

Alessandro Lutterbach Veiga Gonçalves

Uma Proposta de Ambiente Virtual para o Ensino de Relatividade Geral no Ensino Médio

Niterói - RJ

2022

Alessandro Lutterbach Veiga Gonçalves

Uma Proposta de Ambiente Virtual para o Ensino de Relatividade Geral no Ensino Médio

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Universidade Federal Fluminense

Orientador: Prof.^a Dr.^a Raissa Fernandes Pessoa Mendes

Niterói - RJ
2022

Agradecimentos

Minha trajetória ao longo desta graduação foi, ao mesmo tempo que muito inspiradora e gratificante, muito desafiadora também. E eu com certeza não estaria chegando ao final dela sem a presença e ajuda de pessoas tão especiais que estiveram comigo durante esses anos.

Primeiramente eu gostaria de agradecer ao meu esposo Rafael, por todo o seu apoio, amor e incentivo e por sempre acreditar em mim e em meu potencial. Obrigado por segurar minha mão em todos os momentos, e especialmente nos mais difíceis.

Agradeço também à minha orientadora, a Prof.^a Raissa Mendes, por toda a paciência, apoio, dedicação, incentivo e a constante disponibilidade para me ajudar durante todo este processo. E por, para além disto, ser para mim um exemplo de docente que me inspira a querer ser um professor melhor.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Janete e Jesiel, à minha irmã, Amanda, à minha avó, Lea, e à minha tia, Simone, por todo o amor, apoio e incentivo. Principalmente na época do vestibular, pois sem a ajuda deles com certeza eu não estaria onde estou hoje.

Agradeço também à minha segunda família: Marilena, Ana Paula, Antônio, Gabriel e Sophia, por todo acolhimento, amor, apoio, torcida e incentivo durante todos esse anos.

Aos Professores Lucas Sigaud e Reinaldo Souza, por terem me recebido no projeto Sei Mais Física - do qual eu tive muita alegria em fazer parte - e por sempre estarem dispostos a me ajudar durante toda a graduação.

À Marianna Mofati, pela sua amizade na faculdade e na vida, desde o primeiro dia da graduação, quando nos conhecemos no trote, até as incontáveis horas de estudos e trabalhos em grupo em que estivemos juntos.

E, por fim, à minha amada Universidade Federal Fluminense e a todos os demais professores e colegas que contribuíram para a minha formação: meu muito obrigado por esses dias incríveis que sempre guardarei com muito carinho em minha memória e coração.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um Ambiente Virtual voltado para alunos do Ensino Médio em que a Relatividade Geral é apresentada de maneira conceitual. Para tal, essa monografia inicia com uma pesquisa sobre as principais justificativas para se ensinar tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, que por fim motivaram a inclusão de outros objetivos específicos a serem alcançados. Foi feita também, com uma metodologia inspirada no Modelo de Reconstrução Educacional, uma pesquisa para identificar os conceitos-chave da Relatividade Geral e os possíveis desafios que o seu ensino apresenta. Além disso, foram estudados e discutidos os benefícios e malefícios de alguns recursos e técnicas comumente utilizados para tal. Por fim, a partir dessa pesquisa, foi proposto e detalhado um Ambiente Virtual que contempla os objetivos especificados.

Palavras-chave: Relatividade Geral; Ambiente Virtual de Ensino; Física Moderna e Contemporânea.

Abstract

This work aims to develop a Virtual Environment aimed at High School students in which General Relativity is conceptually presented. To this end, this monograph begins with a research of the main justifications for teaching Modern Physics in High School, which ultimately motivated the inclusion of other specific aims to be achieved. With a methodology inspired by the Educational Reconstruction Model, an investigation was also carried out to identify the key concepts of General Relativity and the possible challenges that its teaching presents. In addition, the benefits and harms of some commonly used resources and techniques were studied and discussed. Finally, from this investigation, a Virtual Environment, which contemplates the specified objectives, was proposed and detailed.

Keywords: General Relativity; Online Learning Environment; Modern and Contemporary Physics.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Motivação	6
1.2	Objetivos e Metodologia	7
2	JUSTIFICATIVAS PARA SE ENSINAR FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO	9
2.1	A Física Moderna como agente impulsionador do interesse dos alunos em ciências	10
2.2	A Física Moderna como ferramenta para um entendimento mais assertivo do fazer científico	10
2.3	A importância da Física Moderna para a compreensão das tecnologias atuais e as relações entre CTSA	13
2.4	Vantagens pedagógicas do ensino de Relatividade Geral no Ensino Médio	14
3	CONCEITOS-CHAVE DE RELATIVIDADE GERAL E DESAFIOS NA SUA APRENDIZAGEM	16
3.1	Conceitos-chave de Relatividade Geral segundo livros-texto	16
3.2	Desafios na aprendizagem de Relatividade Geral	19
4	PRINCIPAIS RECURSOS E TÉCNICAS UTILIZADOS NO ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL	22
4.1	Experimentos Mentais	22
4.2	Modelos ou Analogias	23
4.2.1	O modelo da cama elástica	24
5	PROPOSTA DE AMBIENTE VIRTUAL DE ENSINO	27
5.1	Introdução	28
5.2	Mudanças no Espaço e Tempo	29
5.3	O Princípio da Equivalência	31
5.4	Forças de Maré e Curvatura	33
5.5	A Teoria da Relatividade Geral	35
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

1 Introdução

1.1 Motivação

A Teoria da Relatividade Geral, publicada por Einstein em 1915, traz uma visão completamente diferente e muito mais precisa a respeito do fenômeno da gravidade do que as ideias desenvolvidas por Newton sobre o mesmo assunto no século XVII. Porém, o conceito de gravidade ainda é ensinado em nossas escolas, em geral, somente sob a perspectiva Newtoniana, mesmo após 107 anos da descoberta de Einstein.

Assim como a gravidade, as demais áreas da Física também são comumente apresentadas no Ensino Médio somente sob a perspectiva clássica. Consequentemente, isso gera um abismo entre a física que é estudada no Ensino Médio e a física que os alunos veem sendo associada às descobertas científicas mais recentes que são divulgadas pela mídia, o que pode contribuir para o aumento do desinteresse dos estudantes pela disciplina.

Este cenário é antagônico ao que os Parâmetros Nacionais Curriculares para Física (PNC+) (BRASIL, 2006) citam como um dos objetivos do ensino de física no Ensino Médio, que é justamente permitir ao aluno compreender as mais recentes descobertas científicas divulgadas pelos meios de comunicação. Levando em consideração apenas algumas das descobertas e divulgações que tivemos nos últimos anos, podemos citar a comprovação da existência de ondas gravitacionais (ABBOTT et al., 2016), a primeira foto de um buraco negro (The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019) e as primeiras imagens do Telescópio Espacial James Webb (NASA, 2022) - sendo que em algumas delas é possível observar o efeito de lentes gravitacionais. Em todas essas descobertas mencionadas acima, conceitos de Relatividade Geral estão intrinsecamente presentes e, mesmo assim, o seu ensino não está incluso de forma geral no Ensino Médio.

