórico, ele também se baseou nas contribuições de cientistas anteriores e contemporâneos, bem como nas questões conflitantes que permeavam a comunidade científica da época.

#### **3.1.1 Hipótese de Fresnel**

No século XIX, a construção da óptica ondulatória tinha como alicerce a presença de um éter luminoso. Muitas experiências foram realizadas na tentativas de interpretá-las, assim como diversas hipóteses acerca do éter foram propostas. Tais teorias apresentavam propostas distintas sobre o comportamento desse fluido em relação aos corpos materiais, sendo as teorias mais influentes foram as desenvolvidas por George Gabriel Stokes, Thomas Young e Augustin Jean Fresnel.

Bradley, no período de 1725 a 1726, com o objetivo de mensurar o fenômeno da paralaxe astronômica das estrelas fixas, registrou uma alteração na posição de uma estrela. A paralaxe é um fenômeno resultante do movimento anual da Terra.

Observando a figura (3.1), uma estrela<sup>1</sup>  $E$  é observada sob um ângulo  $Z_1$ , enquanto a Terra está na posição  $P_1$  de sua órbita. Então, seis meses depois, a mesma estrela é observada sob

um ângulo  $Z_2$  e a Terra está na posição  $P_2$ . A diferença na medida desses ângulos, ou seja, na medida da posição da estrela em função da posição da terra, é chamada de paralaxe. Porém a variação encontrada na observação feita por Bradley era num plano perpendicular ao plano que a teoria previa para paralaxe. Este fenômeno ficou conhecido como Aberração das estrelas fixas, e estava relacionado com o movimento de translação da Terra. No caso da aberração, como apresentado na figura (3.2), o ângulo de aberração é o formado entre  $EP_1$  e  $E_1P_1$ .<sup>1</sup>

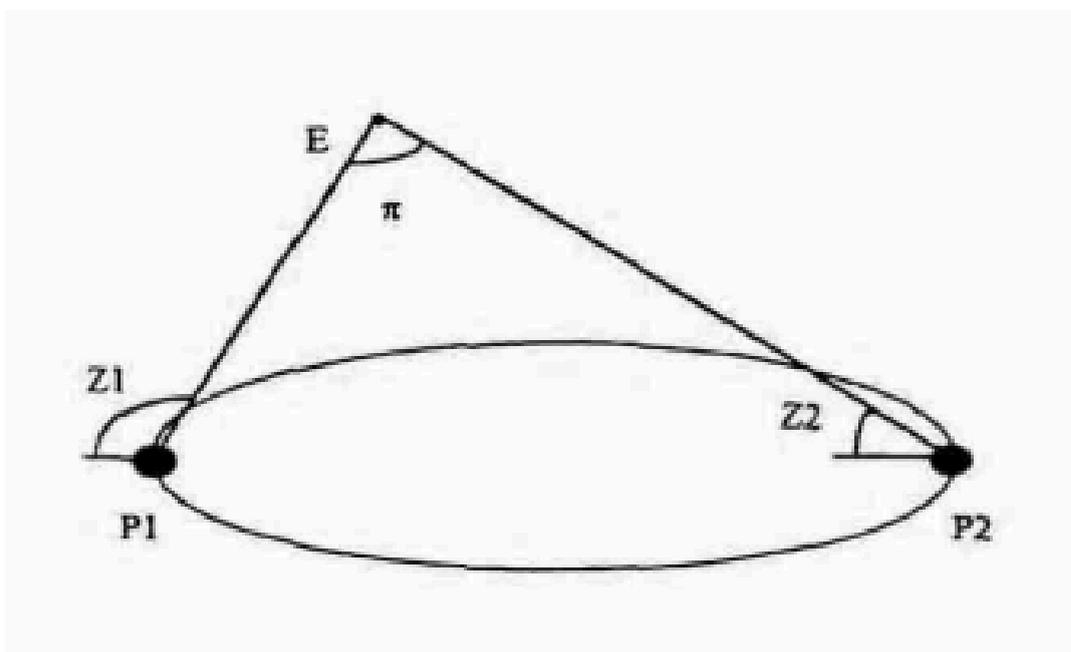


Figura 3.1 — Estrela E observada da Terra sob dois ângulos diferentes ( $Z_1$  e  $Z_2$ ), enquanto a Terra se encontra, respectivamente, nas posições  $P_1$  e  $P_2$  defasada em seis meses.(PIETROCOLA, Mauricio. Ago/1993. p.159)

Fonte: Monografia apresentada no Curso de Especialização em Ensino de Física da UFSC, Cavalcanti, Welchy Leite (2001)

<sup>1</sup> Estrela gama da constelação de Dragão

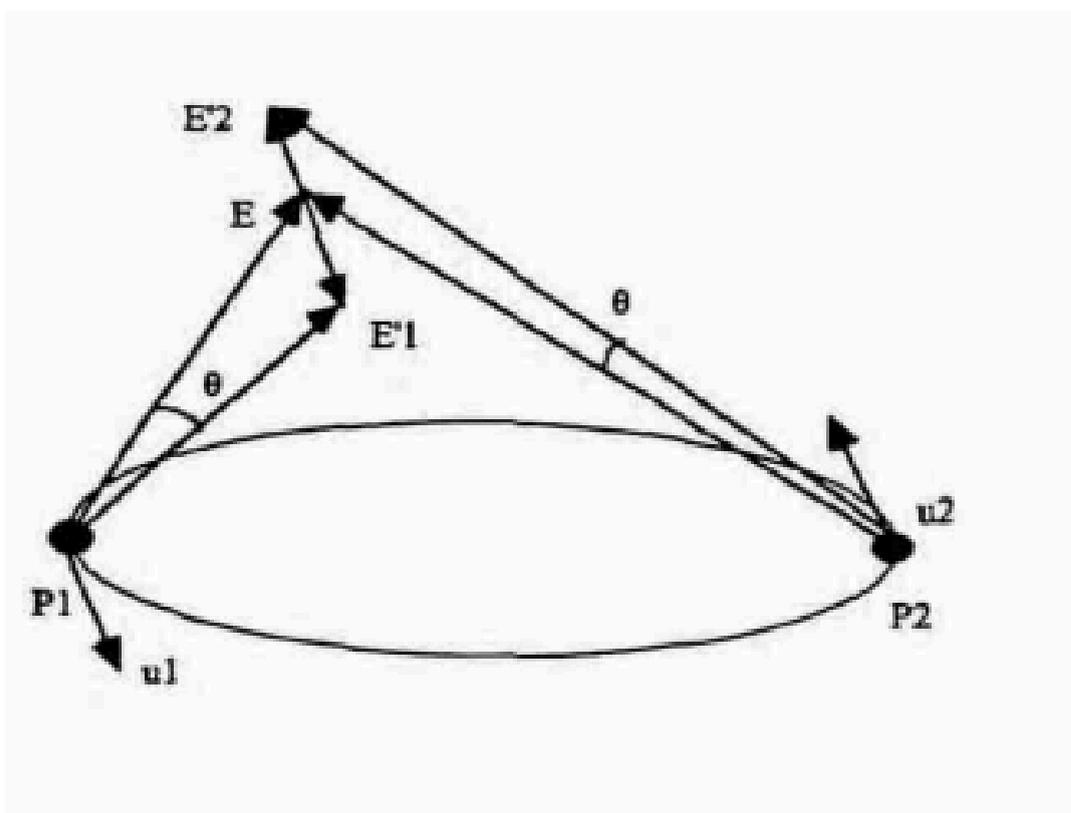


Figura 3.2 — A estrela  $E$  é observada a partir da Terra. Nas posições  $P_1$  e  $P_2$ ,  $\mu_1$  e  $\mu_2$  representam, respectivamente, as direções do deslocamento terrestre. A posição  $E'_1$  é obtida a partir da composição da direção de propagação da luz emitida pela estrela na direção  $EP$ , e a velocidade  $u$  de translação da Terra. (PIETROCOLA, Mauricio. Ago/1993, p.160)

Fonte: Monografia apresentada no Curso de Especialização em Ensino de Física da UFSC, Cavalcanti, Welch Leite

Naquela época, a teoria mais aceita e usada era a Teoria (corpúscular) de Newton da Luz. Dessa forma, quando abordou a aberração, Bradley ao considerar que a luz era composta por diminutos corpúsculos de matéria, aplicou as leis da mecânica newtoniana. A explicação para a aberração foi baseada na trajetória de um corpo e sua variação em relação ao movimento relativo ao observador. Realizou uma composição do movimento entre a direção de propagação da luz emitida pela estrela e a velocidade de translação da Terra. Dessa maneira, o fenômeno da aberração indicou que a propagação luminosa poderia ser influenciada pelo movimento dos corpos materiais, variando de observador para observador, conforme seu movimento relativo. Dentro da perspectiva corpúscular da luz, a aberração não

seria um fenômeno incomum, pois representaria uma possível consequência dentro da mecânica newtoniana.

No início do século XIX, com o "renascimento" da óptica ondulatória, surgiram explicações para a aberração sob a perspectiva ondulatória. Em 1804, Young apresentou uma explicação para a aberração, baseando-se na teoria da luz conforme a concepção de Huygens. Ele considerou o éter como um meio que preenchia o espaço, sendo um fluido material infinito, homogêneo e isotrópico que permeava todos os corpos. No entanto, Young teve que incluir a proposição de que o éter era totalmente imóvel no espaço e não influenciado devido ao movimento da Terra. Young acreditava que o éter penetrava um corpo material com praticamente nenhuma resistência, tão livremente quanto o vento passando através das árvores. Com essa premissa, torna-se viável considerar que o éter não é perturbado pelo movimento da Terra, o que descarta a possibilidade de uma composição entre a velocidade de translação da Terra em sua órbita e a velocidade de propagação da luz.

A observação sistemática do fenômeno da aberração revelou um ângulo de aberração idêntico para diferentes estrelas, sugerindo, assim, a constância da velocidade da luz. Isso representava uma incompatibilidade com a teoria corpuscular, uma vez que, nesse cenário, a velocidade de propagação dos corpúsculos da luz no espaço dependeria das dimensões dos corpos emissores. Biot e Arago conduziram experimentos, verificando a constância do ângulo de aberração para diversas estrelas. Em 1810, Arago realizou uma nova série de experimentos, explorando a possibilidade de combinar o movimento da Terra com a propagação da luz, na esperança de observar desigualdades nas medidas dos desvios da luz. Mais uma vez, os resultados obtidos foram em vão, reforçando a sugestão de que a velocidade da luz era constante.

A teoria de Young, proposta em 1804, que considerava o éter como totalmente transparente e imóvel, não oferecia uma explicação adequada para os resultados dos experimentos realizados por Arago em 1810. Por outro lado, a hipótese de um éter completamente arrastado pelo movimento terrestre poderia explicar satisfatoriamente esse resultado, mas, ao mesmo tempo, não conseguia dar conta da explicação para a aberração.

Arago escreve a Fresnel em busca de uma possível reconciliação entre os resultados da aberração e seus experimentos de 1810 com a concepção ondulatória da luz. Em 1818, surge uma proposta para solucionar tal conflito. Mesmo sem ter conhecimento da hipótese de Young, Fresnel propõe um éter imóvel no espaço, contudo, com uma pequena

parte dele sendo arrastada pelos corpos transparentes em movimento junto com a Terra. Apesar da semelhança com a proposta de Young, o fato de o éter sofrer essa pequena influência do movimento terrestre explica tanto a refração (resultados do experimento de Arago em 1810) quanto a aberração. Essa hipótese ficou conhecida como o arrastamento parcial do éter luminoso. A expressão encontrada por Fresnel para a propagação de uma onda luminosa no interior do éter é dada por

$$v_p = c \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v, \quad (3)$$

sendo  $n$  o índice de refração do corpo que se move com velocidade  $v$  em relação ao éter. O termo  $v_f = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$  designa a variação da velocidade de propagação das ondas luminosas dentro de um meio transparente em movimento, e é conhecido como o coeficiente de Fresnel.

A teoria de Fresnel enfrentou várias críticas, inclusive por parte do próprio Fresnel, pois em diversos momentos reconheceu que o arrastamento parcial do éter não podia ser completamente integrado às bases mecânicas da concepção ondulatória da luz. Uma das falhas identificadas era a dependência da quantidade de éter arrastado pelo comprimento da luz incidente, evidenciando uma lacuna na fundamentação mecânica que sustentava a teoria. Apesar dessas limitações, ao longo do século, diversas experiências validaram a fórmula de Fresnel como uma ferramenta matemática para interpretar fenômenos ópticos, embora sem necessariamente considerar seu significado físico. No final do século XIX, a hipótese de Fresnel foi incorporada pela teoria eletromagnética, tornando-se uma fórmula capaz de explicar resultados experimentais na primeira ordem de aproximação de  $v/c$ .

Uma outra hipótese surge em 1848 quando Stokes, conjecturou que o éter estava, de certa forma, "colado" à matéria, compartilhando seu movimento. Ele propôs que o éter próximo à superfície terrestre seria totalmente arrastado, enquanto o éter mais distante permaneceria imóvel, criando assim uma região de transição entre o éter em movimento e o estacionário. O éter seria considerado rígido em relação à luz, mas não ofereceria resistência aos planetas em seus movimentos. Com essa hipótese<sup>2</sup>, tornava-se possível explicar a

---

<sup>2</sup> A hipótese de Stokes implica em algumas condições dinâmicas entre o arrastamento do éter, e mais tarde (1887) Lorentz demonstra a incompatibilidade dessas condições.

experiência de 1810, e, sob determinadas condições de contorno para a mencionada região de transição, também seria capaz de explicar a aberração das estrelas fixas.

Diante de diversas conjecturas, em 1851, Fizeau conduz um experimento na busca por uma hipótese "correta". Ele mensura o coeficiente de arrastamento de Fresnel pela matéria ao investigar a influência do movimento de uma corrente de água na propagação da luz. Essa corrente interfere e gera padrões de difração distintos conforme a direção do fluxo de água. Os resultados obtidos corroboram com a teoria de Fresnel, Eq. (3), fortalecendo a validação da existência de um éter parcialmente arrastado.

### 3.2 Experimento de Michelson-Morley

Em 1881, Albert Michelson embarca na tentativa de calcular a velocidade ( $v$ ) com que a Terra se desloca através do éter, empregando um dispositivo conhecido como interferômetro (ver Figura 3.3). Em 1887, em colaboração com Edward Morley, eles realizam novas tentativas, utilizando o mesmo dispositivo, mas com algumas modificações que o tornam ainda mais sensível.

O princípio subjacente ao funcionamento do dispositivo é o seguinte: a partir de um ponto de uma fonte extensa S, a luz incide sobre um espelho semi prateado M, cujo revestimento de prata tem espessura suficiente para transmitir metade da luz incidente e refletir a outra metade. Dessa forma, a luz incidente em M divide-se em duas ondas - uma transmitida ao espelho  $M_1$  e a outra parte refletida alcança o espelho  $M_2$ . Cada um desses espelhos,  $M_1$  e  $M_2$ , reflete a luz incidente ao longo de suas direções, chegando ao olho do observador (luneta na Figura 3.3). O objetivo era medir o tempo de chegada dos feixes ao observador (luneta). A suposição era que, acreditando na existência de um éter, haveria o movimento da Terra em relação a ele, gerando um "vento de éter"; como resultado, o tempo de chegada dos feixes seria diferente. Use o QR code ou o link<sup>3</sup> para visualizar uma simulação do interferômetro.



---

<sup>3</sup> link para simulação do interferômetro: <https://www.youtube.com/watch?v=6aHF0etDT18>

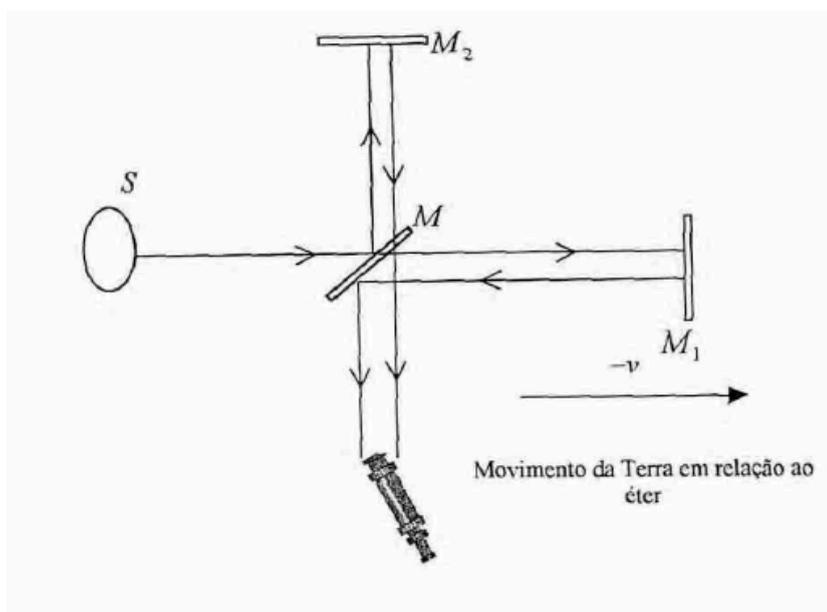


Figura 3.3 - Diagrama simplificado do funcionamento do interferômetro de Michelson.

Fonte: <https://repositorio.ucb.br/>

Considerando a ausência de arrastamento no movimento do éter em relação à Terra, conforme preconizado por Fresnel, o interferômetro foi exposto a esse "vento de éter". Ao alinhar a direção de incidência ao espelho  $M_1$  com a direção da velocidade da Terra, Michelson, em 1881, não detectou nenhuma diferença nos tempos de chegada dos feixes. Em 1887, durante a experiência realizada com Morley, Michelson alcançou o mesmo resultado obtido em 1881: nenhum "vento de éter" foi detectado. Esse novo resultado experimental reforça significativamente a constância da velocidade da luz.

### 3.2.1 Poincaré, Lorentz e os conflitos na Física

No ano de 1902, em seu livro "A Ciência e a Hipótese", Poincaré explora a tendência da ciência em direção à unidade e simplicidade. Ele destaca que descobertas, mesmo que inicialmente estranhas entre si, têm a propensão de se organizar numa síntese. Novos fenômenos, revelados pela observação direta, muitas vezes aguardam para encontrar seu lugar nessa síntese, podendo exigir, por vezes, a reestruturação de parte do "edifício" formado pelos fatos e conceitos já consolidados. Contrariamente, observa-se indícios de mudanças e complexidades nos conceitos e teorias anteriormente solidificados, especialmente em relação ao espaço, tempo e éter, sugerindo que a ciência estava se encaminhando para uma direção marcada pela variedade e complexidade.

Poincaré era um cientista de caráter convencionalista, percebe-se isto quando ele cita:

"Pouco nos importa que o éter exista realmente: é um problema para os metafísicos. O importante para nós é que tudo se passa como se ele existisse, e essa é uma hipótese cômoda para a explicação dos fenômenos. Afinal, temos outras razões para crer na existência dos objetos materiais? Essa também é uma hipótese cômoda e que nunca deixará de o ser, ao passo que um dia virá certamente em que o éter será rejeitado, por inútil." (Poincaré, Henri. 1988, p.157).

Poincaré dedicou sua atenção às questões relacionadas à teoria do elétron e às hipóteses de contração do espaço propostas por Lorentz, considerando também as observações já realizadas para baixas velocidades, as quais indicavam a constância da massa.

"O atributo essencial da matéria é sua massa, sua inércia. A massa é o que, sempre e por toda parte, permanece constante, o que subsiste quando uma transformação química alterou todas as qualidades sensíveis da matéria e parece ter produzido um outro corpo. Portanto, se chegasse a demonstrar que a massa e a inércia da matéria não lhe pertencem, na realidade, que é um luxo de empréstimo com que ela se engalana, que essa massa, a constante por excelência, é, ela própria, suscetível de alteração, poderíamos dizer que a matéria não existe. Ora, é precisamente isso que se anuncia." (Poincaré, Henri. 1988, p.177).

O instinto dos físicos na época ainda os levava a acreditar na possibilidade de determinar o movimento absoluto da Terra. No entanto, diante dos insucessos nesse sentido, Lorentz reconhece a impossibilidade desse movimento absoluto e o adota como postulado, explicando conseqüentemente:

" ... todo átomo material seria formado por elétrons positivos, pequenos e pesados, e por elétrons negativos, grandes e leves, e, se a matéria sensível não nos parece eletrizada, é porque os dois tipos de elétrons são aproximadamente em número igual. Nesse sistema, não existe verdadeira matéria, somente buracos no éter". (Lorentz apud Poincaré, Henri. 1988, p.180).

Na afirmação de Lorentz encontra-se a necessidade, que não foi somente dele, mas da comunidade científica da época de conservar a teoria, em manter a "existência" do éter. Lorentz fez uma significativa contribuição à física ao interpretar as equações de Maxwell em termos de cargas e correntes transportadas por partículas fundamentais. Ele denominou essas partículas como "partículas carregadas" em 1892, "íons" em 1895 e, finalmente, atribuiu o nome crucial à teoria, chamando-as de "elétrons". Em 1892, Lorentz publicou seu primeiro artigo sobre a teoria eletromagnética atomística. Nessa época, a experiência de Michelson-Morley já havia sido realizada, e Lorentz demonstrava preocupação em relação a isso.

"Esta experiência me intriga há muito tempo; por fim, só consegui pensar numa maneira de reconciliá-la com a teoria de Fresnel, que consiste na suposição de que a linha que une dois pontos de um corpo sólido, se inicialmente é paralela à direção do movimento da terra, não conserva o mesmo comprimento quando é subsequentemente rodada de 90°" (Lorentz apud Pais, Abraham. 1995, p.140).

De acordo com as hipóteses de Lorentz, se o comprimento nesta última posição for  $L_0$ , então, a manutenção da hipótese de Fresnel ocorre se o comprimento na posição inicial for expresso por

$$L = L_0 \left( 1 - \frac{v^2}{2c^2} \right). \quad (4)$$

A equação é reconhecida como a contração de Lorentz-FitzGerald na segunda ordem de aproximação em  $v/c$ . Conforme essa hipótese da contração, a ausência de movimento nas franjas na experiência de Michelson-Morley seria resultado de uma compensação entre o efeito da velocidade da Terra e a variação do comprimento do braço do interferômetro na mesma direção. Essa explicação demanda a existência do éter, uma vez que Lorentz havia pressuposto que as forças eletromagnéticas e as forças moleculares atuam por meio de uma intervenção do éter.

A citação de Lorentz sobre a conciliação entre a experiência e a teoria de Fresnel demonstra uma preocupação em conciliar a experiência, os resultados com os modelos já

consolidados. Quem na verdade primeiro propõe a hipótese da contração foi FitzGerald em 1889<sup>4</sup>:

"Li com muito interesse a experiência maravilhosamente delicada dos Srs. Michelson e Morley para tentar decidir a importante questão de como o éter é arrastado pela Terra. O resultado parece ser oposto ao de outras experiências, mostrando que o éter só pode ser arrastado no ar numa extensão desprezível. Eu sugeriria que o comprimento dos corpos materiais se modifica (na direção de seu movimento no éter ) de uma quantidade que depende do quadrado da razão entre as suas velocidades e a da luz. Sabemos que as forças elétricas são afetadas pelo movimento dos corpos eletrificados em relação ao éter, e parece ser uma suposição não improvável que as forças moleculares sejam afetadas pelo movimento e que, em consequência, o tamanho do corpo se altere. Seria muito importante que algumas experiências seculares sobre atrações elétricas entre corpos permanentemente eletrificados, como num eletrômetro de quadrante muito delicado, pudessem ser realizadas em zonas equatoriais, para se observar se existe alguma variação diária ou anual da atração - diária, por causa do fato de a rotação da Terra ser adicionada ou subtraída et respectiva velocidade orbital, e anual, de forma similar, para a sua velocidade orbital e o movimento do sistema solar." (FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995. p.139).

Observa-se que FitzGerald já havia proposto esta hipótese da contração e tinha crença na existência do éter. Os resultados subsequentemente alcançados por Lorentz corroboram essa ideia, e tanto Lorentz quanto FitzGerald endossam a intervenção dinâmica do éter. No entanto, em 1892, quando Lorentz formulou suas ideias, ele não tinha conhecimento do artigo de FitzGerald. Foi somente em 1894 que Lorentz tomou ciência da hipótese de contração de FitzGerald por meio de um artigo de Lodge datado de 1893. Lorentz, ao entrar em contato com FitzGerald, comunicou ter chegado independentemente ao mesmo resultado e indagou onde FitzGerald havia publicado suas ideias para citá-las. FitzGerald respondeu a Lorentz alguns dias depois, mencionando que havia enviado seu artigo à revista Science, mas não sabia se havia sido publicado. Ele também afirmou estar certo de que a publicação do

---

<sup>4</sup> Em seu artigo, publicado pela revista americana Science, com título: "O éter e a atmosfera terrestre". (FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995,p.139).

artigo de Lorentz precedia qualquer publicação impressa sua. FitzGerald expressou grande satisfação com os resultados de Lorentz e por saber que este concordava com seus resultados.

Em um ensaio datado de 1895, inicia-se a trajetória de Lorentz em direção às suas transformações, sua outra grande contribuição que estabelece uma relação entre um conjunto de sistemas de coordenadas de espaço-tempo (O) e outro (x, y, z, t), que se move em relação ao primeiro com velocidade constante v. Nesse artigo de 1895, Lorentz apresenta o teorema dos estados correspondentes. Nele, um sistema em repouso em relação ao éter em um sistema de coordenadas (x, y, z, t) tem seus campos elétrico e magnético, bem como o deslocamento elétrico (E, H, D), expressos como funções de (x, y, z, t). Considerando outro sistema em movimento em relação ao primeiro com velocidade v, Lorentz demonstra a existência de um estado correspondente no segundo sistema, na primeira ordem em v/c, onde seus campos elétrico, magnético e deslocamento elétrico (E', H', D') são as mesmas funções de (x', y', z', t'). desta maneira, Lorentz propõem

$$\begin{aligned}\vec{r} &= \vec{r} - \vec{v}t \\ t' &= t - \frac{\vec{v} \cdot \vec{r}}{c^2} \\ \vec{E}' &= \vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{H}}{c} \\ \vec{H}' &= \vec{H} - \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\end{aligned}\tag{5}$$

Lorentz designou por  $t$  tempo geral e  $t'$  tempo local. Em sua concepção, existia um único tempo verdadeiro, representado por  $t$ . Interpretar de forma realista o tempo  $t'$  para Lorentz é desafiador, pois, para ele, esse tempo desempenha apenas uma função auxiliar no sistema de referência em movimento, sendo uma variável "fictícia".

Em seu artigo de 1895, introduz um postulado da força que uma partícula com carga  $e$  e velocidade  $\vec{v}$  está submetida a um campo eletromagnético  $(\vec{E}, \vec{H})$ ,  $\vec{F} = e\left(\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{H}}{c}\right)$  que é conhecida como força de Lorentz. Em 1904, Lorentz elabora suas transformações definitivas [Em 1899 Lorentz escreve as equações de transformação na forma:  $x' = \epsilon\gamma(x - vt)$ ,  $y' = \epsilon\gamma y$ ,  $z' = \epsilon\gamma z$ , e  $t' = \epsilon\gamma\left(t - vx/c^2\right)$ , onde  $\epsilon$  é um fator de escala que ele afirmara ter que ser bem definido, que só seria determinado "por um conhecimento mais profundo dos

*fenômenos". (Lorentz apud Pais, Abraham. 1993, p.143).], estabelecendo o valor de  $\epsilon$  como um. Além disso, apresenta uma proposta sobre a forma e a estrutura do elétron, fundamentada na ideia central de contração das distâncias e dilatação do tempo.*

A teoria de Lorentz reflete um período de crise com esforços para manter um paradigma baseado no mecanicismo, enquanto um novo paradigma emerge. Esse período levou a física a abandonar uma visão em que os constituintes eram massas inerciais, discretas ou contínuas, movendo-se de acordo com as leis da mecânica, influenciados por forças de contato ou à distância. Em contrapartida, a teoria de Lorentz apresenta uma perspectiva eletromagnética na qual as realidades físicas são o éter eletromagnético e as cargas elétricas. Nessa visão, as leis da natureza são reduzidas às leis do campo eletromagnético, a partir das quais se busca estabelecer as propriedades do éter e sua interação com as cargas.

Em 1900, Poincaré nos seus trabalhos têm muitas questões sobre o éter. No discurso inaugural do Congresso de Paris de 1900 ele já pergunta: "Existe realmente o éter ? "(Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.145). Mas percebe-se bem a necessidade que tinha, então, o éter de ser um suporte material:

"Sabemos bem de onde nos vem a crença no éter. Se a luz leva vários anos para chegar de uma estrela distante até nós, durante esse período de tempo ela não mais estará na estrela e não estará, ainda, na Terra. Mas terá que estar em algum lugar e sustentada, por assim dizer, por algum suporte material. "(Poincaré, Henri. 1988, p.132).

A necessidade do éter como um meio de suporte é igualmente uma característica de Lorentz. Para ele, o éter representa um substrato essencial para a propagação do campo, servindo como suporte para o deslocamento das ondas eletromagnéticas.

No contexto do movimento absoluto, Poincaré postula o "princípio da relatividade" como uma lei geral da natureza. Ele considera a impossibilidade experimental de detectar o movimento absoluto da Terra como uma lei universal da natureza e a aceita sem restrições. Nesse sentido, a hipótese de contração de Lorentz-FitzGerald, utilizada para explicar essa impossibilidade experimental, perde seu significado, uma vez que Poincaré postula o "princípio da relatividade". Quanto às transformações, Poincaré as deduz a partir do Princípio da Mínima Ação, refletindo uma abordagem mecanicista. Com Poincaré, o tempo local é tratado como um conceito físico.

"Considere dois observadores em movimento relativo uniforme que desejam acertar seus relógios por meio de sinais luminosos. Relógios acertados deste modo não apresentarão o tempo verdadeiro, mas, em vez disso, mostrarão aquilo que podemos chamar tempo local. Todos os fenômenos vistos por um observador estão atrasados em relação ao outro, porém atrasados de igual modo, e, como exigido pelo princípio da relatividade, o observador não pode saber se está em repouso ou em movimento absoluto." (Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.146).

Na citação, Poincaré parecia estar alinhado com a teoria da relatividade, exceto por sua observação de que o raciocínio mencionado não era suficiente, sendo necessárias hipóteses adicionais. Outra perspectiva significativa de Poincaré relaciona-se com a constância da velocidade da luz. Em 1904, ele declara: "Os experimentos parecem teimar em sugerir a impossibilidade de detectar o movimento absoluto" (Poincaré, Henri apud Villani, A., mai/1981, p.35).

Em seguida, propõe a elaboração de uma nova mecânica, onde a velocidade da luz é estabelecida como um limite intransponível. No entanto, não ocorre uma ruptura imediata com o mecanicismo. Percebem-se características de um Poincaré que resistia à modificação do paradigma, embora estivesse preocupado com as perturbações, os "atentados" ao paradigma existente. Mais uma vez, ele demonstra sua inquietação com a instabilidade das teorias ao acrescentar:

"Apresso-me a dizer que ainda não chegamos lá, e que nada ainda prova que os velhos princípios não vão emergir vitoriosos e intactos dessa batalha." (Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.146).

### 3.3 Os Postulados da Teoria da Relatividade Restrita

Com base na percepção de que a Física não estava em condições de proporcionar um modelo suficientemente abrangente para explicar resultados importantes, Einstein, em 1905, formula os postulados da relatividade restrita. Isso resulta na rejeição do conceito de movimento absoluto e na obsolescência do éter, que deixa de ser um referencial absoluto para o eletromagnetismo e não desempenha mais o papel de suporte para a radiação. O modelo anterior, que preferia um sistema de coordenadas em repouso absoluto na mecânica newtoniana, é abandonado em favor de um conjunto infinito de referenciais inerciais. O novo modelo é completamente fundamentado nos dois postulados<sup>5</sup> (Einstein, A. apud Bassalo, J.M.F., 1987):

1) Princípio da Relatividade: As leis pelas quais os sistemas físicos experimentam mudanças não são afetadas, se essas mudanças de estado são referidas a um ou outro de dois sistemas de coordenadas em movimento de translação uniforme.

2) Constância da velocidade da luz: Qualquer raio de luz move-se em um sistema 'estacionário' de coordenadas com a velocidade determinada  $c$ , quer seja o raio emitido por um corpo estacionário ou em movimento.

A impossibilidade de detectar o movimento absoluto é fundamentada no princípio da relatividade, que declara que esse movimento carece de significado físico. Uma consequência necessária desse princípio é o abandono do éter, uma vez que as ondas eletromagnéticas não dependem dele como suporte para sua propagação. Se o éter fosse essencial, ele se tornaria um referencial privilegiado. Outro aspecto crucial reside no valor constante da velocidade da luz, independentemente do estado de movimento da fonte emissora.

Através desses postulados, Einstein determina as transformações lineares, que são essencialmente as transformações de Lorentz. Em seguida, ele investiga os efeitos dessas transformações, identificando tanto a contração de Lorentz-FitzGerald quanto a dilatação do tempo. No entanto, não se pode afirmar, como esperaria Popper, que a teoria da relatividade einsteiniana seja meramente uma continuação de teorias anteriores propostas por Lorentz, FitzGerald ou Poincaré. Para Lorentz e FitzGerald, a contração seria um efeito real e dinâmico, relacionado às forças moleculares que variariam para um corpo em movimento

---

<sup>5</sup> Einstein em seu artigo de junho/1905. Einstein apud Bassalo, 1987.

uniforme em comparação ao mesmo corpo em repouso. Em contraste, na teoria da relatividade restrita, a contração é uma consequência direta dos dois postulados e está relacionada ao espaço e não à matéria.

Assim como Poincaré, que não aceita a identidade física entre os dois sistemas de referência nas transformações de Lorentz, mantendo a existência de um sistema em repouso, a teoria da relatividade restrita apresenta discontinuidades em relação a Poincaré. Além disso, Poincaré não questiona o éter nem o tempo absoluto da mecânica newtoniana, os quais perdem significado na mecânica relativística. Esses fatores, juntamente com as divergências nas interpretações de Einstein e Lorentz sobre a natureza do tempo nas transformações de Lorentz, destacam a singularidade da teoria de Einstein e os conceitos distintos derivados da teoria da relatividade.

O término do éter e a invariabilidade da velocidade da luz são resultados decorrentes dos postulados, representando uma ruptura significativa com os conceitos previamente propostos por Lorentz, Poincaré e outros que buscaram teorias e modelos para harmonizar as teorias existentes com os resultados experimentais.

### **3.3.1 A experiência de Michelson-Morley e o pensamento de Einstein**

Um aspecto amplamente debatido na teoria de Einstein é se ele estava ou não ciente do experimento de Michelson-Morley antes de publicar seu artigo de 1905 sobre a relatividade, no qual Einstein não fez nenhuma referência ao referido experimento.

Em uma correspondência enviada a um historiador um ano antes de seu falecimento, Einstein abordou pela última vez o tema relacionado à influência que recebeu da experiência de Michelson-Morley:

"O resultado de Michelson-Morley não teve influência considerável no meu desenvolvimento. Não me lembro nem mesmo se tinha conhecimento dele quando escrevi o primeiro artigo sobre o tema (1905). A explicação deve-se a que, por razões gerais, eu estava firmemente convencido da não existência do movimento absoluto; meu problema residia em como conciliar isso com nosso conhecimento da eletrodinâmica. Talvez assim seja possível entender por que razão, na minha luta pessoal, não desempenhou qualquer papel decisivo, a experiência de Michelson."(Einstein, A. apud Pais, A., 1995, p.200).

Grandes cientistas, como Millikan, apontaram para uma ligação direta entre o princípio da relatividade e o experimento de Michelson-Morley:

"A Teoria da Relatividade Especial pode ser considerada... essencialmente uma generalização a partir do experimento de Michelson... Descartando todas as concepções a priori sobre a natureza da realidade... Einstein tomou como ponto de partida fatos experimentais cuidadosamente testados, independentemente deles parecerem razoáveis ou não... Mas este experimento (M-M), depois de ter sido realizado com extraordinária habilidade e refinamento pelos seus autores, deu a resposta definitiva, que não existe nenhuma velocidade observável da Terra em relação ao éter. Este incrível e aparentemente inexplicável fato experimental perturbou violentamente a Física do século XIX e por quase vinte anos os físicos se esforçaram para torná-lo razoável. Mas Einstein nos chamou atenção: vamos aceitá-lo como um fato experimental estabelecido e tirar as suas inevitáveis consequências... Assim nasceu a teoria da Relatividade Especial" (Millikan, R. A. apud Villani, A., mai/1981, p.36).

Outra opinião afim é refletida a partir do seguinte comentário de Von Laue:

"O resultado negativo do experimento de M. M, forçou a teoria de Lorentz do éter estacionário a fazer uma nova hipótese, que conduziu à teoria da Relatividade. Dessa forma o experimento se tornou, por assim dizer, o experimento fundamental da T.R., porque é partindo dele que se atinge quase imediatamente a derivação das transformações de Lorentz, que contém o princípio da relatividade" (M. Von Laue, R. A. apud Villani, A., mai/1981, p.36).

De acordo com Einstein, os resultados experimentais que mais influenciaram seu pensamento foram as observações da aberração estelar e as medidas de Fizeau sobre a velocidade da luz na água em movimento. Quanto ao experimento de Michelson-Morley, ele afirmou que só chamou sua atenção após 1905.

Sommerfeld alegou, em um livro publicado em 1923<sup>6</sup>, que Einstein, em 1905, não estava familiarizado com o trabalho de Lorentz de 1904 sobre suas transformações. No entanto, durante sua visita ao Brasil em 1925, Einstein afirmou ao professor Azevedo Amaral, docente de Cálculo e Geometria Analítica na Escola Nacional de Engenharia, que...

"O princípio da Relatividade restrita não foi lido nas equações de Lorentz, como afirmara Bergson; mas como resultado de longas meditações sobre a experiência de Michelson"(Einstein, A apud Bassalo, J M F, 1987).

Quando questionado por Azevedo Amaral sobre o que o levou à teoria da relatividade, Einstein explicou que havia realizado duas meditações fundamentais. A primeira ocorreu aos 17 anos, ponderando sobre a possibilidade de viajar com uma velocidade idêntica à da luz. A segunda meditação envolveu a consideração da experiência de Michelson.