Uma possível explicação para essa resistência em se ensinar não só a Relatividade, mas a Física Moderna em geral no Ensino Médio, é a crença de que as teorias que compõem a Física Moderna apresentam uma construção matemática muito complicada, o que as tornam intransponíveis para um público de nível não universitário. Porém, isso não é necessariamente verdade, pois, como é defendido por (KAUR et al., 2017a) e (BALDY, 2007), esses tópicos podem ser inseridos no Ensino Médio com sucesso, desde que esta inserção não seja baseada em seu formalismo matemático avançado, mas sim em uma construção conceitual das ideias que compõem estas teorias.

Uma outra recomendação para o ensino dos conceitos de Física Moderna é a utilização de tecnologias digitais de informação e comunicação (TDICs), que são amplamente recomendadas ao longo da BNCC (BRASIL, 2018) e utilizadas na construção de diversos produtos educacionais, como em (KERSTING et al., 2018). Como a Física Moderna trata

de assuntos que fogem muito do nosso cotidiano — como escalas muito pequenas na Mecânica Quântica e velocidades muito grandes e campos gravitacionais muito intensos na Relatividade — assim como apresentam conclusões contraintuitivas comparadas à Física Clássica, o uso de TDICs (que pode se dar através de sites, aplicativos, simuladores, etc. para computadores ou celulares), se torna uma boa ferramenta para auxiliar na visualização desses conceitos que fogem do nosso cotidiano.

1.2 Objetivos e Metodologia

Baseado na necessidade de se ensinar tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, aliado com as recomendações de se fazê-lo sob uma perspectiva conceitual e com o uso de TDICs, o objetivo geral do presente trabalho é o *desenvolvimento de um Ambiente Virtual voltado para um público de alunos do Ensino Médio, onde se apresente a Relatividade Geral de maneira conceitual*.

Uma metodologia particularmente interessante para a construção de produtos educacionais voltados para o ensino de ciências é o Modelo de Reconstrução Educacional (MRE) (DUIT et al., 2012). Uma das principais preocupações deste modelo é dar igual atenção tanto para o conteúdo que será ensinado quanto para as necessidades e capacidades de aprendizagem dos alunos. Dito isso, ele pode ser dividido em três componentes como mostrado na Figura 1.

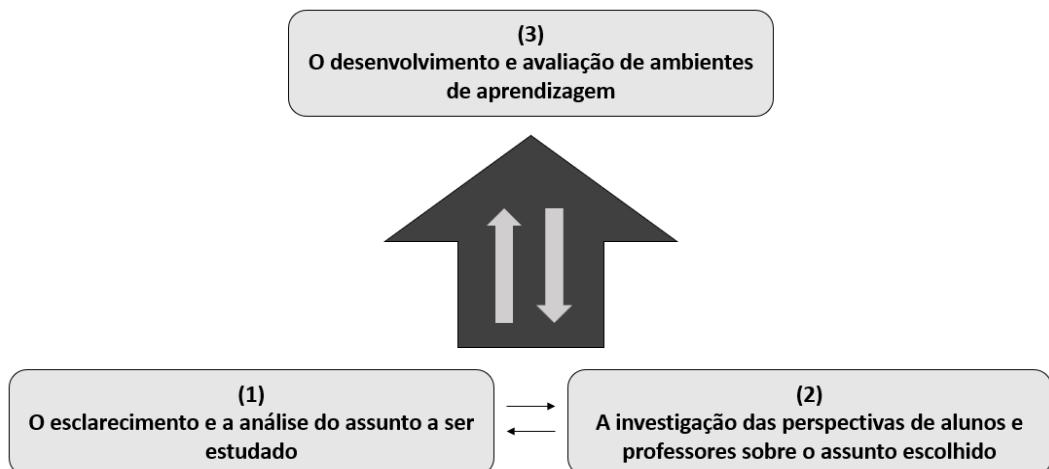


Figura 1 – Os três componentes do Modelo de Reconstrução Educacional. (Fonte: o Autor)

Em maiores detalhes, os três componentes do MRE podem ser definidos como (DUIT et al., 2012):

- (1) **O esclarecimento e a análise do assunto a ser estudado**, incluindo os principais conceitos e princípios científicos que o compõem assim como a análise de sua

importância educacional. Baseia-se na análise qualitativa do conteúdo dos principais livros didáticos e das principais publicações sobre o tema sob inspeção, mas também pode levar em consideração seu desenvolvimento histórico.

- (2) **A investigação das perspectivas de alunos e professores sobre o assunto escolhido**, incluindo concepções iniciais, possíveis dificuldades e variáveis afetivas como interesses, autoconceitos, atitudes e habilidades. Neste ponto, os estudos empíricos sobre as várias características do ambiente de aprendizagem precisam ser considerados, como o papel específico de métodos, experimentos e outras ferramentas de ensino que serão utilizadas.
- (3) **O desenvolvimento e avaliação de ambientes de aprendizagem**, sendo este estruturado pelas necessidades específicas dos alunos e de suas capacidades de aprendizagem para atingir os objetivos definidos anteriormente.

Portanto, neste trabalho nós utilizaremos o Modelo de Reconstrução Educacional como inspiração para nossa metodologia, mas o adaptando, pois como pode ser visto na Figura 1, o MRE pressupõe o *feedback* contínuo entre seus três componentes durante toda a sua construção, o que não será feito plenamente aqui, pois vamos adotar um desenvolvimento mais linear dos componentes 1, 2 e 3 além de acrescentar ao longo do trabalho alguns outros pontos que acreditamos serem pertinentes para a elaboração do ambiente virtual.

Sendo assim, este trabalho se organiza da seguinte forma. No Capítulo 2, será levantada uma série de justificativas para se ensinar Física Moderna no Ensino Médio, explorando as possíveis vantagens pedagógicas que isto traz, com o objetivo de não só justificar mais a fundo o trabalho, mas também — entendendo que essas vantagens não vêm automaticamente ao se ensinar Física Moderna, mas que esse ensino tem que ser feito de forma a proporcionar essas vantagens — de discutir objetivos específicos que queremos cumprir com o ambiente virtual. No Capítulo 3, haverá uma aplicação mais explícita do MRE, em que analisaremos os conceitos-chave da Relatividade Geral, e discutiremos os possíveis desafios que o ensino da Relatividade Geral apresenta. No Capítulo 4, apresentamos alguns recursos e técnicas comumente utilizados para o ensino conceitual de Relatividade Geral, e discutimos seus benefícios e malefícios para o ensino da mesma. No Capítulo 5 apresentamos e detalhamos a construção e escolhas pedagógicas feitas no ambiente virtual, que é o principal produto desse trabalho e que pode ser acessado pelo site <https://alessandrolutterbach.github.io/relatividade>. E por fim, no Capítulo 6 apresentamos as conclusões do trabalho.