No que diz respeito ao experimento de Michelson-Morley, é bastante provável que, mesmo que Einstein o conhecesse, não o tenha mencionado porque o experimento não teria exercido qualquer influência em seu pensamento, em sua trajetória em direção à teoria da relatividade. No entanto, o conhecimento desse experimento poderia ser considerado um ponto a favor da sobrevivência e validade da teoria, de acordo com Einstein<sup>7</sup>.

"Nunca é fácil falar do modo como cheguei à teoria da relatividade, pois várias complexidades ocultas motivam o pensamento humano, e elas agiram com pesos diferentes. "(Einstein, A apud Pais, A., 1995, p.152).

A reação da comunidade científica ao princípio da relatividade e a maneira como foi divulgada, tanto em artigos científicos quanto em livros didáticos, reafirma a visão kuhniana de como a ciência está sujeita não apenas a argumentos lógico-matemáticos e racionais, mas também a subjetividades e, ainda mais, à persuasão. A relação entre a influência do experimento Michelson-Morley e o princípio da relatividade introduz no ensino da ciência uma série de "achismos" e opiniões que contradizem os próprios relatos de Einstein sobre a influência recebida desse experimento. O que é finalmente descrito nos livros

<sup>6</sup> Livro editado pela Methuen and Company, Ltd. em 1923 e republicado em 1952 pela editora Dover, no qual foram reunidos alguns trabalhos de Einstein, Lorentz e Minkowski, com notas de Arnold Sommerfeld.

<sup>7</sup> Conferência de Kyoto erti 1922; Einstein, A. apud Pais, A., 1995, p.152.

didáticos é uma interpretação simplificada dos comentários e análises de grandes cientistas, geralmente privilegiando uma abordagem empirista da ciência, colocando o experimento de Michelson-Morley na gênese da teoria da relatividade, e esta como um arcabouço teórico que sistematizou as concepções de Poincaré, Lorentz e FitzGerald, fornecendo finalmente a resposta correta ao experimento.

Enquanto poderíamos empregar a teoria da relatividade para orientar discussões sobre a evolução do conhecimento científico, é crucial compreender o contexto real no qual a teoria da relatividade estava sendo desenvolvida e o significado do experimento Michelson-Morley para essa teoria.

### 3.3.2 As Transformações de Lorentz

Vamos considerar um caso especial, em que escolhermos o eixo dos  $x$  na direção do movimento relativo entre os dois referenciais inerciais.

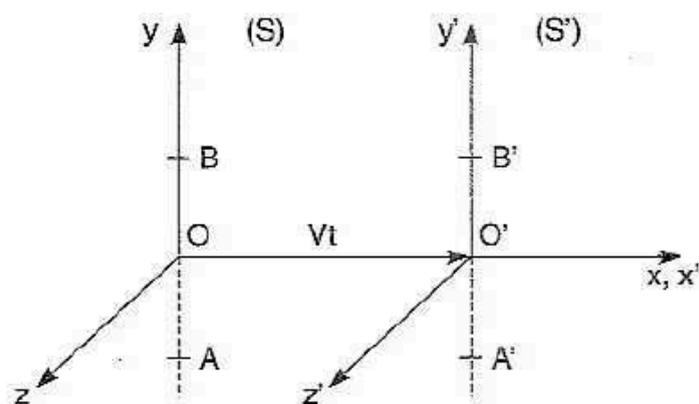


Figura 3.4 - Referenciais  $S$  e  $S'$

Fonte: "Física Moderna" de Moysés Nussenzveig 2ª ed., 2012.

Definindo as coordenadas nos referenciais  $S$  e  $S'$ , temos,

$$S: (x, y, z, t)$$

$$S': (x', y', z', t')$$

como os eixos  $y$  e  $z$  permanecem inalterados (não há movimento nesses eixos),

$$y' = y$$

$$z' = z$$

precisamos encontrar as transformações para  $x$  e  $t$ . Supomos que essas transformações são lineares,

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

Vamos então fazer a dedução usando a invariância da velocidade da luz. Consideramos um pulso de luz emitido em  $t = 0$  do ponto  $x = 0$ . No referencial  $S$ , a frente de onda esférica de luz é descrita por,

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2,$$

no referencial  $S'$ , a frente de onda esférica de luz deve ser descrita por,

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2,$$

assumimos que  $x'$  e  $t'$  são combinações lineares de  $x$  e  $y$ ,

$$x' = Ax + Bt$$

$$t' = Dx + Et,$$

substituímos  $x'$  e  $t'$  nas equações da frente de onda de luz,

$$(Ax + Bt)^2 + y^2 + z^2 = c^2(Dx + Et)^2,$$

como  $y = y'$  e  $z = z'$ , a equação se simplifica para,

$$(Ax + Bt)^2 = c^2(Dx + Et)^2,$$

expandindo ambos os lados da equação,

$$A^2 x^2 + 2ABxt + B^2 t^2 = c^2 D^2 x^2 + 2c^2 DExt + c^2 E^2 t^2,$$

igualando os coeficientes dos termos  $x^2$ ,  $t^2$  e  $xt$

- Coeficientes de  $x^2$ :  $A^2 = c^2 D^2 \Rightarrow A = \pm cD$

- Coeficientes de  $t^2$ :  $B^2 = c^2 E^2 \Rightarrow B = \pm cE$
- Coeficientes de  $xt$ :  $2AB = 2c^2 DE$

Usando  $A = cD$  e  $B = cE$ , temos  $2c^2 DE = 2c^2 DE$ , o que é verdadeiro.

O fator de Lorentz  $\gamma$ . Consideremos que, quando  $v = 0$ , os referenciais  $S$  e  $S'$  coincidem, então  $A = 1$  e  $B = 0$ ,  $D = 0$  e  $E = 1$ . Obtemos as constantes,

$$A = \gamma$$

$$B = -\gamma v$$

$$D = -\frac{\gamma v}{c^2}$$

$$E = \gamma$$

onde  $\gamma$  é o fator de Lorentz,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Finalmente, substituindo as constantes nas equações, temos as transformações de Lorentz,

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

As transformações de Lorentz relacionam as coordenadas espaço-tempo em dois referenciais inerciais movendo-se a uma velocidade relativa  $v$  ao longo do eixo  $x$ .

### **3.4 Efeitos da Dilatação do Tempo**

#### **a) Paradoxo do Gêmeos**

Uma das peculiaridades antecipadas pela teoria da relatividade geral é o paradoxo dos gêmeos. Este fenômeno singular na teoria da relatividade destaca a presença de uma descontinuidade entre as abordagens newtoniana e relativista, uma vez que tal paradoxo não emerge a partir das considerações baseadas nos conceitos newtonianos.

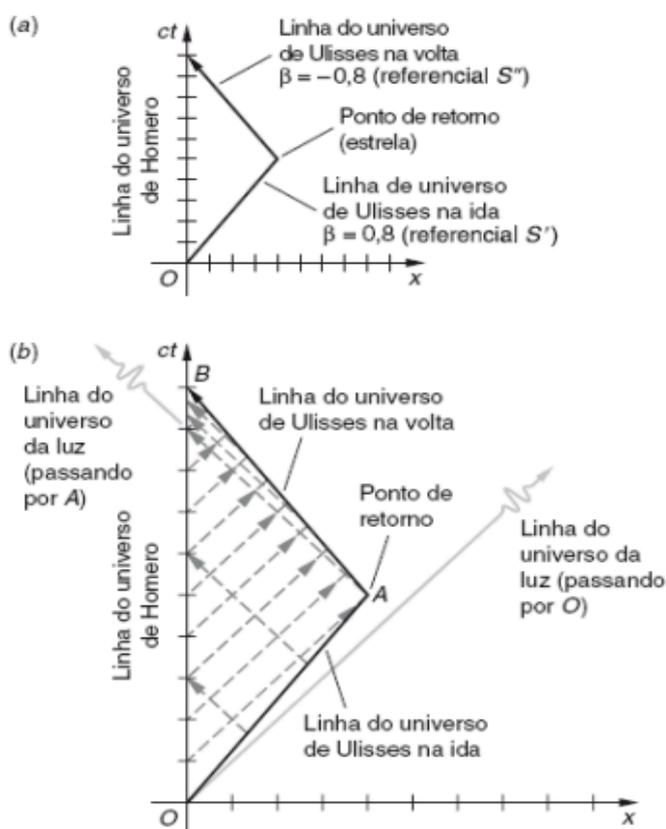


Figura 3.5 - (a) Diagrama espaço-tempo da viagem de Ulisses a uma estrela distante no referencial inercial em que Homero e a estrela estão em repouso. (b) As divisões do eixo  $ct$  correspondem a anos no relógio de Homero. As retas tracejadas mostram as linhas do universo de sinais luminosos transmitidos pelos gêmeos com uma frequência de um sinal por ano, de acordo com seus relógios. Observe que as frequências dos sinais recebidos pelos dois gêmeos são muito diferentes.

Fonte - Física Moderna, 6ª edição, Tipler

Na teoria da relatividade restrita, o tempo se dilata para um observador em movimento em relação a um observador em repouso. A equação da dilatação temporal é,

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

Vamos supor que Ulisses viaja para uma estrela distante a uma distância  $D$  da Terra com velocidade  $u$ , para e retorna com a mesma velocidade  $u$ . O tempo total de viagem, segundo Homero, é a soma do tempo de ida e volta,

$$\Delta t_{total} = \Delta t_{ida} + \Delta t_{volta} = \frac{D}{u} + \frac{D}{u} = \frac{2D}{u},$$

para Ulisses, o tempo de viagem será dilatado. O intervalo de tempo próprio para cada trecho (ida ou volta) é  $\Delta t_0 = \Delta t'_{ida} + \Delta t'_{volta}$ . Cada intervalo de tempo medido por Ulisses é dilatado pelo fator de Lorentz,

$$\Delta t'_{ida} = \Delta t'_{volta} = \frac{\Delta t_{ida}}{\gamma} = \frac{D/u}{\gamma} = \frac{D}{u\gamma}$$

dessa forma, o tempo total de viagem medido por Ulisses é

$$\Delta t_0 = 2 \cdot \frac{D}{u\gamma} = \frac{2D}{u\gamma},$$

substituindo  $\gamma$

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{u} \sqrt{1 - (u/c)^2}$$

fazendo a comparação dos tempos, temos que para Homero (na Terra)

$$\Delta t_{total} = \frac{2D}{u}$$

já para Ulisses (na nave)

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{u} \sqrt{1 - (u/c)^2}$$

Podemos concluir que quando Ulisses retorna à Terra, ele terá experimentado menos tempo do que Homero devido à dilatação do tempo. Especificamente, o tempo que ele experimentou é menor pelo fator de Lorentz  $\gamma$ . Portanto, Ulisses será mais jovem que Homero quando eles se reencontrarem.

## 4 Metodologia

Essa pesquisa foi produzida dentro do Novo Ensino Médio (NEM), no qual a carga horária da disciplina de Física diminuiu na segunda e na terceira série, então, foi realizada em uma turma da primeira série.

Nesta nova modalidade do NEM, a maior parte dos conteúdos de Física foram compactados e são ministrados ainda no primeiro ano, incluindo Física Moderna e Eletrodinâmica, que são fundamentais para este trabalho. Além é claro das disciplinas já ensinadas no primeiro ano, que fazem parte da Física Clássica.

No planejamento da primeira série do NEM, está contido dentro do conteúdo de eletromagnetismo as “equações de Maxwell”, apenas para apresentar sucintamente aos alunos. Esse conteúdo foi adiantado estrategicamente, assim, alguns materiais que foram usados durante a aplicação do produto, puderam ser adiantados e algumas explicações puderam ser feitas. O teste diagnóstico também foi repassado aproveitando esse adiantamento

estratégico, dessa forma, as quatro aulas utilizadas foram exclusivas para ministrar os conteúdos de cinemática relativística programados e os alunos puderam fazer tanto o teste diagnóstico como a avaliação de aprendizagem com mais tranquilidade.

#### **4.1 Uma Abordagem Qualitativa**

A condução de pesquisas acadêmicas no campo do ensino da Física é fundamental para aprimorar práticas pedagógicas e promover uma compreensão mais eficaz dos conceitos científicos pelos alunos. Nesse contexto, este estudo propõe uma metodologia abrangente para investigar o ensino da Cinemática Relativística, com foco na aprendizagem significativa de Ausubel.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente em fontes primárias e secundárias. O objetivo foi compreender os métodos, perspectivas e visões adotados por outros pesquisadores em estudos anteriores sobre o ensino da Física Moderna, especialmente no contexto da Cinemática Relativística. A base teórica para esta revisão inclui obras de Severino (2016) e Prodanov (2013), que discutem metodologias de pesquisa e abordagens qualitativas e quantitativas.

O objeto de estudo foi delineado com precisão, considerando-se o público-alvo, estudantes do ensino médio, os conceitos específicos da Cinemática Relativística a serem ensinados e os objetivos de aprendizagem desejados. Este estudo buscou explorar, explicar e possibilitar novos conhecimentos sobre a temática de estudo, alinhando-se assim com uma abordagem exploratória-descritiva conforme descrita por Severino (2016).

Foram desenvolvidos instrumentos de coleta de dados, incluindo questionários para avaliar o conhecimento prévio dos alunos, testes de avaliação de aprendizagem e observações em sala de aula. Além disso, entrevistas com professores e alunos foram conduzidas com o intuito de capturar *insights* qualitativos sobre o processo de ensino-aprendizagem.

Com base na revisão bibliográfica e nos objetivos definidos, foi projetada e implementada uma intervenção pedagógica. As aulas foram estruturadas de acordo com os princípios da aprendizagem significativa de Ausubel, incorporando estratégias como o uso de organizadores prévios, exemplos concretos e simulações, conforme discutido por Severino (2016).

Durante a implementação da intervenção pedagógica, também foram coletados dados sobre a participação dos alunos, seu engajamento com o conteúdo e sua compreensão dos conceitos de Cinemática Relativística. A coleta de dados foi realizada de forma sistemática e registrada para análise posterior.

Os dados coletados foram analisados utilizando métodos qualitativos e quantitativos, identificados padrões emergentes, tendências e diferenças entre os grupos de alunos. A análise comparativa dos resultados pré e pós-intervenção pedagógica permitiram avaliar a eficácia da abordagem adotada.

A pesquisa foi conduzida de acordo com os padrões éticos, garantindo o consentimento informado dos participantes, a confidencialidade dos dados e a ausência de preconceitos ou discriminação.

#### **4.2 Exploração teórico-metodológica da prática de ensino por pesquisa supervisionada em unidade de ensino potencialmente significativa.**

A condução da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) foi cuidadosamente delineada em consonância com os preceitos fundamentais da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Seguindo os passos orientadores propostos por Moreira (2011), pudemos promover uma abordagem didática mais eficiente, valorizando a integração do novo conhecimento com as bases prévias adquiridas pelos alunos.

Para a avaliação dos resultados obtidos, utilizamos o método da Avaliação Formativa e Diagnóstica por Graham Sadler como ferramenta catalisadora na organização das estratégias e no acompanhamento dos desempenhos, em busca da construção de uma aprendizagem verdadeiramente significativa.

No que tange à metodologia empregada, a UEPS se embasou na abordagem ativa de Instrução entre Pares, conforme proposta por Eric Mazur (2015), para orientar os testes conceituais aplicados. A Instrução entre Pares surge como uma ferramenta desafiadora, instigando os alunos a pensarem nos múltiplos contextos nos quais a Física se manifesta, em vez de meramente decorarem fórmulas. Seu propósito primordial é explorar a interação entre os estudantes durante as aulas expositivas, direcionando a atenção para os conceitos fundamentais (Mazur, 2015, p. 10).

A implementação da Instrução entre Pares proporcionou uma mudança notável na dinâmica da sala de aula, resultando em um engajamento mais significativo por parte dos alunos. Além disso, observou-se uma transformação comportamental na turma, com os alunos tornando-se mais ativos e participativos. Destaca-se ainda o fortalecimento da confiança argumentativa ao longo de todo o processo de ensino. Esses resultados reforçam a eficácia da UEPS como uma abordagem pedagógica que valoriza a construção do conhecimento e a participação ativa dos alunos em seu processo de aprendizagem.

### **4.3 Materiais Didáticos**

Toda a aplicação do produto educacional foi realizada em uma escola pública, logo, é necessário pensar que pode haver falta de alguns recursos, laboratórios ou afins por exemplo, então foram utilizados materiais básicos que a maioria das escolas públicas usufruem. Sendo assim, é possível aplicar esta proposta com relativa facilidade em se tratando de recursos.

As aulas, na escola de aplicação, tem duração de 48 (quarenta e oito) minutos. Antes de ir à prática, o tempo parece muito curto, mas durante o andamento foi possível conduzir o estudo com bastante tranquilidade.

É importante ressaltar que alguns dos materiais utilizados foram encaminhados via e-mail ou por aplicativo de mensagens (whatsapp) em padrão PDF. Alguns alunos (poucos) não dispunham de tais recursos para receber o material nesse formato, então foi necessário fazer impressões e entregar como materiais físicos.

Para o andamento das aulas durante a aplicação do produto educacional, os materiais didáticos empregados foram quadro, pincel, projetor (datashow), computador, internet e o laboratório de informática, para uso dos alunos apenas caneta e caderno. Como pode ser visto, são materiais e recursos básicos os quais a maioria das escolas da rede pública dispõe.

### **4.4 Descrição das aulas de aplicação da UEPS**

Por ser professor titular da escola e da disciplina, foi necessário apenas autorização do gestor da escola, dos responsáveis dos alunos e apresentar um planejamento à gestão pedagógica.

É importante ressaltar que houve um planejamento prévio para a realização da proposta, então, o produto começa antes e vai além das quatro aulas de aplicação. Muito se fala em ensinar a Física moderna nas escolas de ensino básico, mas sabemos que para tal feito é necessário que o aluno tenha ao menos um domínio básico da Física clássica. Essa parte da Física normalmente está na grade curricular, porém, para se adequar da melhor forma nesta pesquisa, os tópicos “prévios”, como noção de referenciais, vetores e cinemática, foram lecionados usando a mesma metodologia do produto educacional, ou seja, foi dado ênfase histórica e usado simulações, a metodologia de avaliação também foi a mesma. Dessa forma, os estudantes já foram se familiarizando com os métodos.

As aulas de eletromagnetismo também foram antecipadas. Tal conteúdo, segundo a grade curricular do NEM, é ministrado no terceiro bimestre do ano letivo. Essa adequação foi necessária por conta da demonstração do conteúdo, pois segundo a grade curricular, é necessário apresentar as equações de Maxwell, obviamente é apenas uma apresentação, já que o nível matemático do ensino médio não permite o menor aprofundamento. Durante uma das aulas de eletromagnetismo, foi aplicado o teste diagnóstico sobre Cinemática Relativística e, a partir desse momento foram sugeridos aos alunos que buscassem assistir filmes e séries também sobre a cinemática relativística, assim, eles já poderiam desenvolver pensamentos e raciocínios sobre o tema.

Com todo o planejamento em dias, as aulas para aplicação do produto educacional iniciaram, a turma escolhida foi da primeira série com quantitativo de 45 alunos. No primeiro ano, são duas aulas de Física semanais, foram usadas quatro aulas para aplicar a pesquisa, totalizando duas semanas.

## **Aula 1**

O objetivo da primeira aula foi desenvolver o aparato histórico envolvido no surgimento da Relatividade Restrita. Mas antes, algumas ideias foram debatidas, como tecnologias que se valem da Relatividade e temas que serviram para instigar a imaginação e ter interação da parte dos alunos. Então, foi falado sobre GPS, relógios atômicos, filmes e séries de ficção científica que tratam viagens no tempo. Também foram apresentados alguns paradoxos famosos, a partir daí algumas curiosidades foram levantadas por parte dos alunos. Logo, essa conversa inicial serviu de introdução ao tema e foi demonstrado a importância da Relatividade Restrita.

Embora Einstein tenha sido o mais famoso formulador da teoria da relatividade restrita, as contribuições de Poincaré, Lorentz, Michelson, Morley, FitzGerald, Fresnel e outros indiretamente foram cruciais para o desenvolvimento e compreensão dessa teoria. Suas ideias e trabalhos pavimentaram o caminho para a revolução conceitual que a relatividade restrita trouxe para a física moderna.

Em resumo a primeira aula teve o seguinte andamento:

1. Introdução: Houve a apresentação do tema, a importância da relatividade restrita nas tecnologias.

2. O objetivo da aula: entender a história por trás do desenvolvimento dessa teoria, os quais foram comentados os antecedentes Históricos como os experimentos de Michelson-Morley e o resultado inesperado que desafiou as noções aceitas sobre o éter luminífero, a necessidade de uma nova teoria para explicar esses resultados e as contribuições de Albert Einstein.

Também foram apresentados Conceitos-Chave como dilatação do tempo e a contração do espaço.

3. Atividade Prática (8 minutos finais): A turma foi dividida em pequenos grupos e a esses grupos foi um debate relacionado à aula ministrada.

4. Avaliação Formativa e Diagnóstica: Ao final da aula, foi passada uma atividade de pesquisa sobre o tema em questão, foi pedido uma redação sobre os desafios encontrados durante a atividade prática e as estratégias utilizadas para superá-los e junto ainda falar sobre como a teoria da Relatividade Restrita mudou nossa compreensão do universo e suas implicações na vida cotidiana.

Essa atividade foi entregue pelos alunos antes da aula seguinte, assim, analisando tal atividade junto com a atividade que fizeram em sala de aula, foi possível fornecer um feedback individualizado aos alunos, destacando suas realizações e sugerindo maneiras de melhorar.

## **Aula 02**

Nota: A segunda aula de aplicação do Produto Educacional usou dois tempos de 48 minutos, isso se deu ao fato da aula seguinte à de Física ser de uma disciplina do NEM chamada Projeto de Vida, a qual Eu, Emerson Bruno, também era o professor. Esse momento foi incluído no planejamento e, dessa forma, a aula pôde ser conduzida com mais tranquilidade e podendo fazer explicações mais detalhadas e mais passo a passos.

O objetivo da aula foi demonstrar e fazer os alunos compreenderem os postulados de Einstein e o desenvolvimento da equação de dilatação temporal na teoria da relatividade restrita. Assim como na primeira aula, o método Avaliação Formativa e Diagnóstica por Graham N. W Sadler foi usado

Na introdução foi feita a apresentação do tema, a Cinemática Relativística como uma extensão da teoria da relatividade restrita, foi também explicado o objetivo da aula que era entender os postulados básicos da teoria e como eles levam à equação de dilatação temporal. Foram então apresentados os dois postulados fundamentais da teoria da relatividade restrita, a constância da velocidade da luz no vácuo e o princípio da relatividade, explicando como esses postulados desafiam as ideias tradicionais sobre espaço, tempo e movimento.

Após explicar os postulados, chegou a hora da parte mais desafiadora, tanto para o professor como para os alunos, desenvolver as equação de dilatação temporal, antes foi comentado o conceito de dilatação temporal, sendo o fenômeno em que o tempo parece passar mais devagar para um observador em movimento rápido em relação a um observador estacionário. Foram utilizados exemplos e ilustrações para demonstrar como a relatividade do tempo surge da constância da velocidade da luz e do princípio da relatividade.

## O espaço-tempo

Bom, mas o que nos interessa é saber qual a trajetória do pulso de luz quando visto a partir do referencial em Terra. Pelo princípio da relatividade, não é o mesmo observado pelo astronauta, já que para o observador em Terra, existe o movimento da espaçonave e que deve ser levado em consideração.



the observer on earth sees a **diagonal path**

Disponível na íntegra em: <https://youtu.be/IEeSIT3S14>

Os dois observadores irão concordar quanto ao fenômeno ocorrido, a isso chamaremos de evento. É importante o fato de que os dois observadores enxergarão o mesmo fenômeno, lembre-se de que o 1º postulado da relatividade restrita estabelece que não existem referenciais privilegiados.

Onde estaria então a diferença na observação do fenômeno?

Figura 4.1 - Slide 06 da segunda aula

Fonte: próprio autor

## O espaço-tempo

Bom, mas o que nos interessa é saber qual a trajetória do pulso de luz quando visto a partir do referencial em Terra. Pelo princípio da relatividade, não é o mesmo observado pelo astronauta, já que para o observador em Terra, existe o movimento da espaçonave e que deve ser levado em consideração.



the observer on earth sees a **diagonal path**

Disponível na íntegra em: <https://youtu.be/IEeSIT3S14>

Os dois observadores irão concordar quanto ao fenômeno ocorrido, a isso chamaremos de evento. É importante o fato de que os dois observadores enxergarão o mesmo fenômeno, lembre-se de que o 1º postulado da relatividade restrita estabelece que não existem referenciais privilegiados.

Onde estaria então a diferença na observação do fenômeno?

Figura 4.3 - slide 07 da segunda aula, observador vendo o foguete no meio da trajetória

Fonte: próprio autor

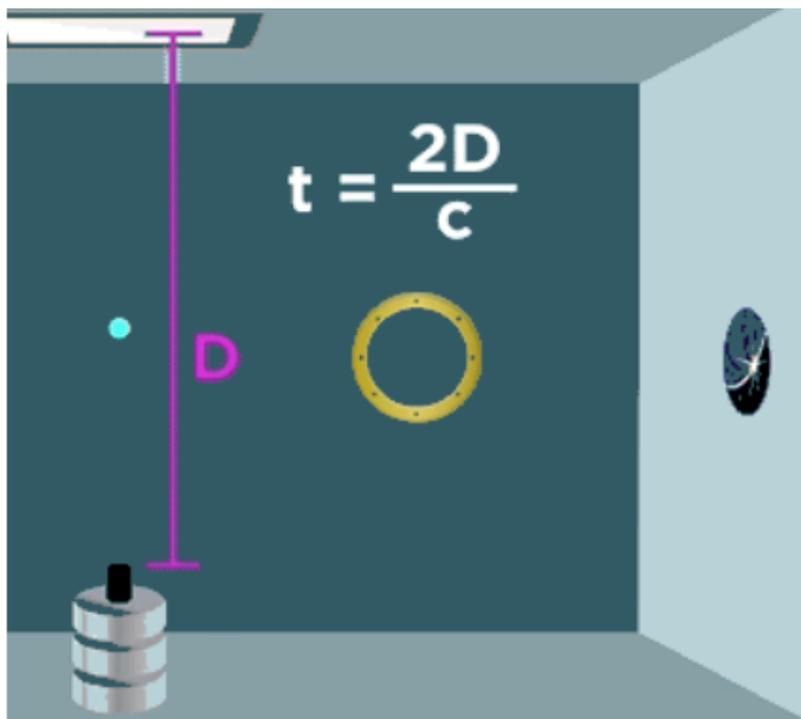


Figura 4.4 - tempo de percurso de ida e volta do “raio” de luz

Disponível na íntegra em: <https://youtu.be/iIEeSiT3SI4>

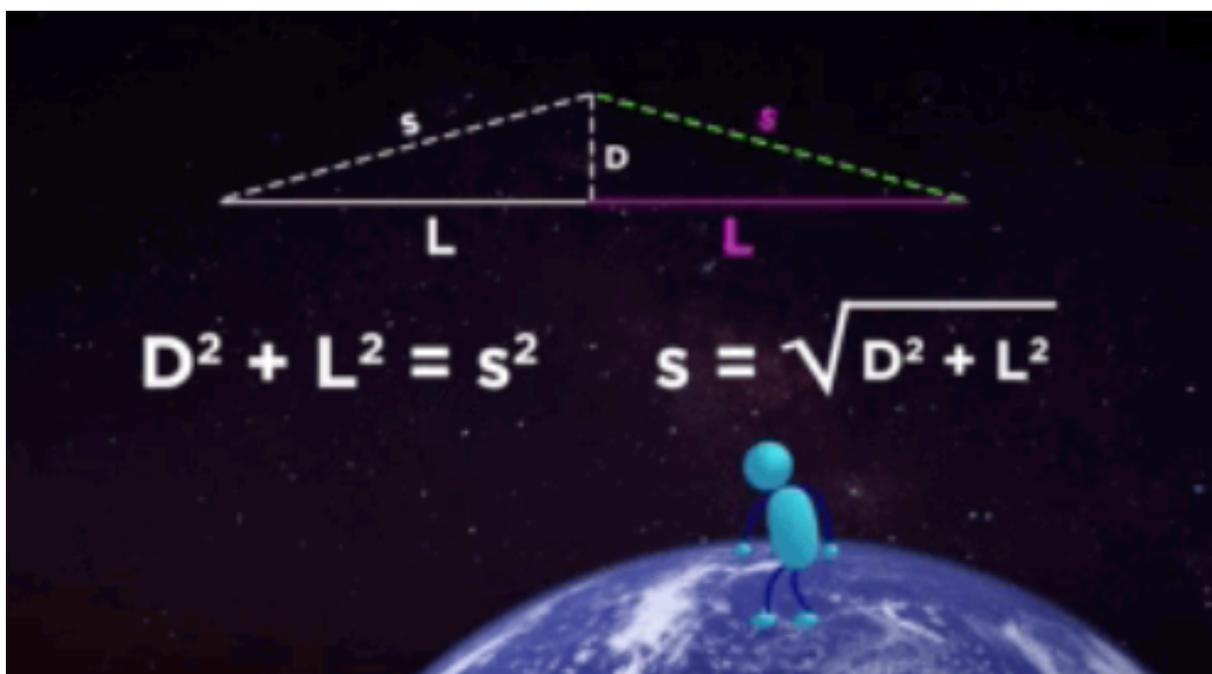


Figura 4.5 - trajeto do raio de luz visto pelo observador na Terra

Disponível na íntegra em: <https://youtu.be/iIEeSiT3SI4>

Para todas essas demonstrações, foram usadas simulações, assim os alunos puderam entender melhor os princípios físicos e matemáticos. A partir desse ponto, os estudantes foram guiados através do desenvolvimento matemático da equação de dilatação temporal.

Após fazer a demonstração da equação de dilatação temporal, foi iniciado a atividade prática, os alunos foram divididos em pequenos grupos e foi entregue problemas relacionados à dilatação temporal para que os alunos pudessem resolver juntos. Dando continuidade à Avaliação Formativa e Diagnóstica, durante a atividade prática, foi observado o desempenho dos alunos, identificando pontos fortes e áreas de dificuldade. Ao final da atividade, foi fornecido o feedback individualizado aos alunos, destacando suas realizações e sugerindo maneiras de melhorar.

#### Atividade Prática

1 - Um astronauta viaja em uma nave espacial que se move a 80% da velocidade da luz ( $0,8c$ ) em relação à Terra. Se ele cronometrar 10 horas em seu relógio de bordo, quanto tempo terá passado para um observador na Terra?

2 - A vida média de uma partícula em repouso é de 2 microsegundos. Se essa partícula se move a 99% da velocidade da luz ( $0,99c$ ) em relação a um laboratório, qual será a vida média observada dessa partícula no laboratório?

3 - Uma nave espacial viaja para uma estrela que está a 4 anos-luz de distância da Terra a uma velocidade de  $0,6c$ . Quanto tempo a viagem levará conforme medido por um observador na Terra e quanto tempo será medido por um passageiro na nave?

4 - Dois eventos ocorrem em uma nave espacial que se move a  $0,75c$  em relação à Terra. De acordo com um relógio na Terra, os eventos ocorrem com 10 minutos de intervalo. Qual é o intervalo de tempo entre esses eventos conforme medido por um relógio na nave espacial?

Foi conduzida então uma discussão em sala de aula sobre os desafios encontrados durante a atividade prática e as estratégias utilizadas para superá-los, junto com a discussão e reflexão, houve um incentivo a refletirem sobre como a dilatação temporal desafia nossa

intuição sobre o tempo e o movimento. Finalizando, uma tarefa de pesquisa sobre um aspecto específico da cinemática relativística ou sobre um experimento que comprove os efeitos da dilatação temporal foi pedida.

### **Aula 03**

O objetivo desta aula foi consolidar os conceitos teóricos de cinemática relativística discutidos previamente em aulas anteriores, através da prática utilizando software no laboratório de informática. Além disso, foi aplicado o método de Avaliação Formativa e Diagnóstica de Graham N. W. Sadler para verificar o entendimento dos alunos e identificar possíveis lacunas de aprendizado.

Como os estudantes iriam trabalhar com simulações, os recursos necessários foram o laboratório de informática com computadores e acesso à internet, software apropriado para simulação de fenômenos relativísticos (foram utilizados software já disponíveis na internet), projetor ou tela para demonstrações e os questionários de avaliação formativa

A aula teve início com uma breve revisão dos conceitos teóricos de cinemática relativística abordados previamente, destacando os principais pontos, como a dilatação do tempo e a adição de velocidades relativísticas. No projetor houve a demonstração para os alunos de como utilizar o software escolhido para simular fenômenos relativísticos mostrando exemplos práticos de como configurar o software para realizar cálculos e simulações relacionadas à cinemática relativística.

Dado início a atividade prática, os alunos ficaram duplas, realizaram uma série de tarefas práticas utilizando o software, como calcular o tempo dilatado para um objeto viajando a uma fração significativa da velocidade da luz e exploraram a contração do comprimento em diferentes cenários. Durante a atividade, os alunos foram auxiliados conforme necessário e sempre observando o progresso deles.

A seguir, uma das simulações e o que foi pedido aos alunos como atividade.

Simulação - Contração relativística: Nesta simulação, é possível apenas alterar a velocidade da nave, porcentagem em relação a velocidade da luz. De acordo com a velocidade escolhida, os dados como *comprimento da nave em repouso*, *comprimento da nave em movimento*,

*tempo no interior da nave e tempo para um observador externo*, serão mostrados se irão ser alterados e o valor da alteração.

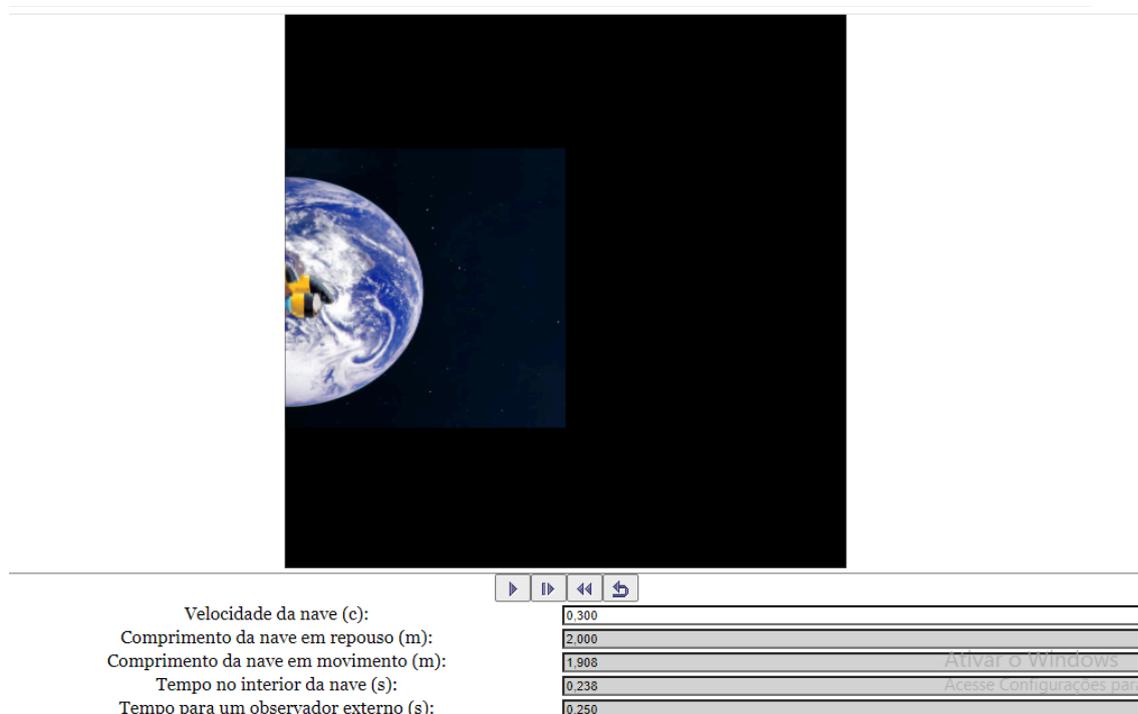


Figura 4.6 - Simulador contração relativística

Fonte: site da Universidade Federal de Santa Catarina

Como está na descrição, essa simulação permite alterar apenas a velocidade da nave, o suficiente para as atividades de interação dos alunos. Após a apresentação e algumas demonstrações feitas e mostradas no projetor, os alunos também puderam realizar nos computadores que estavam usando para poder se familiarizar melhor, em seguida ao primeiro contato, foi pedido aos estudantes que calculassem dilatações temporais com velocidades escolhidas por eles mesmos e depois verificar se o resultado era o mesmo ou próximo o da simulação. Alguns alunos acabaram se destacando no entendimento matemático e foi pedido a ajuda deles para orientar os que estavam tendo mais dificuldades, tudo supervisionado.

Todas as outras simulações tiveram a mesma abordagem descrita acima, e serviram para diversificar mais a visão de como pode funcionar e/ou acontecer a cinemática relativística.

Seguindo o método de Avaliação Formativa e Diagnóstica de Graham N. W. Sadler, iniciou-se uma curta discussão, a qual foi pedido para que compartilhassem suas descobertas, desafios enfrentados e conclusões alcançadas durante a atividade. Por fim, foram distribuídos questionários de avaliação formativa que os alunos preencheram individualmente, as perguntas abordavam os conceitos fundamentais de cinemática relativística discutidos durante a aula prática.

Questionário:

1. Qual é a definição de cinemática relativística?
2. Descreva os principais efeitos da relatividade restrita discutidos durante a aula.
3. Como a dilatação do tempo afeta o movimento de um objeto em velocidades próximas à velocidade da luz?
4. Durante a atividade prática, qual foi a maior descoberta ou insight que você teve sobre os fenômenos relativísticos?
5. Quais foram os desafios que você enfrentou ao utilizar o software para simular fenômenos relativísticos?
6. Como você acha que a utilização do software contribuiu para sua compreensão dos conceitos discutidos durante a aula?

Ainda foi feito um desafio mostrado no projetor, uma questão um pouco mais elaborada do livro de Física - Young and Freedman - Vol 4-Ed 12<sup>a</sup> - Capítulo 37 Exercícios - Ex. 11, quem conseguisse resolver no quadro, ganharia uma caixa de chocolates.