2 Justificativas para se ensinar Física Moderna no Ensino Médio

Como dito na introdução, o objetivo deste capítulo é justificar com maior profundidade a importância de se ensinar Física Moderna no Ensino Médio. Mas, para além disso, busca-se aqui também traçar objetivos específicos para o nosso ambiente de aprendizagem virtual. Pois, entendemos que todos os benefícios pedagógicos que o ensino de Física Moderna no Ensino Médio podem trazer não aparecerem simplesmente por se ensinar Física Moderna. Portanto, para que esses benefícios sejam realmente efetivos é preciso que nosso ambiente virtual seja projetado desde o início de uma forma que estes sejam contemplados.

As justificativas apresentadas neste capítulo são em parte inspiradas por aquelas apontadas por (SILVA; ARENGHI; LINO, 2013) como algumas das mais utilizadas em trabalhos acadêmicos da área de ensino de Física Moderna na educação básica no Brasil. Delas, destacamos duas. Primeiramente, a importância da inserção da Física Moderna no Ensino Médio para a compreensão das tecnologias da atualidade, assim como para compreensão e crítica das questões atuais que envolvem ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (CTSA). Em segundo lugar, o fato de que a Física Moderna representou uma mudança de paradigma na Física e de que essa noção de desenvolvimento das ciências se faz necessária no Ensino Médio. Em especial, esse segundo item destaca o papel da Física Moderna para a construção de um entendimento mais assertivo do fazer científico (GIL; SOLBES, 1993).

Além delas, serão debatidas também duas justificativas muito presentes nos trabalhos acadêmicos do Projeto Einstein-First (PITTS et al., 2014; KAUR et al., 2017a; CHOUDHARY et al., 2018), que tem como foco justamente a pesquisa sobre o ensino de conceitos de Física Moderna para alunos de nível básico. Eles defendem a Física Moderna como um agente impulsionador do interesse dos alunos em ciências, além de defenderem que o ensino desses conceitos logo nos anos iniciais de formação do Ensino Médio apresenta uma vantagem pedagógica em relação ao seu ensino somente no final do ensino superior.

Nas seções seguintes, essas quatro justificativas serão debatidas em maiores detalhes. E, com base nelas, quatro objetivos específicos serão traçados para serem alcançados com o desenvolvimento do ambiente virtual. São eles:

- (1) *Impulsionar o interesse dos alunos em ciências.*
- (2) *Proporcionar aos alunos uma visão mais precisa sobre o desenvolvimento científico.*
- (3) *Promover a compreensão de alguma tecnologia atual.*

- (4) *Facilitar o entendimento da Relatividade Geral ao apresentá-la em conjunto ou logo na sequência da Gravidade Newtoniana.*

2.1 A Física Moderna como agente impulsionador do interesse dos alunos em ciências

Como dito anteriormente, o ensino de Física Moderna pode atuar como um grande agente impulsionador do interesse dos alunos em ciências. Em especial porque este tem uma ligação mais profunda com as tecnologias mais recentes e divulgações científicas mais atuais do que a Física Clássica, o que, em geral, pode despertar mais o interesse dos alunos para esses tópicos.

Esse aumento de interesse dos alunos em ciências pôde ser medido, por exemplo, em (PITTS et al., 2014), que, após aplicar para alunos de 11 e 12 anos uma sequência didática sobre Relatividade Geral, aferiu que aproximadamente 70% deles consideraram o assunto muito interessante.

Já em (KAUR et al., 2017b), foi medido entre alunos de 14 e 15 anos o seu interesse em Física, antes e depois da aplicação de uma sequência didática de 10 semanas sobre tópicos de Física Moderna. Os resultados demostram que houve um aumento considerável na quantidade de alunos que concordaram que a Física é um assunto interessante após a aplicação da sequência didática, especialmente entre estudantes do sexo feminino, onde houve um aumento de 50% para 80% de alunas que concordavam com a afirmação. A mesma pesquisa foi feita entre alunos de 15 e 16 anos, em que o interesse em Física após a aplicação da sequência didática praticamente dobrou entre estudantes do sexo masculino e triplicou entre estudantes do sexo feminino.

2.2 A Física Moderna como ferramenta para um entendimento mais assertivo do fazer científico

(PEREZ et al., 2001) destacam como o ensino de ciências – tanto a nível escolar quanto universitário – tem contribuído para a construção de uma visão desconectada da realidade sobre como os conhecimentos científicos são construídos, criando assim uma imagem deformada do fazer científico entre os alunos. Ainda neste mesmo trabalho de (PEREZ et al., 2001), é feita uma listagem de diversas destas visões divergentes, que acabam sendo perpetuadas devido à forma como o ensino de ciências tem sido tradicionalmente realizado nos livros-textos e nas salas de aula. Podemos destacar aqui seis dessas deformações:

- (1) *A de uma concepção empírico-indutivista e ateórica do fazer científico, onde a observação e a experimentação são vistas como atividades neutras, que independem de ideias e hipóteses anteriores.* Não é incomum ler em livros didáticos conceitos físicos sendo

introduzidos a partir de experimentos que o comprovaram, onde não são mencionados os motivos de tais experimentos terem sido montados em primeiro lugar, dando a impressão de uma suposta “descoberta científica”, em que aquele novo conceito foi descoberto quase que espontaneamente. Na verdade, são as teorias já disponíveis e as hipóteses baseadas nelas que geralmente guiam o processo de investigação e experimentação.

(2) *A transmissão de uma visão rígida, algorítmica e exata da atividade científica, sendo o método científico apresentado como um conjunto de etapas imutáveis que deve ser seguido à risca, excluindo por conta desta visão o caráter criativo do fazer científico e criando a impressão de que a ciência só produz resultados exatos.* Conceitos importantes da experimentação científica, como o erro e a incerteza na medição e resultados, são muitas vezes ignorados no ensino de ciências no Ensino Médio, reforçando essa visão de que os resultados obtidos são sempre exatos e não ambíguos.

(3) *A visão aproblemática e ahistórica do fazer científico,* em que são transmitidos os conhecimentos já elaborados, sem antes se fazer uma discussão dos problemas que lhes deram origem ou como esses conhecimentos evoluíram com o tempo. Além disso, as limitações do conhecimento científico atual são raramente discutidas.