Questão:

Por que somos bombardeados por múons?

Múons são partículas subatômicas instáveis que sofrem decaimento e se transformam em elétrons com vida média de  $2,2 \mu\text{s}$ . Eles são gerados quando raios cósmicos bombardeiam as camadas superiores da atmosfera a cerca de  $10 \text{ km}$  acima da superfície da Terra e,

descolam-se com uma velocidade muito próxima à da luz. O problema que gostaríamos de discutir, é por que vemos múons na superfície da Terra.

- a) Qual é a maior distância que um múon poderia percorrer durante sua vida média de  $2,2 \mu\text{s}$ ?
- b) De acordo com a sua resposta à parte (a), seria de imaginar que os múons nunca chegassem à superfície. Mas a vida média de  $2,2 \mu\text{s}$  é medida no sistema do múon e, múons se movem muito rápido. A uma velocidade de  $0,999c$ , qual é a vida média de um múon em referência a um observador em repouso na Terra? Qual distância o múon nesse tempo? Esse resultado explica porque encontramos múons em raios cósmicos?
- c) Do ponto de vista do múon, ele continua vivendo durante  $2,2 \mu\text{s}$ , então como ele alcança o solo? Qual a densidade dos  $10 \text{ km}$  de atmosfera que o múon precisa atravessar?

Nenhum dos alunos se candidatou e a questão foi resolvida na aula seguinte.

#### **Aula 4**

A quarta e última aula teve como objetivo avaliar os alunos através de um teste qualitativo baseado nas aulas ministradas sobre o tema. Um outro objeto acabou sendo necessário, resolver a questão do desafio da aula anterior. A seguir a questão e sua resolução.

Questão:

Física - Young and Freedman - Vol 4-Ed 12<sup>a</sup> - Capítulo 37 Exercícios - Ex. 11

Por que somos bombardeados por múons?

Múons são partículas subatômicas instáveis que sofrem decaimento e se transformam em elétrons com vida média de  $2,2 \mu\text{s}$ . Eles são gerados quando raios cósmicos bombardeiam as camadas superiores da atmosfera a cerca de  $10 \text{ km}$  acima da superfície da Terra e, descolam-se com uma velocidade muito próxima à da luz. O problema que gostaríamos de discutir, é por que vemos múons na superfície da Terra.

- a) Qual é a maior distância que um múon poderia percorrer durante sua vida média de  $2,2 \mu\text{s}$ ?
- b) De acordo com a sua resposta à parte (a), seria de imaginar que os múons nunca chegassem à superfície. Mas a vida média de  $2,2 \mu\text{s}$  é medida no sistema do múon e, múons se movem muito rápido. A uma velocidade de  $0,999c$ , qual é a vida média de um múon em referência a

um observador em repouso na Terra? Qual distância o múon nesse tempo? Esse resultado explica porque encontramos múons em raios cósmicos?

c) Do ponto de vista do múon, ele continua vivendo durante  $2,2 \mu\text{s}$ , então como ele alcança o solo? Qual a densidade dos  $10 \text{ km}$  de atmosfera que o múon precisa atravessar?

Passo 1

letra a)

A maior distância que um múon pode poder percorrer é se ele tiver velocidade igual a da luz, logo:

$$d = vt = ct$$

$$d = (3 \times 10^8)(2,2 \times 10^{-6})$$

$$d = 660 \text{ m}$$

Passo 2

letra b)

Para um observador em repouso na Terra, a vida média do múon irá sofrer uma dilatação temporal, ou seja:

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t'$$

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}}} (2,2 \times 10^{-6})$$

$$\Delta t = 4,9 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Passo 3

A distância que ele percorreria seria:

$$d = vt$$

$$d = (0,999)(3 \times 10^8)(4,9 \times 10^{-5})$$

$$d = 15000 \text{ m}$$

No referencial da Terra, o múon pode percorrer 15 *km* na atmosfera, por isso o encontramos em raios cósmicos.

Passo 4

letra c)

Queremos saber agora quanto vale a distância de 10 *km* para o múon. Para o múon, a distância irá contrair, assim:

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

$$l = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l_0$$

$$l = \sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}} (1000)$$

$$l = 450 \text{ m}$$

No referencial do múon, a altura da atmosfera é menor do que a distância que ele se move durante a sua vida útil.

Após a resolução do problema, foi entregue o teste diagnóstico aos estudantes.

## Teste

1) Sabemos que Albert Einstein publicou trabalhos muito importantes sobre a Teoria da Relatividade Restrita. Se por um acaso, Einstein não tivesse publicado tais trabalhos naquele momento, tal teoria teria chances iguais ou próximas de ser desenvolvida? Explique sua resposta.

---

---

---

2) Marque a alternativa que completa o texto: No século XIX, os cientistas acreditavam que a luz precisava de um meio para se propagar, então para desempenhar esse papel pensaram em uma hipótese.

- a)  O éter luminífero era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.
- b)  Uma substância gasosa misteriosa existente era a hipótese que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.
- c)  O Plasma Universal era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.
- d)  A Matéria Escura era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.

3) Marque os nomes de cientistas com contribuições na Física você que já ouviu falar

- Henri Poincaré       Galileu Galilei       Albert A. Michelson
- Hendrik Lorentz       Fitzgerald       Edward Williams Morley
- Albert Einstein       James C. Maxwell
- Isaac Newton       Hippolyte Fizeau

4) Em poucas palavras, descreva as vantagens (se houveram) em estudar a história antes de estudar um novo assunto sobre Física?

---

---

5) Qual é a importância da história da relatividade restrita no desenvolvimento da física e na nossa compreensão do universo?

---

---

---

6) Quando olhamos para o céu, durante uma noite estrelada, estamos observando o:

Passado  Presente  Futuro

7) (UFRJ, Física 4, P2 - 2011.2, Questão ME06) Um observador na Terra vê uma espaçonave passar com velocidade  $0,5c$ . Na ponta da espaçonave, uma partícula é lançada para trás com velocidade  $0,4c$  em relação à espaçonave. Qual a velocidade da partícula para o observador na Terra?

## **5 - Resultados e discussões**

### **5.1 - Análise do teste diagnóstico**

Uma pequena entrevista foi feita com alguns professores de Física da escola para saber se os mesmos trabalham o conteúdo de Física Moderna (FM), se sim, qual parte da FM é trabalhada, caso não ministrem, o motivo da negativa e a importância de ter o conteúdo. A entrevista foi gravada em áudio. Sobre ministrarem FM a resposta foi unânime, 100% não trabalham, logo essas respostas anularam a pergunta sobre qual parte da FM é trabalhada. Sobre o motivo pelo qual a FM fica excluída, 20% responderam que por nunca ter trabalhado o tema, nunca houve uma busca por tal conhecimento e então não possuíam o conhecimento necessário, outros 20% disseram que o tema é pouco ou nunca cobrado nas provas de vestibular e não há a necessidade de ser repassado, 60% nunca incluíram no planejamento por nunca ter observado na grade do ensino médio.

Sobre a importância, todos declaram que é fundamental, mas seria difícil implementar o conteúdo, pois para isso seria necessário buscar mais especialização e o tempo é muito curto para aumentar a carga de conteúdo e todos afirmaram que o nível matemático e de interpretação dos alunos chega muito baixo no ensino médio, logo demandaria um grande esforço. Com relação aos recursos usados em sala de aula, alguns professores mencionaram que o mais usado é o livro didático e o mesmo é usado como roteiro para fazer os planejamentos e ministrar as aulas e nos livros até então utilizados, não continham o tema, sendo mais um motivo para deixar a FM fora do programa.

Em relação aos resultados obtidos com o teste diagnóstico, tivemos que quase 100% do total dos alunos da turma, não estudaram conceitos ou a Física que envolve a relatividade do tempo e tão pouco ouviram falar nos Físicos que ajudaram a construir a Cinemática Relativística. Sabemos que os elementos base para a Cinemática Relativística (CR) são o tempo e as noções de referenciais e, particularmente neste estudo, houve uma busca pelo ensino histórico e da construção da CR, no teste diagnóstico as questões envolvendo referenciais tiveram um índice com melhores respostas por conta de terem estudado anteriormente como assunto base. Geralmente o processo de ensino aprendizagem da cinemática, referenciais, tempo, espaço e noções básicas de Física podem ser abordadas no 9<sup>a</sup> ano do ensino fundamental.



James C. Maxwell	2,5%
Isaac Newton	75%
Hippolyte Fizeau	0%

Quadro 5.1 - Resultados das respostas da questão 1

Fonte: teste qualitativo

Com base nos dados coletados, podemos fazer algumas observações sobre o conhecimento dos alunos sobre os físicos que contribuíram para a construção da cinemática relativística. É evidente que a grande maioria dos alunos (92.5%) conhece ou ouviu falar de Albert Einstein, o Físico mais famoso se tratando da teoria da relatividade restrita. Aproximadamente 75% dos alunos conhecem ou ouviram falar de Isaac Newton, que embora não tenha contribuído diretamente para a cinemática relativística, suas leis do movimento e a lei da gravitação universal são fundamentais para a compreensão da física clássica. Cerca de 10% dos alunos conhecem ou ouviram falar de Galileu Galilei, que fez contribuições significativas para o desenvolvimento da física clássica, embora não tenha participado diretamente na construção da cinemática relativística, mas usamos Galileu como referência para a relatividade clássica. Apenas 2.5% dos alunos conhecem ou ouviram falar de James C. Maxwell, cujas equações do eletromagnetismo foram fundamentais para a unificação da eletricidade e do magnetismo, e tiveram um papel crucial na formulação da teoria da relatividade. Os demais físicos listados (Henri Poincaré, Albert A. Michelson, Hendrik Lorentz, Fitzgerald, Edward Williams Morley e Hippolyte Fizeau) não são amplamente reconhecidos pelos alunos, o que pode indicar uma falta de conhecimento histórico sobre suas contribuições para a cinemática relativística.

Em resumo, os dados sugerem que os alunos têm um bom conhecimento sobre Albert Einstein e um conhecimento razoável sobre Isaac Newton, mas há uma falta de familiaridade com outros físicos que também desempenharam papéis importantes na construção da cinemática relativística. Isso destaca a importância de uma educação mais abrangente sobre a história da física e os principais contribuidores para o desenvolvimento das teorias fundamentais da física moderna.

A pergunta número dois é sobre referenciais, o uso da mesma foi mais para saber sobre se o ensino de cinemática e referenciais foi significativo e ainda estava vivo na mente dos alunos.

2) Sabendo que a Terra gira no sentido Leste, imagine que uma aeronave está em um ponto do planeta na linha do equador e precisa chegar no ponto oposto ainda na linha do equador. Qual seria o trajeto com tempo mais curto, ir pelo sentido leste (mesmo sentido da Terra) ou no sentido oeste (sentido contrário ao da rotação terrestre) ?

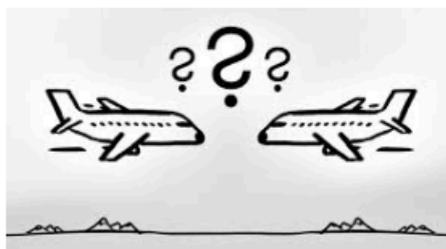


Figura 5.2 - Pergunta 02 do teste diagnóstico

Fonte - próprio autor

Dos 40 alunos que responderam a pergunta, impressionantes 36 (ou 90%) acertaram a resposta. Isso sugere um bom entendimento por parte da maioria dos alunos sobre referenciais e também sobre o movimento de rotação da Terra e como isso influencia o tempo de viagem de uma aeronave.

O fato de que a grande maioria dos alunos acertou a resposta correta pode indicar que o ensino da cinemática clássica, tema que foi pré-requisito para a Cinemática Relativística, foi fundamental e significativo. Acaba sendo um bom indicativo do progresso educacional e da capacidade dos alunos de compreender e aplicar conhecimentos repassados.

A terceira pergunta era bem específica e curta, apenas para marcar sobre qual é a teoria Física que melhor descreve o movimento em altas velocidades, velocidades próximas ou igual a velocidade da luz.

- 3) Qual é a principal teoria da física que descreve os movimentos em altas velocidades, velocidades próximas ou igual a velocidade da luz?
- a) Cinemática Clássica
  - b) Cinemática Relativística
  - c) Cinemática Quântica
  - d) Cinemática Newtoniana

Figura 5.3 - pergunta 03 do teste diagnóstico

Fonte - Próprio autor

Deve ser lembrado que este teste diagnóstico foi realizado bem antes da aplicação do produto educacional. Até então, possivelmente os alunos nunca estudaram temas da Relatividade Restrita, é bem provável que tenham visto apenas em filmes, no entanto, sabemos que os filmes pouco utilizam termos científicos. Nessa pergunta, apenas 20% (oito alunos) responderam e apenas dois marcaram a letra “b”, os outros seis marcaram a letra “a”. Fica claro o quanto os termos Físicos são pouco vistos na sala de aula e praticamente improvável de serem vistos no dia-a-dia.

A quarta pergunta também era específica e curta, mas era sobre conhecimento da Relatividade Restrita.

- 4) De acordo com a teoria da relatividade restrita, o que acontece com o tempo quando um objeto se move em alta velocidade?
- a) O tempo não sofre efeito algum.
  - b) O tempo passa mais devagar.
  - c) O tempo passa mais rápido.
  - d) O tempo se torna irrelevante.

Figura 54 - Pergunta 04 do teste diagnóstico

Fonte - Próprio autor

Essa questão, apesar de parecer simples e não tão relevante, mostrou o quanto a mente da maioria dos alunos ainda é bastante clássica, totalmente justificável, afinal, nunca tiveram contato mais direto com estudos de Física Moderna.

Alternativas	Porcentagem %
a) O tempo não sofre efeito algum.	77,5%
b) O tempo passa mais devagar.	5%
c) O tempo passa mais rápido.	17,5%
d) O tempo se torna irrelevante.	0%

Quadro 5.2 - Resultados da questão 4

Fonte: teste qualitativo

Em relação à alternativa “a” o tempo não sofre efeito algum, a maioria esmagadora dos alunos (31 de 40, ou 77.5%) escolheu esta opção. Isso sugere que uma parcela significativa da turma não compreende corretamente o conceito da relatividade restrita. É possível que esses alunos não tenham sido expostos ao conceito anteriormente ou não tenham entendido completamente a ideia de que o tempo pode ser afetado pela velocidade.

Já sobre a alternativa “b” o tempo passa mais devagar, apenas 2 dos 40 alunos (5%) escolheram esta opção. Isso indica que uma pequena minoria da turma compreende corretamente o conceito de dilatação do tempo na relatividade restrita. É possível que esses alunos tenham um conhecimento prévio do assunto ou uma compreensão mais profunda dos princípios da relatividade.

E sobre a alternativa “c” o tempo passa mais rápido, 7 dos 40 alunos (17.5%) selecionaram esta opção. Essa resposta reflete um entendimento incorreto do conceito, pois na teoria da relatividade restrita, o tempo passa mais devagar para objetos em alta velocidade, não mais rápido.

Considerando esses resultados, foi observado que a maioria dos alunos escolheu a opção incorreta (letra "a"), indicando uma possível lacuna no entendimento do conceito de

relatividade restrita. Isso sugere a necessidade de revisão e reforço do ensino sobre esse tópico, no caso deste trabalho, uma iniciativa de ensino do tem a fim de garantir que os alunos compreendam os princípios fundamentais da física moderna. Além disso, é importante fornecer exemplos e analogias que ajudem os alunos a visualizar e entender melhor os conceitos abstratos da relatividade.

As questões 5 (cinco). 6 (seis). 7 (sete), 8 (oito) e 9 (nove) são para identificar se são verdadeiras ou falsas e No conjunto geral, as questões abordam os princípios e conceitos fundamentais da teoria da Relatividade Restrita, elas tratam de temas como a impossibilidade de um objeto com massa alcançar ou exceder a velocidade da luz, a dilatação temporal e do comprimento, a invariância da velocidade da luz em todos os referenciais, e a aplicação da relatividade restrita a objetos em diferentes faixas de velocidade. Esses conceitos são essenciais para entender como o espaço, o tempo e as leis da física se comportam em altas velocidades e em situações extremas, e são fundamentais para diversas áreas da física teórica e aplicada.

Uma observação sobre essas questões, é que os alunos tiveram dificuldade para interpretar, então foi necessário explicar o que cada uma estava expondo, as explicações foram feitas com muito cuidado para não dar respostas e não explicar os processos relacionados à Cinemática Relativística.

---

5) ( ) De acordo com a teoria da relatividade, não é possível para um objeto com massa alcançar ou exceder a velocidade da luz.

6) ( ) A dilatação temporal afirma que um observador em movimento perceberá o tempo passando mais devagar em relação a um observador em repouso.

7) ( ) A dilatação do comprimento é um efeito que faz com que um objeto em movimento se contraia na direção do movimento.

8) ( ) A velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais, independentemente da velocidade da fonte emissora de luz.

9) ( ) A relatividade restrita só se aplica a objetos que se movem a velocidades próximas à da luz; para objetos em movimento lento, os efeitos são insignificantes.

Figura 5.5 - Questões do teste diagnóstico

Fonte - Próprio autor

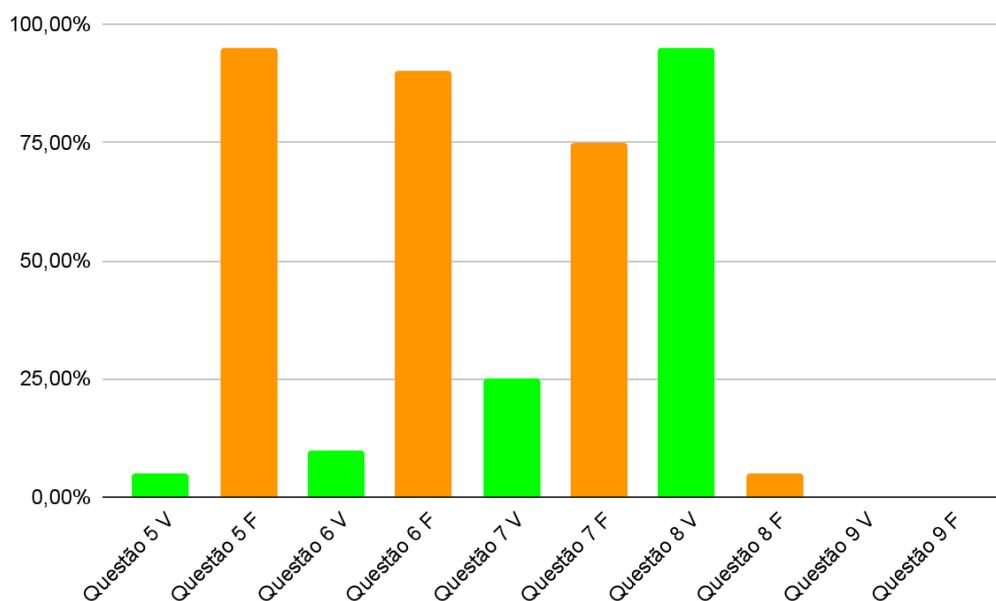


Gráfico 5.1: Respostas das questões 5, 6, 7, 8 e 9

Fonte: dados obtidos no teste diagnóstico

O gráfico (5.1) mostra o percentual das questões assinaladas como verdadeiras ou falsas. Em relação à questão 9 (nove), apenas quatro alunos responderam, então foi considerado como 0% (zero por cento) tanto para verdadeira ou falsa. Não fugindo muito do que foi observado nas questões anteriores, há muitas falhas na compreensão dos conceitos relacionados à teoria da relatividade entre os alunos, especialmente em relação à dilatação temporal e do comprimento. A compreensão da constância da velocidade da luz parece ser melhor, com a maioria dos alunos respondendo corretamente.