(4) *A visão de que os conhecimentos científicos são construídos de forma linear e acumulativa, onde se ignoram as profundas crises e remodelações que a ciência sofre de tempos em tempos.* Como é dito em (KUHN, 2020), a ciência é caracterizada por ter períodos distintos, sendo um deles o período de ciência normal, em que há um paradigma composto de teorias bem estabelecidas que vão ditar as pesquisas que serão realizadas. Esse período é interrompido quando surge uma anomalia nesse conjunto de teorias - algo que não pode ser explicado ou desenvolvido a partir delas - o que leva ao período de crise do paradigma vigente, que, quando resolvida, nos leva a um novo paradigma e a um novo período de ciência normal.

(5) *A visão individualista e elitista da ciência.* Reforçada por diversos produtos culturais, esta visão pinta geralmente o cientista como alguém especialmente genial, do sexo masculino, versado em diversos campos de conhecimentos, e que trabalha de forma individual. Quando na verdade a ciência é caracterizada por seu caráter colaborativo, onde cada resultado obtido é realizado e verificado por diversas pessoas e equipes diferentes. Essa visão equivocada afasta o interesse dos alunos em ciências, pois ao pintar a ciência como algo reservado a indivíduos geniais e de características físicas e sociais específicas, os alunos sentem que a ciência é um lugar que não pode ser habitado por eles, pois eles não se enxergam nessa figura idealizada e irreal do cientista.

(6) *A visão da ciência como algo socialmente neutro, acima do bem e do mal, que não é influenciada pela sociedade e que não a influencia diretamente.* Quando na verdade nossa sociedade é totalmente moldada pelos desenvolvimentos científicos alcançados até então e o fazer científico é geralmente moldado pelas necessidades de sua época.

Dito isso, acredita-se que explorar conceitos científicos através de uma abordagem que

englobe a História e Filosofia da Ciência (HFC) pode auxiliar na construção de uma visão mais assertiva do fazer científico entre os alunos. Apesar de, como também é destacado em (PEREZ et al., 2001), não haver uma visão única do que é o fazer científico em si, há essas deformidades supracitadas sobre este, que podem – e devem – ser evitadas e desconstruídas em sala de aula.

Em especial, trabalhar conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) sobre a perspectiva da HFC pode ser interessante por uma série de motivos. Primeiro, por sua maior proximidade histórica com os tempos atuais, há registros muito mais detalhados e diversos sobre o desenvolvimento e a evolução destes conceitos, o que facilita sua exploração sob uma abordagem histórica. Mas, para além disso, a profunda quebra de paradigma entre a física clássica e a física moderna pode ser explorada para evitar a deformação 4, assim como a forma que ela foi desenvolvida pode ajudar a desfazer as deformações 1 e 3 (PEREZ et al., 2001) se esta for trabalhada de forma problematizadora sob uma perspectiva da HFC.

Já a deformação 5 pode ser facilmente quebrada ao se levar em consideração o desenvolvimento da Mecânica Quântica, por exemplo, que não é atribuída a um só cientista, mas a vários cientistas que durante décadas trabalharam no assunto e deram diferentes contribuições para seu desenvolvimento. Isso vale até mesmo para a Teoria da Relatividade Geral. Apesar de ser popularmente creditada só a Einstein, uma olhada mais a fundo na história de seu desenvolvimento nos mostra a colaboração de diversos outros matemáticos e físicos, que foram importantes tanto na concepção da teoria, quanto na resolução de suas equações posteriormente, e até mesmo nas suas comprovações experimentais, que iniciaram-se em 1919 em Sobral e Príncipe e que continuam até hoje.

Inclusive, como (RINDLER, 1994) criativamente propõe, não é incabível que a Relatividade Geral pudesse ter surgido muito antes de 1915, já que o matemático Bernhard Riemann havia desenvolvido a matemática necessária para ela já em 1854. Segundo esse argumento, a Relatividade Especial poderia ter sido desenvolvida a partir da Geral, o que só destaca como o desenvolvimento científico não é necessariamente linear e pode tomar diversos caminhos.

Enfim, o item 6 pode ser trabalhado, por exemplo, a partir da descoberta da fissão nuclear, que tem aplicações tanto “benéficas”, como os reatores nucleares que produzem energia razoavelmente limpa, quanto “maléficas”, como o uso da bomba atômica para fins militares. E o item 2 pode ser desfeito a partir das várias tentativas de Einstein de se chegar a Teoria da Relatividade Geral, que não foram nada lineares e sim repletas de impasses (GUTFREUND; RENN, 2015).

2.3 A importância da Física Moderna para a compreensão das tecnologias atuais e as relações entre CTSA

Na atualidade, muitas das tecnologias que nos cercam no dia a dia foram desenvolvidas graças a nossa compreensão da Física Moderna. Em especial, a Mecânica Quântica é aplicada a diversos dispositivos do nosso cotidiano, como placas de computadores, luzes LED, câmeras digitais e lasers (CALTECH, 2018). Logo, muito do mundo digital em que vivemos hoje não seria possível sem o desenvolvimento da Mecânica Quântica.

Já a Relatividade, apesar de não estar tão presente em tecnologias do dia a dia quanto a Mecânica Quântica — com a exceção notável do GPS, que funciona com precisão graças aos cálculos relativísticos feitos para ajustar os relógios atômicos dos satélites com os relógios da Terra (RODRIGUES; SAUERWEIN; SAUERWEIN, 2014) — se faz presente em muitas das pesquisas de ponta realizadas ultimamente, como em aceleradores de partículas como o CERN e o Sirius, que, por chegarem a velocidades relativísticas, precisam levar a teoria da Relatividade Restrita em conta, assim como se faz presente também em grande parte das pesquisas nas áreas de astronomia e cosmologia, por conta dos efeitos gravitacionais previstos pela teoria.

Levando em consideração a presença massiva destas teorias nas tecnologias e divulgações científicas mais recentes que vemos no dia a dia, assim como os Parâmetros Curriculares Nacionais para Física (PCN+) (BRASIL, 2006), que ressaltam a importância de o aluno compreender o funcionamento das tecnologias assim como as informações das divulgações científicas sendo realizadas a sua volta, é imperativo o ensino da Física Moderna no Ensino Médio. É preciso que o aluno saia do Ensino Médio com uma boa compreensão do mundo no qual ele está inserido, já que para muitos esse será o único contato com a ciência durante toda a sua vida.

Ainda mais importante é possibilitar ao aluno não só o entendimento das tecnologias e da ciência que o cercam, mas de como essas interagem com a sociedade e o ambiente em que ele vive. Pois é necessário que este possa não só entender essas relações, mas também ser crítico quanto a elas, tornando-se assim um cidadão apto a ser participativo nas tomadas de decisão da sociedade. Porque, apesar de o senso comum dizer que o progresso científico e tecnológico é algo já pré-determinado e imparável, este não passa de uma série de decisões que cabem à sociedade tomar, com base em como esse progresso irá afetar ela mesma e o ambiente em que ela vive (BERNARDO, 2014).