Sobre as questões dez, onze, doze, treze e quatorze, houve uma grande quantidade de alunos que optaram por não responder, talvez por se tratarem de questões discursivas, sem opções de respostas, sendo assim, exigiam um pouco mais da capacidade de raciocínio em relação ao tema. Tais questões foram inseridas para aumentar a busca por conhecimento prévio.

- 10) O que é velocidade para você? Use suas palavras para explicar da melhor forma que puder.
- 11) Qual é a coisa que você imagina que possa ser mais rápida?
- 12) O que te faz pensar que essa seja a coisa mais rápida?
- 13) - Imagine que você esteja no início de uma subida (uma ladeira). Faça um desenho de como você enxergaria com seus olhos a pista na ladeira.
- 14) Agora imagine que você esteja num helicóptero que sobrevoa a mesma ladeira bem alto. Faça um outro desenho de como você enxergaria com seus olhos a pista na ladeira
- Ativar o Wi-Fi

Figura 5.6 - Questões 10, 11, 12, 13 e 14 do teste diagnóstico

Fonte - Próprio autor

No Quadro (5.3), apresentamos algumas respostas fornecidas pelos alunos.

Pergunta 10: O que é velocidade para você? Use suas palavras para explicar da melhor forma que puder.	
Velocidade pra mim é tudo aquilo que se move ou passa rápido.	É quando algo está se movendo muito rápido.
É quando algo está muito rápido.	É algo que passa rápido.
Velocidade pode ser um objeto rápido.	Eu acho que para mim e para algumas pessoas seja a luz.
Para mim é algo bastante rápido	É quando uma coisa vai de um lugar para o outro bem rápido.
É o impulso sobre algo	Algo rápido, chega em lugares em menos

	tempo
--	-------

Quadro 5.3 - Conceito de velocidade fornecido pelos alunos

Fonte - Dados obtidos no teste diagnóstico

A expressão do que sabem sobre velocidade é superficial e ligada a objetos aparentemente sem se dar conta de referenciais. No todo, as respostas dos alunos destacam uma compreensão geral de que a velocidade está associada ao movimento rápido. No entanto, muitas das respostas são vagas e não fornecem uma definição precisa ou completa do conceito de velocidade. Algumas respostas sugerem associações interessantes, como a velocidade sendo atribuída à luz, mas essas associações não são explicadas em detalhes.

A pergunta onze, era mais simples e objetiva, a maioria das respostas diziam ser a luz, Os alunos parecem estar cientes de que a luz é frequentemente considerada como a entidade mais rápida, de acordo com a teoria da relatividade Restrita, que postula que a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal. Provavelmente a maioria dos alunos já foi exposta à ideia de que a luz é a entidade mais rápida, seja na escola, em livros ou na mídia. Essa resposta pode refletir a influência do conhecimento prévio sobre física e ciência popularizada. A predominância da resposta "luz" também pode indicar uma falta de imaginação ou consideração de outras possibilidades por parte dos alunos. Isso pode ser resultado de uma compreensão limitada do universo físico ou simplesmente da falta de exposição a conceitos alternativos.

A pergunta doze, complementava a anterior (questão 11): O que te faz pensar que seja a coisa mais rápida?

Pergunta 12: O que te faz pensar que seja a coisa mais rápida?	
Não sei, apenas pensei nisso	É bastante divulgado que a velocidade da luz é maior.

Já ouvi falar.	Porque passa muito rápido.
Vi em vídeos na internet	Sempre ouvi falar que a luz é a coisa mais rápida.
Assisti em um filme, acho que é verdade.	
O Sr. falou no primeiro dia de aula	

Quadro 5.4 - Pergunta doze do teste diagnóstico

Fonte - Dados obtidos no teste diagnóstico

Não houveram tantas respostas nesta questão, mas as poucas que que tiveram, eram bem parecidas. Tais respostas indicam uma variedade de influências, incluindo informações divulgadas, observações pessoais e mídia digital, mas muitas delas refletem uma aceitação passiva da ideia de que a luz é a coisa mais rápida, sem uma compreensão aprofundada dos conceitos físicos subjacentes. Isso destaca a importância do papel dos educadores na promoção da compreensão crítica e fundamentada dos alunos sobre conceitos científicos.

As questões treze e quatorze são úteis para avaliar a compreensão dos alunos sobre perspectivas visuais e para introduzir conceitos fundamentais da relatividade restrita, como a relatividade da simultaneidade e a relatividade de pontos de vista em movimento.

13) - Imagine que você esteja no início de uma subida (uma ladeira). Faça um desenho de como você enxergaria com seus olhos a pista na ladeira.

14) Agora imagine que você esteja num helicóptero que sobrevoa a mesma ladeira bem alto. Faça um outro desenho de como você enxergaria com seus olhos a pista na ladeira

Figura 5.7 - Questões 13 e 14 do teste. As últimas questões.

Fonte - Próprio autor

De todas as questões, as duas últimas (questões 13 e 14), foram as que menos tiveram respostas, o maior número de justificativas eram sobre a falta de habilidade de desenhar. Sendo assim, ficou difícil fazer a análise da turma para essas questões, o quadro a seguir (quadro 4) tem algumas das respostas apresentadas.

## **5.2 - Análise da Avaliação Formativa e Diagnóstica de Graham N. W. Sadler**

A abordagem de avaliação formativa e diagnóstica proposta por Graham N. W. Sadler foi escolhida por sua projeção feita para ajudar a entender melhor o progresso dos alunos e identificar áreas em que podem precisar de mais apoio. Aqui estão algumas diretrizes que serviram de apoio para analisar os resultados das avaliações feitas durante a aplicação do produto:

*1. Examinar os padrões de desempenho:* Análise dos resultados para identificar padrões no desempenho dos alunos. Isso pode incluir identificar áreas em que a maioria dos alunos teve sucesso e áreas em que houve dificuldades generalizadas.

*2. Identificar lacunas de aprendizagem:* Procurar por lacunas de aprendizagem nos resultados. Isso pode ser feito comparando as respostas dos alunos com os objetivos de aprendizagem e identificando áreas em que os alunos demonstraram menor compreensão ou habilidade.

*3. Avaliar a compreensão conceitual:* Análise das respostas dos alunos para avaliar sua compreensão dos conceitos fundamentais. Isso pode envolver identificar conceitos

que foram compreendidos corretamente pela maioria dos alunos e conceitos que foram mal compreendidos ou mal interpretados.

4. *Identificar padrões de erro*: Procurar por padrões nos erros cometidos pelos alunos. Isso pode incluir erros conceituais comuns, erros de interpretação ou dificuldades com habilidades específicas.

5. *Avaliar a diversidade de respostas*: Considere a diversidade de respostas dadas pelos alunos. Isso pode incluir identificar respostas que demonstram uma compreensão profunda do material, bem como respostas que indicam confusão ou mal-entendidos.

6. *Considerar o contexto*: Leve em consideração o contexto em que a avaliação foi administrada, incluindo fatores como o tempo disponível para completar a avaliação, o formato das questões e quaisquer outras variáveis que possam ter influenciado os resultados.

7. *Usar os resultados para informar a instrução*: Utilizar os resultados da avaliação para informar a instrução futura. Isso pode incluir adaptar a instrução para abordar lacunas de aprendizagem identificadas, fornecer feedback específico aos alunos e ajustar as atividades e avaliações futuras para atender às necessidades dos alunos.

Em suma, a análise dos resultados da avaliação formativa e diagnóstica de Sadler envolve examinar padrões de desempenho, identificar lacunas de aprendizagem, avaliar a compreensão conceitual e usar os resultados para informar a instrução futura. Essa abordagem ajuda a entender melhor o progresso dos alunos e a fornecer suporte individualizado conforme necessário.

### **5.2.1 - Análise da Avaliação Formativa na primeira aula**

Na primeira aula, o conteúdo foi dedicado a explorar a Relatividade Restrita sob uma perspectiva histórica, proporcionando uma visão detalhada do seu desenvolvimento ao longo do tempo. A atividade inicial consistiu em um debate, no qual a turma foi dividida em pequenos grupos para facilitar a interação e a troca de ideias. Este debate seguiu um rumo um tanto inesperado: em vez de apenas expressarem suas opiniões sobre o tema, os alunos se engajaram ativamente, fazendo perguntas para esclarecer suas dúvidas. Essa abordagem permitiu um aprofundamento maior no entendimento da matéria, estimulando uma discussão mais rica e dinâmica.

A Atividade pedida para fazer em casa foi uma dissertação, como essa dissertação não teve nenhuma supervisão próxima, é possível que os primeiros textos redigidos tenham sido compartilhados com o restante da turma, pois ao ler as redações, fica muito claro os pontos em comum nos textos, a maioria bem parecidos. É perceptível também que para escrever o texto pedido para casa, os alunos usaram e abusaram de outros textos encontrados na internet, isso ficou claro, pois nas dissertações a elementos que não foram explicados e comentados na primeira aula. Todas as dissertações ficaram bem parecidas, então foram selecionadas duas para explicar os textos dos alunos,

As figuras (5.8) e (5.9) são textos feitos por alunos sobre a atividade prática para casa.

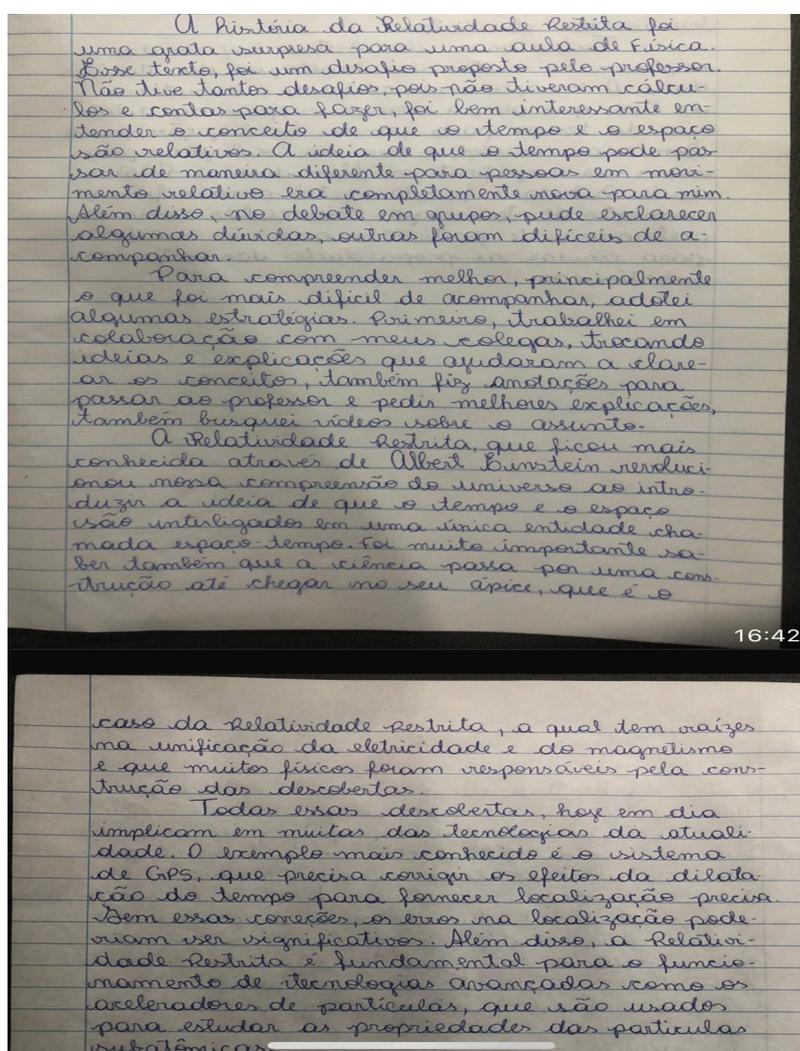


Figura 5.8 - Dissertação

Fonte - Retirada do produto educacional

Durante a primeira aula sobre a história da Relatividade  
 de Einstein, aprendemos bastante. No fim da aula, desenvolvemos  
 uma atividade de pesquisa que nos pediu para investigar uma  
 questão sobre os desenvolvimentos que ocorreram durante a atividade  
 prática, as interações que tivemos para superá-la e como a  
 teoria da Relatividade Einsteiniana influenciou nossa compreensão do  
 universo, incluindo suas implicações na vida cotidiana.

Os desenvolvimentos que ocorreram durante a atividade prática  
 foram principalmente relacionados à compreensão dos conceitos  
 complexos da Relatividade Einsteiniana. Foi uma experiência sobre que  
 Einstein não descobriu tudo sozinho. Também, a ideia de que o  
 tempo e o espaço não são absolutos, mas relativos, foi muito  
 difícil de entender. Além disso, o debate em grupo foi  
 muito útil e trouxe à tona muitas perguntas que eu não  
 havia pensado imediatamente.

Para superar esses desafios, adotei algumas estratégias  
 para ajudá-lo. Primeiramente, fiz anotações detalhadas durante  
 a aula e depois revisei o material de estudo várias vezes  
 para melhorar meu entendimento. Em seguida, participei  
 bastante em perguntas feitas e as explicações fornecidas no  
 debate, o que me ajudou a esclarecer conceitos complexos com a  
 ajuda dos colegas e do professor. Por fim, utilizei recursos ad-  
 icionais, como vídeos educacionais e artigos online, que explica-  
 ram a Relatividade Einsteiniana de maneiras diferentes, o que faci-  
 litou meu entendimento, mas na pesquisa, muitas vezes tive  
 dúvidas e perguntas.

A Teoria da Relatividade Einsteiniana revolucionou a com-  
 preensão do universo. Ela mostrou que as leis da física  
 não são as mesmas para todos os observadores que não estão  
 acelerando e que a velocidade da luz é constante, independen-  
 temente do movimento do observador ou do ponto de luz.

Isso levou a conclusões surpreendentes de que tempo  
 espaço não são independentes e que o tempo pode "dilatarse"  
 ou "contrair" dependendo da velocidade relativa dos observadores.

As implicações da Relatividade Einsteiniana na vida  
 cotidiana não são imensas. Por exemplo, o funcionamento pre-  
 ciso dos relógios de GPS depende dos ajustes feitos para  
 as diferenças de velocidade da Relatividade Einsteiniana, o que nos ha-  
 bitamos a não percebermos em altas velocidades sem perceber  
 isso. Além disso, a Teoria tem aplicações em tecnologias  
 modernas como aceleradores de partículas e até na com-  
 preensão de fenômenos astronômicos como buracos negros  
 e expansão do universo.

Em resumo, apesar dos desafios iniciais, a ati-  
 vidade prática e o debate em grupo foram fundamentais  
 ao meu aprendizado. As interações que utilizei me ajuda-  
 ram a superar as dificuldades e a apreciar a profun-  
 didade da Teoria da Relatividade Einsteiniana e suas implicações  
 tanto no campo científico quanto na nossa vida diária.

Figura 5.9 - Dissertação

Fonte - Retirada do produto educacional

## 5.2.2 - Análise da Avaliação Formativa na segunda aula

A atividade prática analisada, possuía as seguintes questões:

1 - Um astronauta viaja em uma nave espacial que se move a 80% da velocidade da luz ( $0,8c$ ) em relação à Terra. Se ele cronometrar 10 horas em seu relógio de bordo, quanto tempo terá passado para um observador na Terra?

2 - A vida média de uma partícula em repouso é de 2 microsegundos. Se essa partícula se move a 99% da velocidade da luz ( $0,99c$ ) em relação a um laboratório, qual será a vida média observada dessa partícula no laboratório?

3 - Uma nave espacial viaja para uma estrela que está a 4 anos-luz de distância da Terra a uma velocidade de  $0,6c$ . Quanto tempo a viagem levará conforme medido por um observador na Terra e quanto tempo será medido por um passageiro na nave?

4 - Dois eventos ocorrem em uma nave espacial que se move a  $0,75c$  em relação à Terra. De acordo com um relógio na Terra, os eventos ocorrem com 10 minutos de intervalo. Qual é o intervalo de tempo entre esses eventos conforme medido por um relógio na nave espacial?

Por ter conhecimento da turma, os grupos foram divididos buscando distribuir os alunos com melhor domínio matemático e interpretativo, dessa forma, eles puderam ajudar aqueles com maiores dificuldades. Essa atividade pode ser considerada uma das mais produtivas, pois quase todos os estudantes conseguiram compreender melhor o tema através dos exercícios, até regras básicas matemáticas foram sanadas. Uma observação a ser feita, é que a primeira questão foi resolvida como exemplo.

Todos os grupos conseguiram resolver as quatro questões com 100% de acerto, no entanto é importante deixar claro que a maioria necessitou da ajuda do professor (Eu) devido a dificuldades matemáticas significativas. As principais áreas de dificuldade incluíram a aplicação correta da fórmula da dilatação temporal, especialmente no cálculo do fator de Lorentz, e a manipulação de números decimais, frações e números irracionais. Além disso, muitos alunos tiveram problemas ao lidar com unidades de tempo em escalas pequenas, como microsegundos, e na conversão entre diferentes unidades. Apesar de parecer compreenderem os conceitos teóricos da Relatividade Restrita, a execução matemática foi um obstáculo comum. Isso revela uma necessidade de reforço nas habilidades matemáticas básicas e avançadas, bem como na aplicação prática de conceitos físicos complexos, para que os alunos possam ganhar confiança e independência na resolução de problemas desse tipo.

Após a entrega das questões sobre dilatação temporal, um debate foi realizado para discutir as experiências dos alunos. Como é sabido, todos os grupos conseguiram resolver os problemas com a assistência do professor, evidenciando uma compreensão teórica adequada da Relatividade Restrita. No entanto, a discussão mostrou o que foi percebido durante a realização da atividade, que a maioria enfrentou dificuldades significativas em áreas matemáticas, como a aplicação correta da fórmula da dilatação temporal, o cálculo do fator de Lorentz, e a manipulação de decimais e números irracionais, também houve desafios ao lidar com unidades de tempo pequenas e suas conversões. O debate permitiu que os alunos refletissem sobre suas dificuldades e compartilhassem estratégias de superação, destacando a necessidade de reforçar tanto as habilidades matemáticas quanto a aplicação prática dos conceitos físicos. O feedback individualizado imediato foi crucial para destacar realizações e sugerir melhorias específicas, visando capacitar os alunos a resolver problemas complexos de forma mais independente no futuro.