2.4 Vantagens pedagógicas do ensino de Relatividade Geral no Ensino Médio

De acordo com (STANNARD, 1999): “Nossa primeira introdução ao mundo da física moderna deveria ser quando somos jovens, quando nossas mentes ainda estão abertas e flexíveis. À medida que envelhecemos, [...] nossa visão do mundo se fossiliza; nos tornamos resistentes a novos modos de pensamento.”

Um ponto semelhante é defendido também por (SHABAJEE; POSTLETHWAITE, 2004), que argumentam que, uma vez que um jovem assimila uma compreensão equivocada ou limitada de seu mundo em sua estrutura cognitiva, é difícil mudá-la. Por conta disso, ao lhe fornecer uma “estrutura cognitiva” derivada da mecânica newtoniana e apresentá-la como não problemática (quando na verdade, embora seja um excelente modelo de trabalho para prever experiências do cotidiano, é fundamentalmente incorreta conceitualmente), estamos tomando medidas destinadas a tornar mais difícil qualquer aprendizado subsequente das ideias relativísticas do século XX.

Ou seja, uma vez encrustada na mente a perspectiva Newtoniana, em que o espaço e tempo são absolutos e em que tudo se comporta como uma coleção de partículas, se torna muito difícil quebrar esses conceitos, pois os novos conceitos trazidos pela Física Moderna, além de serem já de início contraintuitivos à nossa experiência do cotidiano, se tornam ainda mais contraintuitivos devido à falta de referência a eles na intuição teórica que tem sido construída durante anos de formação.

No entanto, ao se apresentar já de início os conceitos de Física Moderna, essa dificuldade adicional é removida. Pois agora não serão mais apresentadas ao aluno ideias contraintuitivas que vão contra todo o arcabouço teórico que ele havia vindo construindo. É muito mais fácil (e mais honesto) dar ao aluno o que há de mais moderno sobre o nosso entendimento sobre o universo logo de início, e depois especificar os casos do dia a dia que podem ser simplificados para uma perspectiva clássica. Pois, ao fazer o contrário, além de tornar para o aluno mais difícil a compreensão desses conceitos, faz também com que ele sinta que tudo o que ele aprendeu anteriormente não era “verdade”, ou mesmo relevante, o que pode causar no aluno certo desinteresse pela disciplina (KAUR et al., 2018).

Alguns podem argumentar que a Gravidade Newtoniana deve ser ensinada antes da Relatividade Geral por ser conceitualmente mais fácil, porém até isso pode ser contestado. Pesquisas relatam que estudantes podem desenvolver diversas concepções alternativas durante o ensino da Gravidade Newtoniana; por exemplo, a ideia de que a gravidade é uma força que precisa de um meio para agir através dele, como o ar, e que por consequência disso a gravidade não age para além dos limites da atmosfera, tornando assim a Lua e o espaço lugares sem gravidade (WATTS, 1982), ou que a gravidade não age em objetos que estão se movendo verticalmente para cima (PALMER, 2001), entre muitas outros.

Porém, mesmo que o ensino da Relatividade Einsteiniana também possa promover

algumas concepções alternativas, (KAUR et al., 2017b) obteve resultados indicando que mesmo alunos de Ensino Fundamental conseguem entender de forma significativa os conceitos da Relatividade Geral, e, inclusive, (BALDY, 2007) chegou a resultados que indicam que o ensino da gravidade sob a perspectiva de Einstein promove mais mudança conceitual do que um método baseado na teoria de Newton de corpos interagindo à distância.

Essas possíveis vantagens didáticas, junto com os argumentos discutidos anteriormente, nos motivam a, através do ambiente virtual que está sendo proposto, ensinar a Relatividade Geral no Ensino Médio de uma forma que impulse o interesse dos alunos em ciências, que proporcione aos alunos uma visão mais precisa sobre o desenvolvimento científico, que promova a compreensão de pelo menos uma tecnologia atual e que facilite o entendimento da Relatividade Geral ao apresentá-la em conjunto ou logo na sequência da Gravidade Newtoniana. São estes então nossos objetivos específicos a serem alcançados com o desenvolvimento do ambiente virtual.

3 Conceitos-chave de Relatividade Geral e desafios na sua aprendizagem

O objetivo do presente capítulo é fazer uma aplicação mais direta do Modelo de Reconstrução Educacional (MRE) apresentado no Capítulo 1, mas, como destacado anteriormente, sem o *feedback* contínuo entre seus três componentes, que aqui assumirão o papel de etapas da pesquisa necessária para a construção do ambiente virtual.

Sendo assim, na Seção 3.1, será feito um levantamento, através de artigos e livros didáticos e de divulgação da área, dos principais conceitos da Teoria da Relatividade Geral. Com isso, busca-se cumprir o primeiro passo do MRE: *o esclarecimento e análise do assunto a ser estudado*.

Em seguida, na Seção 3.2, será feita uma análise das principais dificuldades que os estudantes enfrentam ao aprenderem Relatividade Geral com o objetivo de assim cumprir-se o segundo passo do MRE: *a investigação das perspectivas dos alunos sobre o assunto escolhido*.

No entanto, o terceiro passo do MRE (*o desenvolvimento e avaliação de ambientes de aprendizagem*) só se dará mais à frente, no Capítulo 5, em que será proposto e discutido o nosso ambiente virtual.

3.1 Conceitos-chave de Relatividade Geral segundo livros-texto

O primeiro passo a ser dado é definir quais seriam os conceitos-chave necessários para se ensinar a Teoria da Relatividade Geral para um público de Ensino Médio. Uma primeira resposta para esse questionamento é dada por (HARTLE, 2006), que declara que as ideias centrais da Relatividade Geral podem ser resumidas nas três seguintes afirmações:

- (1) *Gravidade é Geometria.* Fenômenos familiarmente vistos como oriundos das forças gravitacionais em um contexto Newtoniano são geralmente devidos à curvatura da geometria do espaço-tempo quadridimensional.
- (2) *Massa-Energia é a Fonte da Curvatura do Espaço-Tempo.* A massa é a fonte da curvatura do espaço-tempo e, porque a Relatividade Geral incorpora a Relatividade Especial, qualquer forma de energia é também uma fonte da curvatura do espaço-tempo.
- (3) *Uma Massa Livre se Move em Caminhos Retos em um Espaço-Tempo Curvo.* Na Relatividade Geral, a Terra se move em torno do Sol em sua órbita não por causa

de uma força gravitacional exercida pelo Sol, mas porque está seguindo um caminho reto no espaço-tempo curvo produzido pelo Sol.

Porém, como o próprio autor destaca, essas ideias são um resumo grosseiro do que é a Teoria da Relatividade Geral, e o objetivo de qualquer curso ou livro da área é tornar essas ideias mais explícitas e precisas. Levando isso em consideração, e com o objetivo de se ter uma visão mais aprofundada de como esses conceitos são detalhados e trabalhados em livros da área, buscamos fazer uma revisão bibliográfica em livros que trazem em seu conteúdo o tema da Relatividade Geral, a fim de se fazer a partir dessa um levantamento de quais foram os principais conceitos abordados nestas publicações e de que forma estes foram relacionados entre si durante seus respectivos textos.

Nossa revisão, então, se iniciou com a análise das 7 coleções aprovadas para o tema de Ciências da Natureza e suas Tecnologias no Objeto 2 do Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) de 2021, que traz os livros didáticos que foram aprovados para serem distribuídos para toda a rede pública de escolas que ofertam o Ensino Médio. Como esse PNLD foi lançado após a aprovação da nova BNCC, os livros didáticos que ele traz já estão adequados a ela e, por isso, não há mais livros didáticos específicos para o ensino de Física, mas sim livros que englobam toda a área de Ciências da Natureza, onde os conteúdos de Física, Química e Biologia agora são apresentados de forma integrada, através de coleções de 6 volumes, que não apresentam uma ordem definida.

Dito isso, achamos relevante o início desta análise por estes livros, porque mais de 80% dos alunos do ensino básico no Brasil estão matriculados na Rede Pública (IBGE, 2019), e por consequência esses serão os livros que a maioria dos estudantes do país terão acesso quando forem estudar ciência no geral.

Foi, então, realizada a leitura dessas sete coleções em busca de possíveis passagens que explorem os conteúdos da Teoria da Relatividade Geral, a fim de se analisar de que forma esses conteúdos foram explorados e quais tópicos de Relatividade Geral foram levantados. No entanto, das 7 coleções aprovadas no PNLD de 2021 para a área de Ciências da Natureza (LOPES; ROSSO, 2021; THOMPSON et al., 2021; SANTOS, 2021; MORTIMER et al., 2021; AMABIS et al., 2021; GODOY; DELL'AGNOLO; MELO, 2021; FUKUI et al., 2021), apenas 3 delas (LOPES; ROSSO, 2021; FUKUI et al., 2021; MORTIMER et al., 2021) trazem ao longo de seus volumes conteúdo suficiente sobre Relatividade Geral para que seja feita uma análise relevante sobre como a mesma foi apresentada. Levando em consideração a habilidade EM13CNT201 da BNCC que determina que o ensino de Ciências da Natureza desenvolva a capacidade de “analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente”, a falta de conteúdos relevantes sobre Relatividade Geral em 4 dessas 7 coleções é preocupante, visto que para se construir um conhecimento acerca das teorias aceitas atualmente para o surgimento e a evolução principalmente do Universo, é possivelmente necessário antes se

ter um bom entendimento da Teoria da Relatividade Geral, que foi o ponto de partida para todas as teorias atuais desta área.

A fim de guiar esta análise e aferir a qualidade desses livros-texto, buscamos antes de tudo identificar nestes livros a presença das três ideias centrais da relatividade geral como destacadas em (HARTLE, 2006) e citadas no início dessa seção. O resultado desta análise está presente na Tabela 1 abaixo:

Coleção	Volume	Páginas	Ideias Centrais	Fenômenos
Ser Protagonista	Evolução, Tempo e Espaço	78-79	1 e 2	Ondas e lentes gravitacionais
Matéria, Energia e Vida	Origens: O universo, a Terra e a Vida	93-95	1 e 2	Deflexão da luz pelo Sol, buracos negros e ondas gravitacionais
Lopes & Rosso	Evolução	17-18	1 e 2	Lentes gravitacionais

Tabela 1 – Livros do PNLD 2021 do Ensino Médio e a presença das ideias centrais da RG neles.

Como pode ser visto a partir dessa tabela, nenhum dos livros do novo PNLD desenvolve em seus textos a terceira ideia central da Relatividade Geral apresentada por (HARTLE, 2006). Na verdade, os três livros seguem uma estrutura muito similar: as ideias-chave 1 e 2 são afirmadas, em seguida um modelo similar ao da cama elástica (que será visto em maior detalhe no próximo capítulo) é utilizado em uma tentativa de se ilustrar estas afirmações, e a partir disto os autores já partem para a discussão dos fenômenos para os quais a Relatividade Geral é importante, detalhados aqui na quinta coluna da Tabela 1.

Além disso, essas coleções apresentam outros problemas. Em especial, a coleção Ser Protagonista faz um uso exacerbado de jargões, o que dificulta a compreensão por parte do aluno dos conceitos que estão sendo apresentados; e a coleção Matéria, Vida e Energia traz alguns erros conceituais graves. Ademais, uma característica em comum nas três coleções é a demasiada exposição de conceitos de forma quase que axiomática, sem qualquer tentativa de se construir esses conhecimentos de forma mais aprofundada. Isso inclusive reforça, em vez de ajudar a desfazer, algumas das visões deformadas da ciência discutidas no capítulo anterior, como, por exemplo, a visão aproblemática e ahistórica do fazer científico.

Levando em consideração a falta de uma das ideias centrais da Relatividade Geral em todos os três livros, assim como os demais problemas citados, chegamos à conclusão de que esses livros não trabalham os conceitos da Relatividade Geral de forma satisfatória, e, portanto, não são uma boa opção para a análise que se pretende fazer nesta seção.

A partir disso, buscamos um novo conjunto de obras que explorassem a RG e que apresentassem as suas ideias centrais como destacadas em (HARTLE, 2006). Desta vez, foi feita uma revisão bibliográfica em diversas publicações que buscam ensinar a Teoria da Relatividade Geral para diferentes públicos.

A primeira delas é “Compreendendo a Física - Volume 3”, de Alberto Gaspar (GASPAR, 2013), que também é um livro didático voltado para o Ensino Médio, mas que tem, em seu conteúdo, uma seção mais detalhada e bem trabalhada sobre Relatividade Geral. A título de comparação, ao contrário dos livros do PNLD 2021 anteriormente analisados, que dedicavam em média somente duas páginas ao assunto, aqui temos 7 páginas somente sobre Relatividade Geral, com um texto que busca explorar seus conceitos de forma mais aprofundada.