### **5.2.3 - Análise da Avaliação Formativa na terceira aula**

Na aula três, os alunos utilizaram simulações sobre dilatação temporal e observou-se um progresso significativo no entendimento dos conceitos. As simulações permitiram que os alunos visualizassem de forma dinâmica como a dilatação temporal afeta relógios em diferentes velocidades relativas, complementando a teoria abordada nas aulas anteriores. A utilização de recursos visuais e interativos facilitou a absorção do conhecimento, tornando os conceitos abstratos mais concretos e acessíveis. Durante a aula, a avaliação contínua do desempenho dos alunos permitiu identificar rapidamente quaisquer áreas de dificuldade, oferecendo feedback imediato e direcionado. Os alunos mostraram grande engajamento e curiosidade, fazendo perguntas pertinentes e realizando experimentos virtuais que reforçaram a aplicação prática da Relatividade Restrita. O feedback individualizado destacou não apenas as áreas de sucesso, mas também forneceu sugestões específicas para aprimoramento, consolidando o aprendizado e preparando os alunos para resolver problemas complexos de forma autônoma. Em resumo, a combinação de simulações interativas e avaliação formativa contínua resultou em uma aula altamente eficaz, com os alunos demonstrando uma compreensão profunda e aplicada da dilatação temporal.

As simulações levaram um tempo significativamente curto, até mais do que o planejado, assim a turma teve um tempo mais folgado para resolver um questionário passado em sala de aula. Nessa aula, a opção foi por não ter o debate, pois durante a realização das

simulações, muitas dúvidas foram esclarecidas. Sobre o questionário, a primeira pergunta era sobre o conceito construído da Cinemática Relativística, o quadro (5.5).A mostra algumas das respostas

"É o estudo do movimento de objetos a velocidades próximas à velocidade da luz"	"É a velocidade máxima com que a informação ou a matéria pode viajar no universo"
"É o fenômeno onde o tempo passa mais lentamente para um objeto em movimento rápido em comparação com um objeto em repouso."	"É a teoria que descreve as relações entre espaço e tempo para objetos que se movem a velocidades constantes, especialmente aquelas próximas à velocidade da luz."
"É a redução do comprimento de um objeto medido por um observador que se move em alta velocidade em relação ao objeto."	"É o conceito de que dois eventos que ocorrem simultaneamente em um referencial podem não ser simultâneos em outro referencial que esteja se movendo em relação ao primeiro."
"É uma expressão matemática usada para calcular a dilatação temporal e a contração do espaço em velocidades relativísticas"	"É a medida que combina distâncias espaciais e temporais entre eventos e é invariável para todos os observadores, independentemente de seu movimento relativo."
"É um referencial onde um observador está em repouso ou em movimento uniforme, sem aceleração, e as leis da física são as mesmas."	"É o princípio que afirma que massa e energia são as mesmas coisas"

Quadro 5.5 - a definição de cinemática relativística. Respostas:

Fonte - Avaliação formativa diagnóstica

As definições fornecidas pelos alunos do primeiro ano sobre a cinemática relativística demonstram uma compreensão sólida e essencial dos conceitos fundamentais da teoria da relatividade restrita. Eles conseguem explicar de maneira clara e concisa fenômenos complexos como dilatação temporal, contração do espaço, e a importância do fator de Lorentz, refletindo um bom entendimento das implicações práticas e teóricas dos movimentos a velocidades próximas à da luz. As explicações sobre a velocidade da luz, simultaneidade relativa, e a equivalência massa-energia mostram que os alunos captaram a essência dos princípios relativísticos de Einstein.

A questão número dois pedia para descrever os principais efeitos da relatividade restrita discutidos durante a aula. A maioria dos alunos anotou os efeitos, anotar os pontos principais foi uma das estratégias utilizadas pela turma para “superar” os obstáculos e fazer a aprendizagem se tornar significativa, sendo assim, quase 100% (cem por cento) da turma fez a mesma resposta e correta. Por opção, foi decidido deixar essa análise de fora.

A terceira questão perguntava como a dilatação do tempo afeta o movimento de um objeto em velocidades próximas à velocidade da luz. O quadro (5.6) apresenta algumas das melhores respostas.

<p>"Quando um objeto se move a velocidades próximas à da luz, o tempo para esse objeto passa mais devagar em comparação com um observador em repouso. Isso significa que o relógio do objeto em movimento vai marcar menos tempo do que o relógio do observador."</p>	<p>"A dilatação do tempo faz com que um objeto em movimento rápido experimente o tempo de forma diferente. Para alguém fora do objeto, parece que o tempo está passando mais lentamente dentro do objeto."</p>	<p>"Se um objeto viaja quase à velocidade da luz, os eventos a bordo desse objeto, como a passagem do tempo, ocorrem mais lentamente quando vistos por um observador em repouso. É como se o tempo desacelerasse para o objeto em movimento."</p>
<p>"A dilatação do tempo afeta o movimento de um objeto"</p>		

<p>em altas velocidades fazendo com que o tempo medido dentro do objeto passe mais devagar em relação ao tempo medido por alguém parado. Isso é crucial em viagens espaciais de alta velocidade."</p>	<p>"Em velocidades próximas à da luz, a dilatação do tempo faz com que os processos no objeto em movimento, como o envelhecimento, ocorram mais lentamente comparados a um observador em repouso."</p>	<p>"A dilatação do tempo significa que o tempo se estende para um objeto que se move rapidamente. Por exemplo, se uma nave espacial se move a uma velocidade altíssima, o tempo dentro da nave passa mais devagar em relação a um observador na Terra."</p>
<p>"Para um objeto em movimento quase à velocidade da luz, o tempo passa de forma diferente do que passa para um observador parado. Essa diferença é a dilatação do tempo, onde o tempo desacelera no objeto em movimento."</p>	<p>"A dilatação do tempo faz com que, em velocidades próximas à da luz, um objeto em movimento experimente o tempo mais devagar do que um observador parado. Isso é devido ao fator de Lorentz, que ajusta a passagem do tempo."</p>	<p>"A dilatação do tempo afeta o movimento de um objeto em altas velocidades fazendo com que o tempo pareça passar mais devagar dentro do objeto em movimento em relação a alguém que está em repouso. É uma consequência direta da relatividade restrita."</p>

Quadro 5.6 - Dilatação do tempo afetando o movimento de um objeto em velocidades próximas à velocidade da luz.

Fonte - Avaliação formativa diagnóstica

Iniciando a análise, é perceptível que as respostas são bem parecidas, a possível explicação é por conta de os alunos participarem em grupos na maior parte do tempo. Também é possível perceber que cada resposta mostra uma compreensão básica e correta do conceito de dilatação do tempo e sua relação com o movimento de objetos em velocidades relativísticas, embora com variações na expressão e nos exemplos utilizados.

A questão número quatro pedia uma resposta de cunho mais pessoal, pois indagava sobre a maior descoberta ou insight que o aluno teve sobre os fenômenos relativísticos. O quadro (5.7) demonstra algumas das respostas.

<p>"A maior descoberta para mim foi entender como o tempo realmente desacelera para objetos que se movem em altas velocidades. Antes, nem imaginava esse fato"</p>	<p>"Fiquei surpreso ao conhecer e entender o fator de Lorentz. Também ver os cálculos aplicados em simulações me ajudou a entender melhor a relação entre velocidade e dilatação do tempo."</p>	<p>"Entendi a simultaneidade relativa. Ver que dois eventos simultâneos em um referencial podem não ser simultâneos em outro foi um grande insight para mim."</p>
<p>"Meu maior insight foi perceber que, a velocidades próximas à da luz, não só o tempo passa mais devagar, mas as distâncias também se contraem. Isso mudou completamente minha visão sobre viagens espaciais vistas nos filmes"</p>	<p>"Descobri que a relatividade não é apenas uma teoria que fica só no papel, mas que tem implicações reais como a forma como os satélites GPS precisam corrigir a dilatação do tempo para fornecer dados precisos."</p>	<p>"A maior descoberta foi compreender como a dilatação do tempo afeta a percepção do envelhecimento. Por exemplo, um astronauta que viaja em alta velocidade envelhece mais devagar comparado com alguém na Terra."</p>
<p>"Fiquei impressionado com a ideia de que a velocidade da luz é um limite absoluto que não pode ser ultrapassado e como isso afeta todos os aspectos da física relativística."</p>	<p>"O maior insight foi ver como a teoria da relatividade se aplica em tecnologias do dia a dia, como o GPS, e entender que sem essas correções relativísticas, esses sistemas não funcionam corretamente."</p>	<p>"Descobri que, em altas velocidades, a massa de um objeto aumenta, o que foi algo novo para mim e me fez perceber a interconexão entre energia, massa e velocidade."</p>

Quadro 5.7 - Sobre a maior descoberta ou insight para os alunos

## Fonte - Avaliação formativa diagnóstica

Cada resposta demonstra como os alunos internalizaram diferentes aspectos da relatividade e refletiram sobre sua aplicação prática e teórica.

A questão seis, também tinha um caráter mais pessoal, como a utilização do software contribuiu para a compreensão dos conceitos discutidos durante a aula. As respostas foram bem interessantes, o quadro (5.8) apresenta algumas das respostas.

<p>"O software ajudou muito porque pude ver em tempo real como a dilatação do tempo e a contração do espaço funcionam. Isso tornou os conceitos mais claros e fáceis de entender."</p>	<p>"Usar o software foi essencial para a minha compreensão. Ele permitiu que eu visualizasse as fórmulas em ação, o que facilitou muito o entendimento dos fenômenos relativísticos."</p>	<p>"O software contribuiu bastante porque transformou conceitos em algo que eu podia manipular e observar. Isso fez com que as ideias ficassem muito mais claras para mim."</p>
<p>"Eu achei que o software foi muito útil porque me permitiu experimentar diferentes velocidades e ver diretamente como a teoria funciona, algo que é difícil de imaginar"</p>	<p>"A utilização do software foi fundamental para minha compreensão, pois ele permite simular cenários que seriam impossíveis de reproduzir na vida real, tornando os conceitos de relatividade mais fáceis de visualizar"</p>	<p>"O software contribuiu enormemente, pois ele demonstrou como as equações funcionam de uma maneira visual. Isso me ajudou a entender melhor a dilatação do tempo e a contração do espaço."</p>
<p>"Eu achei o software muito útil porque ele mostrou como as variáveis mudam em tempo real. Isso me ajudou a ver a relação entre velocidade, tempo e espaço"</p>	<p>"Usar o software foi uma experiência reveladora. Ele facilitou a visualização dos efeitos da relatividade, algo que é muito difícil de captar apenas lendo ou ouvindo"</p>	<p>"O software foi uma grande ajuda, pois ele permitiu que eu testasse diferentes hipóteses e visse os resultados imediatos. Isso reforçou meu entendimento"</p>

de uma maneira que faz mais sentido."	sobre o assunto."	de como a relatividade afeta o tempo e o espaço."
---------------------------------------	-------------------	---

Quadro 5.8 - Uso do software na contribuiu para a compreensão dos conceito

Fonte - Avaliação formativa diagnóstica

As respostas dos alunos sobre a utilização do software para a compreensão dos conceitos discutidos durante a aula revelam uma percepção amplamente positiva e um consenso sobre sua eficácia no aprendizado. Quase todos os alunos destacaram que o software ajudou a tornar conceitos abstratos e complexos da relatividade mais acessíveis e compreensíveis. A visualização dos efeitos da dilatação do tempo e contração do espaço em tempo real proporcionou uma experiência de aprendizado mais tangível e interativa, permitindo que os alunos explorassem diferentes cenários e observassem diretamente as implicações da teoria da relatividade restrita.

No final da terceira aula, foi proposto um desafio, resolver uma questão do livro de Física - Young and Freedman - Vol 4-Ed 12ª - Capítulo 37 Exercícios - Ex. 11. Nenhum dos alunos conseguiu completar o desafio. Na aula seguinte a questão foi resolvida e servindo de exemplo de fixação.

#### 5.2.4 - Aula número quatro, análise do qualitativo

A primeira pergunta trata do desenvolvimento da Relatividade Restrita, a importância de Albert Einstein, o físico mais famoso ligado à teoria. Sem a introdução das ideias de Einstein, a teoria da Relatividade Restrita teria sido desenvolvida?

No quadro (5.9) estão algumas das respostas feitas pelos alunos. É importante frisar que 95% (trinta e oito) dos alunos responderam a esta pergunta, no geral, com palavras diferentes, as respostas foram bem próximas, ou seja, basicamente tinham a mesma interpretação.

"Acho que a teoria poderia ter sido desenvolvida por outra pessoa, mas talvez demorasse mais tempo. Outros cientistas da época, como Hendrik Lorentz e Henri Poincaré, já estavam trabalhando em	"Se Einstein não tivesse publicado a teoria, outro Físico poderia ter chegado a conclusões semelhantes. Agora entendi que a ciência é um esforço colaborativo e muitas descobertas acontecem
--	--

conceitos semelhantes."	simultaneamente."
"Penso que sim, a teoria teria sido desenvolvida eventualmente porque a ciência progride com base nas descobertas anteriores. Outros cientistas estavam perto de fazer conexões semelhantes."	"A teoria da relatividade restrita poderia ter sido descoberta mais tarde por outros cientistas, porque a física estava evoluindo naquela direção."
"A teoria teria sido desenvolvida eventualmente porque as questões que ela resolve estavam sendo estudadas por vários cientistas. Einstein teve a visão de juntar tudo isso."	"Sim, a teoria poderia ter sido desenvolvida por outros, como Lorentz e Poincaré, que já estavam trabalhando em teorias relacionadas. A ciência é uma construção coletiva."

Quadro (5.9) - Respostas da questão do teste qualitativo.

Fonte - Dados do teste qualitativo

No quadro (5.9) estão apenas algumas das respostas, mas tais respostas à questão sobre a possibilidade de desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita caso Einstein não tivesse publicado seus trabalhos refletem um entendimento matizado da história e da dinâmica da ciência. A maioria dos alunos reconhece que, embora Einstein tenha sido uma figura central e pioneira na formulação da teoria, o contexto científico da época já contava com contribuições significativas de outros cientistas. Conceitos fundamentais como o éter, a velocidade da luz, e transformações que agora chamamos de Lorentzianas, que são essenciais para a relatividade restrita, já estavam sendo investigados.

Os alunos apontam que a ciência é um esforço coletivo e acumulativo, e que várias descobertas ocorrem simultaneamente ou quase simultaneamente em diferentes partes do mundo devido ao trabalho paralelo de diferentes pesquisadores. Portanto, é provável que a teoria da relatividade restrita teria sido desenvolvida eventualmente, embora possivelmente de forma mais fragmentada e com um avanço mais gradual.

No entanto, alguns alunos ressaltam que Einstein trouxe uma visão única e uma capacidade de unificação que foram cruciais para a rápida aceitação e compreensão da teoria. Sua abordagem inovadora ao tempo e espaço e a forma elegante e clara como apresentou seus

resultados permitiram que a relatividade restrita fosse compreendida e aplicada de maneira mais coesa e abrangente do que poderia ter sido caso outro cientista tivesse feito a descoberta em partes.

Em resumo, as respostas dos alunos indicam que enquanto a Teoria da Relatividade Restrita provavelmente teria sido desenvolvida por outros cientistas da época, a maneira como Einstein formulou e apresentou a teoria teve um impacto significativo na rapidez e na forma como foi aceita e compreendida pela comunidade científica.

A questão número dois buscava a alternativa correta sobre o pensamento do Éter Luminífero no século XX. O quadro (5.10) exhibe as porcentagens das alternativas escolhidas pelos alunos, junto com a pergunta do teste. Um dado importante é que 100% da turma respondeu à questão.

Marque a alternativa que completa o texto: No século XIX, os cientistas acreditavam que a luz precisava de um meio para se propagar, então para desempenhar esse papel pensaram em uma hipótese.

<p>a) O éter luminífero era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.</p>	<p>31 (77,5%) alunos marcaram essa alternativa</p>
<p>b) Uma substância gasosa misteriosa existente era a hipótese que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.</p>	<p>4 (10%) alunos marcaram essa alternativa</p>
<p>c) O Plasma Universal era uma hipotética substância que se acreditava preencher o</p>	

espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.	5 (12,5%) alunos marcaram essa alternativa
d) A Matéria Escura era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.	0 (0%) alunos marcaram essa alternativa

Quadro 5.10 - Questão número dois do teste qualitativo

Fonte - Dados do teste qualitativo

Houve uma alta porcentagem de respostas corretas, indicando que a maioria dos alunos compreendeu bem o conceito histórico discutido nas aulas sobre a propagação da luz antes da teoria da relatividade. No entanto, o fato de que 22,5% dos alunos não responderam corretamente sugere que alguns estudantes ainda têm dificuldades com conceitos históricos e teóricos específicos.

Na tabela, é possível identificar que foram marcadas outras duas respostas as quais não lidas com a devida atenção podem ser confundidas e acabam sendo parecidas com a alternativa “a”, a resposta correta. No geral, a resposta majoritariamente correta é um indicativo positivo do entendimento dos alunos, mas há espaço para melhorar a compreensão universal desses importantes conceitos históricos da física.

A terceira questão é uma retomada ao teste diagnóstico feito antes da aplicação do produto, tal questão trata sobre o conhecimento ou não de físicos. Como essa pesquisa trabalhou a parte histórica, saber se certos físicos fazem parte da aprendizagem significativa é de suma importância, mesmo que seja apenas para identificar nomes conhecidos ou não. O gráfico (5.2) mostra como os alunos responderam a esta questão.

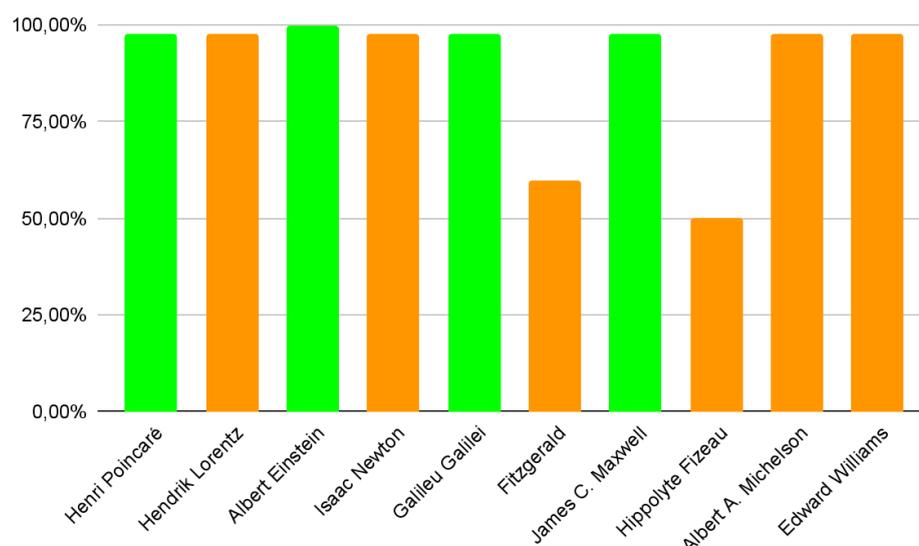


Gráfico 5.2 - Respostas da questão três do teste qualitativo

Fonte - Dados do teste qualitativo

O fato de uma média de 89,25% dos alunos terem marcado todas as alternativas sugere um reconhecimento generalizado dos nomes apresentados como cientistas relevantes mostrados na aplicação do produto. Os alunos parecem estar familiarizados com a história da física e com os principais cientistas que contribuíram para o campo. Deve ser ressaltado que apesar de conhecer os nomes, não significa que os estudantes tenham conhecimento específicos aprofundados de todas as contribuições individuais de cada um.

A quarta questão é uma questão de caráter mais pessoal. A exemplo de outras questões sem alternativa para marcar, nem todos os alunos responderam a essa parte do teste. No quadro (5.11) estão algumas das respostas dadas pelos estudantes.

Em poucas palavras, descreva as vantagens (se houveram) em estudar a história antes de estudar um novo assunto sobre Física?

"Estudar a história ajudou a entender como os conceitos evoluíram e deu uma base

"Aprender sobre os cientistas e suas descobertas, motiva e nos faz valorizar

para novos conhecimentos e até como buscar os novos conhecimentos”	mais os conceitos que estamos estudando.”
"Conhecer a história da física nos mostra os erros e acertos dos cientistas, ajudando a evitar equívocos semelhantes."	"Estudar a história antes nos ajuda a entender o contexto em que as teorias foram formuladas e por que eram necessárias."
"A história nos permite ver como as teorias foram desenvolvidas e testadas, o que nos dá uma melhor compreensão”	"Conhecer o desenvolvimento histórico das teorias nos faz perceber a importância das perguntas e dos problemas que levaram às descobertas."

Quadro 5.11 - Questão quatro do teste qualitativo

Fonte - Dados do teste qualitativo

Estudar a história antes de novos conceitos em física oferece várias vantagens, como fornecer contexto, mostrar a evolução das ideias, motivar os alunos e ajudar a evitar erros passados. As respostas dos alunos do ensino médio refletem uma apreciação dessas vantagens, indicando que a integração da história da ciência no ensino de física é benéfica para um aprendizado mais completo e profundo.

A questão cinco indaga a respeito da importância da história da relatividade restrita no desenvolvimento da física e na nossa compreensão do universo, com o caráter de respostas mais individual e sem alternativas para marcar, bem parecida com a questão quatro, a quinta questão também não teve 100% das respostas, uma quantidade de alunos optou por não responder, no entanto, as respostas dadas surpreenderam bastante, positivamente é claro. O Quadro (5.12) mostra algumas das respostas fornecidas pelos alunos no teste qualitativo.

Qual é a importância da história da relatividade restrita no desenvolvimento da física e na nossa compreensão do universo?	
"A história da relatividade restrita é	"Ela mostrou que as leis da física são as

importante porque revolucionou a física ao introduzir conceitos como a dilatação do tempo e a contração do espaço, mudando a forma como entendemos o movimento e a velocidade."	mesmas para todos os observadores em movimento uniforme e que a velocidade da luz é constante, o que foi uma grande mudança em relação às ideias de Newton."
"Estudar a história da relatividade restrita nos ajuda a ver como a ciência avança ao questionar e melhorar teorias anteriores, mostrando a importância de testar e revisar nossas ideias sobre o universo."	"A relatividade restrita deu uma nova maneira de entender o espaço e o tempo como uma única entidade, o espaço-tempo, o que é fundamental para a ciência"
"Compreender a história da relatividade restrita é crucial porque ela abriu caminho para novas descobertas em física quântica e cosmologia, ajudando a explicar muitos fenômenos"	"Ela mostrou que o tempo e o espaço são relativos e dependem do observador, o que desafia nossa intuição e nos faz repensar nossa percepção do universo."
"Estudar sua história nos ensina sobre o método científico, mostrando como teorias são formuladas, testadas e, às vezes, substituídas por explicações melhores."	"A teoria é fundamental para tecnologias modernas, como GPS e sistemas de comunicação por satélite, que dependem de correções relativísticas para funcionar corretamente."

Quadro 5.12 - Questão quatro do teste qualitativo

Fonte - Dados do teste qualitativo

Por que as respostas surpreenderam? Porque as respostas dos alunos indicam uma compreensão clara da importância da história da relatividade restrita para o desenvolvimento da física e nossa compreensão do universo. Eles reconhecem várias maneiras pelas quais a teoria revolucionou a física. As respostas indicam uma apreciação da importância da história da relatividade restrita, não apenas como uma teoria científica, mas como um exemplo de

como a ciência avança e se aplica ao mundo real. Isso reforça que o ensino de física deve continuar a enfatizar o contexto histórico e a evolução das ideias para enriquecer o entendimento e o interesse dos alunos.

A questão seis não causou surpresas, era uma simples pergunta sobre o que estamos vendo ao olhar para as estrelas se tratando do tempo. Essas “curiosidades” eram as mais interessantes durante as aulas, qualquer explicação envolvendo super velocidades e viagens no tempo, chamava muito a atenção das crianças e era quando os melhores debates rolavam. O gráfico (5.3) representa o percentual das respostas marcadas corretamente.

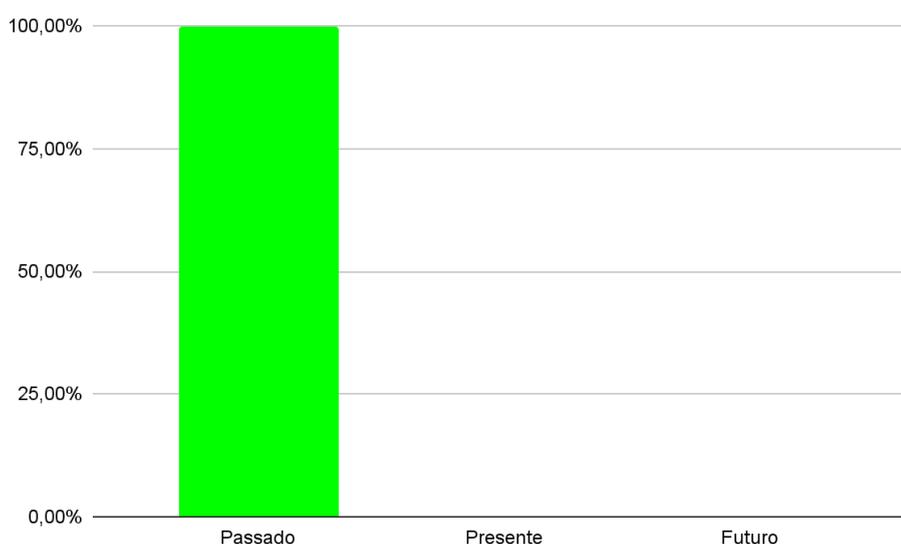


Gráfico 5.3 - Respostas da questão seis do teste qualitativo

Fonte - Dados do teste qualitativo

Por fim a última questão, esta era mais elaborada e técnica, tratava do seguinte problema: (UFRJ, Física 4, P2 - 2011.2, Questão ME06) Um observador na Terra vê uma espaçonave passar com velocidade  $0,5c$ . Na ponta da espaçonave, uma partícula é lançada para trás com velocidade  $0,4c$  em relação à espaçonave. Qual a velocidade da partícula para o observador na Terra?

Para resolver esse problema, a turma foi dividida em grupos, em cada grupo ficou um ou mais alunos com melhor domínio matemático e interpretativo. Todos os grupos tiveram muitos problemas para interpretar a questão, então precisaram de muita invenção, fazendo a análise ao pé da letra, ninguém ou nenhum grupo conseguiu resolver a questão sozinho. Possivelmente houve um exagero ao expor tal problema para ser resolvido.

Analisando de um modo mais aprofundado, é preciso deixar claro que a fórmula de adição de velocidades relativística não é intuitiva e difere significativamente da fórmula de adição de velocidades clássica que os alunos aprenderam inicialmente, a ideia de que a velocidade de uma partícula lançada da espaçonave é medida em relação ao referencial da espaçonave e que essa velocidade deve ser transformada para o referencial da Terra pode ter ficado confusa, também entender o significado físico da velocidade negativa (a partícula sendo lançada para trás) e como isso se integra no contexto da fórmula relativística pode não ser óbvio. No final, eles só conseguiram resolver porque foram guiados passo a passo, mas é totalmente justificável pelo nível da questão.

## **6 Considerações Finais**

Quando nos propusemos a trabalhar a temática da Cinemática Relativística (CR) no ensino médio, foi levado em conta a aplicação de outros conteúdos que servem de pré requisito para o ensino da Relatividade, tais conteúdos já fazem parte da grade curricular, porém como seriam necessários para a CR, os mesmos foram trabalhados como se já estivessem fazendo parte do produto, da pesquisa. Muitos dos métodos que seriam aplicados apenas nas aulas de Relatividade, foram usados desde o princípio.

Ora, muito se fala em aumentar os índices de ensino da Física Moderna, mas para essa possibilidade funcionar, é necessário primeiro que os estudantes aprimorem o conhecimento da Física Clássica, a partir dessa premissa, faz sentido o ensino da Física mais atual. Sabendo da importância de ensinar tanto a Física clássica quanto a Moderna, pensamos então na Cinemática Relativística, uma parte da Relatividade Restrita, pois assim, sabendo da necessidade de conteúdos de pré requisito, poderíamos trabalhar tanto alguns assuntos clássicos como a própria CR, a qual é o tema principal nesta pesquisa.

Para isso, realizamos o levantamento da literatura encontrando-o em vários livros destinados ao ensino superior onde seu tratamento é mais detalhado a despeito das coleções direcionadas a educação básica que tratam da teoria em pequenas seções, e no sentido de contextualização da Cinemática Relativística sem muito aprofundamento.

Foi constatado também que o ensino da relatividade restrita (ou especial) juntamente com a história da ciência é um campo de pesquisa acadêmica que vem ganhando crescente interesse. Este interesse se dá principalmente por três motivos: a complexidade dos

conceitos envolvidos, a importância histórica da teoria da relatividade e a necessidade de metodologias inovadoras para o ensino eficaz de temas científicos avançados.

Quando falamos na questão da aprendizagem, por exemplo, Ausubel, D. P. (1963). "The Psychology of Meaningful Verbal Learning", argumenta que o aprendizado significativo ocorre quando o novo conhecimento é relacionado a conceitos já existentes na estrutura cognitiva do aluno. Incorporar a história da ciência ao ensino da relatividade pode ajudar os alunos a compreenderem os conceitos dentro de um contexto mais amplo e significativo. Assim também como Matthews, M. R. (1994). "Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science", destaca a importância de utilizar narrativas históricas para ensinar conceitos científicos, sugerindo que isso pode ajudar os alunos a entenderem como o conhecimento científico evolui e se consolida.

Ainda é possível citar Martins, R. A. (1997). "The Use of History in the Teaching of Modern Physics", que argumenta como o uso de estudos de caso históricos, como o desenvolvimento da teoria da relatividade, pode tornar o ensino da física mais acessível e interessante para os estudantes e, Guerra, A., & Figueiredo, R. (2015). "Teaching Einstein's Theory of Relativity: Some Theoretical and Historical Considerations", que explora abordagens interdisciplinares que combinam história da ciência, física e filosofia para proporcionar uma compreensão mais profunda e contextualizada da relatividade restrita, daí a importância de recorrer à filosofia de Thomas Kuhn e Karl Popper, que tratam, respectivamente, o desenvolvimento científico como tendo a necessidade de ter tempos de crise e teorias científicas tendo que ser constantemente submetidas a testes severos para fins de refutações na busca por teorias e conceitos verdadeiros.

Juntamente com os estudos dos momentos históricos, a incorporação de usos de tecnologias, como o uso de softwares de simulação. Benedetti, C., & Lopes, J. B. (2018). "Educational Software for Teaching Special Relativity: An Analysis of Learning Potential", analisam o impacto do uso de softwares educativos interativos no ensino da relatividade, destacando como essas ferramentas podem ajudar a visualizar conceitos abstratos e complexos. Também Müller e Wiesner (2002), "Teaching Special Relativity with Multimedia", eles discutem o uso de simulações e visualizações multimídia para ensinar a relatividade especial, enfatizando a importância de ferramentas visuais para a compreensão de conceitos difíceis como a dilatação do tempo e a contração do comprimento.

No trabalho também incorporamos a UEPS e o métodos de avaliação diagnóstica visando identificar e corrigir as concepções errôneas dos alunos sobre a relatividade especial. Com isso, verificou-se que o uso desse método contribuiu positivamente para o desenvolvimento da aprendizagem significativa, pois através das atividades colaborativas foi possível integrar o aluno efetivamente ao processo de construção do conhecimento permitindo-os relembrar, aperfeiçoar e aprofundar seus subsunçores, rendendo resultados satisfatórios.

Então, este trabalho sobre o ensino da relatividade restrita e a história da ciência destaca a importância de abordagens integradas e inovadoras. Incorporar a história da ciência ao ensino da relatividade não só contextualiza os conceitos teóricos, mas também torna o aprendizado mais significativo e acessível para os alunos. Além disso, o uso de tecnologia educacional, como softwares e simulações, mostrou grande potencial para melhorar a compreensão dos conceitos complexos da relatividade. Metodologias de avaliação diagnóstica e projetos interdisciplinares também são essenciais para identificar e corrigir concepções errôneas, garantindo um aprendizado mais profundo e duradouro.

## **6.1 Do mestrado para a sala de aula**

Ao ingressar no mestrado, meu objetivo principal era aprimorar meus conhecimentos em Física e por consequência melhorar como educador e encontrar novas maneiras de tornar o ensino da física mais acessível e envolvente para meus alunos. Ao longo deste percurso acadêmico, descobri que este foi um dos períodos mais transformadores e enriquecedores da minha carreira docente.

Desde o início, fui apresentado a diversas teorias e metodologias de ensino que foram de suma importância. Um dos aspectos mais reveladores foi a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel. Aprendi que para os alunos realmente assimilarem novos conceitos, é fundamental que esses conceitos se relacionem com o conhecimento prévio deles. Essa compreensão me levou a reformular minhas aulas, sempre buscando conectar os novos conteúdos com aquilo que os alunos já conheciam ou vivenciavam no dia a dia. Porém o que mais transformou o modo de ensinar, foram os conhecimentos teóricos dos conteúdos de Física adquiridos durante o curso, pois o nível de conhecimento adquirido foi de extrema importância e jamais imaginado, logo, pude perceber que quando se domina bastante conteúdo, tema ou teoria, o conhecimento pode ser repassado com muito mais facilidade,

tranquilidade e segurança. Aplicar tudo que foi aprendido no mestrado fez uma diferença notável na prática docente, foi muito mais além do produto educacional. As aulas se tornaram mais interativas, contextualizadas e centradas no aluno. O feedback dos alunos e suas melhorias no desempenho escolar confirmaram que as mudanças estavam no caminho certo. Eles se mostraram mais engajados, curiosos e confiantes em relação à física.

Em resumo, o mestrado em Ensino de Física foi uma jornada de crescimento e transformação. Aumentei meus conhecimentos sobre diversas áreas da Física, aprendi a ensinar de uma maneira mais significativa e eficaz e consegui criar um ambiente de aprendizado mais estimulante e inclusivo para meus alunos. Essa experiência reafirmou minha paixão pelo ensino e me deu as ferramentas necessárias para continuar evoluindo como educador.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, F. R. Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel. Curitiba: Intersaberes, 2013.
- AMAZONAS. Secretaria de Estado de Educação. Base Comum Curricular do Amazonas. Manaus, 2018. Disponível em: <http://www.seduc.am.gov.br/>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. Psicologia Educacional. 2. ed. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BELLONI, M. L. Educação a Distância. Campinas: Autores Associados, 1999.
- BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Brasília, 2017. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Brasília: MEC/SEF, 1999.
- CARVALHO, A. M. P.; GIL-PÉREZ, D. Formação de Professores de Ciências. São Paulo: Cortez, 2001.
- FERREIRA, A. B. H. Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.
- FISCHER, R. Modern Physics. Nova York: Prentice Hall, 2003.
- GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. Volume 4. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- KUHN, T. S. A Estrutura das Revoluções Científicas. 9. ed. São Paulo: Perspectiva, 2006.
- LIMA, E. S. de; SOARES, I. S. Aprendizagem Significativa: contribuições de Ausubel para a prática docente. Educação e Realidade, Porto Alegre, v. 39, n. 4, p. 1223-1237, out./dez. 2014.
- LIMA, E. S. de; SOARES, I. S. A teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel. In: JUNIOR, M. C.; REIS, A. F. (Orgs.). Aprendizagem Significativa: contribuições de autores brasileiros e portugueses. Curitiba: CRV, 2013. p. 19-40.

LOPES, A. C. Inovações Curriculares no Ensino Médio: estudo do impacto do PIBID na formação de professores de física. 2016. 243 f. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

MACHADO, N. J.; COUTINHO, C. A. Educação em Ciências: da pesquisa à prática docente. São Paulo: Escrituras Editora, 2011.

MIZUKAMI, M. G. N.; REALI, A. M. M. Aprendizagem Significativa: uma visão construtivista. Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos, Brasília, v. 77, n. 186, p. 295-309, maio/ago. 1996.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa Crítica. In: MOREIRA, M. A. (Org.). Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel. São Paulo: Moraes, 1982. p. 103-119.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa em Revisão: os desafios da implementação. Interface - Comunicação, Saúde, Educação, Botucatu, v. 6, n. 10, p. 149-156, set. 2002.

NOVAK, J. D. A Theory of Education. Ithaca: Cornell University Press, 1977.

PERRENOUD, P. Avaliação: da excelência à regulação das aprendizagens - entre duas lógicas. Porto Alegre: Artmed, 1999.

PERRENOUD, P. Formando Professores Profissionais: quais estratégias? Quais competências? 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2001.

PIAGET, J. A Epistemologia Genética. 8. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1978.

PIAGET, J. A Formação do Símbolo na Criança. 2. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 1975.

PIAGET, J. Psicologia e Pedagogia: resposta às críticas. 2. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1974.

PIMENTA, S. G.; ANASTASIOU, L. G. C. Docência no Ensino Superior. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2005.

POPPER, K. R. A Lógica da Pesquisa Científica. São Paulo: Cultrix, 1972.

REBOUÇAS, M. C. Relatividade e Física Moderna. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

SANTOS, W. L. P. dos. Como Fazer Projetos, Monografias, Dissertações e Teses. 8. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2007.

SANTOS, W. L. P. dos. Metodologia Científica: a construção do conhecimento. 7. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2006.

SEDUC-AM. Secretaria de Estado de Educação do Amazonas. Parâmetros Curriculares de Física para o Ensino Médio. Manaus: SEDUC-AM, 2014.

SEMED. Secretaria Municipal de Educação de Manaus. Parâmetros Curriculares de Ciências para o Ensino Fundamental. Manaus: SEMED, 2015.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SOUZA, C. A. de; BARROS, L. L. de. Física para o Ensino Médio. São Paulo: Harbra, 1998.

THIOLLENT, M. Metodologia da Pesquisa-Ação. São Paulo: Cortez, 2011.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. Modern Physics. 5th ed. New York: W. H. Freeman, 2008.

VASCONCELOS, T. M. de; MANZINI-COVRE, M. R. A. Modelos de Aprendizagem Significativa de Ausubel e Novak: uma análise epistemológica. Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação, Rio de Janeiro, v. 27, n. 104, p. 433-456, abr./jun. 2019.

VIEIRA, S. L.; VIEIRA, A. F. P. Relatividade para o Ensino Médio. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

WUNENBURGER, J.-J. Filosofia das Ciências. São Leopoldo: Editora UNISINOS, 2006.

ZABALA, A. A Prática Educativa: como ensinar. Porto Alegre: Artmed, 1998.

ZABALA, A. Aprendizagem Significativa: uma concepção diferente de aprendizagem? In: JUNIOR, M. C.; REIS, A. F. (Orgs.). Aprendizagem Significativa: contribuições de autores brasileiros e portugueses. Curitiba: CRV, 2013. p. 11-18.

ZABALA, A. Como Aprender e Ensinar Competências?