O segundo livro selecionado é o “Gravity: An Introduction to Einstein’s General Relativity” de James B. Hartle (HARTLE, 2021), que é um livro didático, desta vez voltado para o Ensino Superior, mas que foi escolhido por sua abordagem “Physics First”, onde os conceitos físicos da teoria são abordados logo no início antes de uma construção mais detalhada da sua matemática. Como nossa intenção é justamente entender mais como esses conceitos são apresentados, esse livro se caracteriza como uma boa escolha para nossos objetivos. Em especial, utilizaremos para nossa análise o capítulo 6, “Gravity as Geometry”, por ser nele em que o autor faz a transição entre a Relatividade Restrita e a Relatividade Geral e introduz os conceitos que estamos interessados em analisar.

Nossa terceira escolha é o “Black Holes and Time Warps: Einstein’s Outrageous Legacy” de Kip S. Thorne (THORNE, 1995), que é um excelente e famoso livro de divulgação científica e que traz uma visão aprofundada de diversos aspectos da relatividade. Analisaremos em especial o capítulo 2, que fala sobre a Teoria da Relatividade Geral e diversos de seus conceitos, assim como também traz uma visão histórica muito interessante sobre a criação da Relatividade Geral.

A quarta e última escolha foi o livro “Física Conceitual”, de Paul G. Hewitt (HEWITT, 2015), que como o próprio nome diz traz uma abordagem mais conceitual da física, sem se preocupar muito com sua parte mais matemática, que é justamente o que estamos almejando fazer neste trabalho. Analisaremos em especial o capítulo 36, que é a parte do livro que fala sobre a Relatividade Geral.

Em todos os livros dessa nova seleção foram identificadas as 3 ideias centrais da RG apontadas por (HARTLE, 2006) e portanto esses se apresentam como bons candidatos para nossa análise.

Enfim, a partir da leitura e análise das obras supracitadas, foram identificados os seguintes conceitos-chave apresentados na Tabela 2 abaixo.

3.2 Desafios na aprendizagem de Relatividade Geral

Quando vamos ensinar algo, é preciso, além de pensar sobre o conteúdo em si, pensar em como este se relaciona com aquele que vai aprender. Como defendido por (FREIRE, 2000), estudantes não são caixas vazias em que depositamos conhecimento, mas sim indivíduos com suas próprias experiências e vivências anteriores, que devem ser levadas em

Conceitos	Gaspar	Hartle	Thorne	Hewitt
1) Princípio da Equivalência (PE)				
a) PE Fraco: Igualdade entre massa inercial e gravitacional	x	x		
b) PE de Einstein: Leis da RR valem em queda livre	x	x	x	x
c) Dilatação temporal como implicação do PE		x	x	x
2) Gravitação e curvatura			x	
a) Forças de maré		x	x	x
b) Geodésicas		x	x	x
c) Curvatura		x	x	x

Tabela 2 – Conceitos de Relatividade Geral presentes em diferentes livros-textos e de divulgação científica sobre o tema.

consideração quando planejamos o ensino de algum tópico. Desta forma, durante todo o processo de ensino, é preciso que se esteja atento ao conhecimento prévio informal que os alunos têm sobre o assunto, assim como possíveis concepções alternativas, para que esses sejam conciliados com uma nova visão mais fundamentada na concepção científica sobre o conteúdo. Também é preciso, enquanto professor reflexivo (SELINGARDI; MENEZES, 2017), sempre estar atento às possíveis dificuldades dos estudantes para compreender o assunto durante todo o processo de aprendizagem.

Então, devido aos motivos elencados acima e de acordo com a metodologia adotada, o objetivo desta seção é entender e refletir sobre os principais desafios na aprendizagem da Relatividade Geral (apesar, é claro, dos desafios descritos aqui serem gerais, cabendo ao professor estar atento às dificuldades individuais dos alunos que tem em classe).

Esta questão é respondida de forma sintetizada por (KERSTING et al., 2018), que argumenta que os desafios na aprendizagem de Relatividade Geral podem ser divididos em duas categorias: Desafios Gerais e Desafios Específicos. Ambas as categorias são apresentadas na Tabela 3 abaixo.

Desafios gerais	Desafios específicos
G1: A RG baseia-se em uma matemática complicada. G2: A RG requer muito conhecimento prévio, em especial sobre a Relatividade Restrita. G3: Estudantes não têm experiência concreta com fenômenos relativísticos. G4: Fenômenos relativísticos são contraintuitivos. G5: Ideias pré-existentes da Física Clássica dificultam o entendimento da RG. G6: Estudantes têm dificuldades para aceitar as consequências da teoria mesmo que eles tenham entendido seus princípios básicos.	E1: Estudantes têm dificuldade com a definição de referencial e referenciais inerciais. E2: Os alunos lutam com o papel de observadores em diferentes referenciais. E3: Estudantes têm dificuldades para aplicar o princípio da equivalência. E4: Os alunos não conseguem conectar a igualdade da massa inercial e gravitacional ao princípio da equivalência e geralmente não conseguem ver a diferença entre massa inercial e gravitacional. E5: Os alunos consideram a natureza euclidiana do nosso universo como garantida.

Tabela 3 – Desafios gerais e específicos no ensino de Relatividade Geral. Traduzido e adaptado de (KERSTING et al., 2018).

O conhecimento dessas dificuldades gerais pode orientar a elaboração do ambiente virtual. Por exemplo, o desafio G1 nos motiva ainda mais a promover com o ambiente

virtual uma aproximação mais conceitual do que matemática à Relatividade Geral. O desafio G2 pode ser resolvido com a introdução de uma seção sobre tópicos básicos de Relatividade Restrita logo nas partes iniciais do ambiente. Os desafios G3 e G4 podem ser suavizados com o uso de modelos e analogias ao longo do aprendizado, como será explorado em maiores detalhes no Capítulo 4. Já o desafio G5 também pode ser minimizado, já que a ideia é a utilização do ambiente virtual logo no primeiro ano do Ensino Médio, ocasião em que os alunos ainda estão iniciando sua jornada na Física, o que faz com que seus arcabouços teóricos ainda sejam pequenos e não tão fortemente fundamentados na física newtoniana.

Enquanto a maior parte dos desafios gerais serão contornados mesmo que parcialmente pelo formato proposto ao ambiente virtual, os desafios específicos se apresentam como indicadores dos conceitos que devem ser trabalhados com maior atenção no desenvolvimento do ambiente, como, por exemplo, o princípio da equivalência e a natureza não euclidiana do universo. Já outros desafios, como o E4, não necessariamente serão relevantes, uma vez que a pesquisa de (KERSTING et al., 2018) é baseada em estudos voltados para alunos da graduação, que verão em maiores detalhes muitos conceitos que talvez sejam omitidos do ambiente a fim de deixá-lo mais palatável para uma audiência de alunos do Ensino Médio.

4 Principais recursos e técnicas utilizados no ensino da Teoria da Relatividade Geral

Neste capítulo, nosso objetivo é fazer um levantamento dos principais recursos e técnicas que são comumente utilizados no ensino dos conceitos-chave da Teoria da Relatividade Geral indicados no capítulo anterior. Para isso, foi feita uma revisão de literatura em diversos artigos que tratam sobre o ensino de Relatividade Geral para o Ensino Médio em busca desses recursos e de como estes são utilizados, assim como de quais são suas vantagens e desvantagens pedagógicas.

4.1 Experimentos Mentais

O primeiro recurso identificado foi o de Experimentos Mentais, que é muito utilizado em livros-texto e artigos de ensino principalmente para a explicação do Princípio da Equivalência de Einstein, usualmente com a utilização do experimento mental do elevador (às vezes apresentado como um foguete). Experimentos mentais também foram largamente utilizados pelo próprio Einstein para explicar diversos outros pontos, tanto da Teoria da Relatividade Restrita quanto da Teoria da Relatividade Geral para o grande público (EINSTEIN; LEVY, 2022).

Mas o que eles são afinal? Experimentos Mentais são construções de modelos mentais em que o indivíduo que os realiza imagina uma sequência de eventos e processos e a partir dela infere resultados sem que seja preciso realizar esse experimento fisicamente (VELENTZAS; HALKIA, 2013). Eles são especialmente úteis em situações que não podem, ou que são muito difíceis, de serem realizadas em laboratórios ou no cotidiano. Eles foram e são utilizados por muitos cientistas para diversas finalidades, seja para imaginar situações físicas que levaram à formulação de novas teorias, para propor situações que demostravam que determinada teoria que estava sendo debatida não era válida e até mesmo para explicar suas teorias de forma simplificada e qualitativa para o grande público.

Além disso, experimentos mentais são largamente utilizados em livros de divulgação científica e livros didáticos por todo o mundo, em especial para explicar as teorias da Física do século XX aos seus leitores. Neles, os Experimentos Mentais são utilizados para realizar uma conexão entre as experiências da vida cotidiana dos seus leitores e os conceitos abstratos inerentes a essas teorias, assim como para esclarecer as consequências destas.

Apesar de suas vantagens pedagógicas, (REINER; BURKO, 2003) destaca possíveis limitações didáticas inerentes aos Experimentos Mentais, que podem levar a uma conclusão conceitual diferente da esperada com a utilização dos mesmos. São essas (REINER; BURKO, 2003):

- (1) *A intuição pode substituir a estrutura teórica convencional.* Ou seja, levar em consideração suas próprias experiências passadas e construir sua intuição em cima delas ao invés de em construtos teóricos pode levar a conclusões divergentes da desejada.
- (2) *A incompletude do conjunto de pressupostos sobre o mundo imaginário do Experimento Mental.* Ou seja, a omissão de alguma lei física crucial para o que acontece naquele experimento leva a conclusões errôneas sobre o mesmo.
- (3) *Irrelevância dos pressupostos que foram incluídos nas características do mundo imaginário no Experimento Mental.* Ou seja, ao assumir que determinada característica física tem relevância para o experimento quando na verdade ela não tem, pode-se levar o experimento a produzir conclusões erradas.

Por conta disso, é preciso tomar cuidado ao se utilizar Experimentos Mentais. Seu uso deve ser feito de forma a evitar suas possíveis limitações didáticas acima citadas, a fim de que seu objetivo seja cumprido de forma efetiva e o aluno chegue à conclusão conceitual esperada daquele experimento.

4.2 Modelos ou Analogias

Segundo (KERSTING; STEIER, 2018), modelos ou analogias podem ser definidos como a construção, física ou mental, de um objeto mais simples que se relaciona com um outro objeto mais complicado, onde as características principais desses dois objetos podem ser comparadas entre si. Seus objetivos são justamente facilitar a compreensão dessas características principais do objeto mais complicado a partir da compreensão das características do objeto mais simples que se relacionam com aquelas.

Dada essa definição, o uso de modelos ou analogias se mostra evidentemente interessante para o ensino de diversas teorias científicas, inclusive para a Relatividade Geral. Como essa envolve conceitos difíceis e muitas vezes desconectados das nossas experiências cotidianas, um primeiro contato com ela a partir de um modelo simplificado pode facilitar a compreensão de suas características, que seriam difíceis de entender ao se contemplar a teoria como um todo logo de início.

Porém, como destacado por (ANDRADE; FERRARI, 2002), o uso de modelos apresenta uma problemática. Muitas vezes o aluno toma o modelo como uma cópia fiel da realidade, e não como uma simplificação que só tem como objetivo a introdução de uma realidade mais complicada, criando assim concepções alternativas que não condizem com o que se deseja ensinar. É preciso então que se tenha cuidado ao utilizar modelos de ensino, para evitar que coisas como esta ocorram.

(POSSEL, 2018) Define quatro critérios que podem ser utilizados para se analisar a qualidade de um modelo, são eles:

Fidelidade do modelo: Se este representa todos os aspectos importantes da teoria original.

Parcimônia: Os aspectos não essenciais da teoria e que potencialmente causam distração devem ser minimamente representados no modelo.

Prevenção de confusão: O modelo não tem características enganosas e obstrutivas.

Acessibilidade: O público-alvo é capaz de entender de forma satisfatória a estrutura do modelo. (POSSEL, 2018)

O principal modelo que utilizaremos no ambiente virtual será o modelo da cama elástica. Na seção a seguir nós discutiremos no que ele consiste, assim como seu uso e adequação aos critérios de qualidade acima mencionados.

4.2.1 O modelo da cama elástica

O modelo da cama elástica é um famoso modelo de ensino utilizado na maioria dos livros, vídeos e demais recursos didáticos que buscam ensinar a Teoria da Relatividade Geral para o público geral. Geralmente ele é representado por uma cama elástica que é deformada pela presença de esferas. Seu principal objetivo é mostrar de forma pictórica como o espaço-tempo se deforma na presença de uma massa e como o movimento dessas massas é determinado pela deformação do espaço tempo. Isso pode resumir bem as ideias centrais da Relatividade Geral apontadas por (HARTLE, 2006) e exploradas no Capítulo 3: a de que a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo, de que massa-energia é a fonte dessa curvatura e de que uma massa livre se move em caminhos retos em um espaço-tempo curvo.

Sendo esse um modelo amplamente utilizado em diversas mídias, há muita discussão sobre os aspectos positivos e negativos deste modelo: sobre o que ele transmite bem sobre a Teoria da Relatividade Geral e em quais pontos ele pode levar a concepções alternativas sobre o tema. Baseado em (POSSEL, 2018) e (KERSTING; STEIER, 2018), podemos discutir quais são os principais pontos da Relatividade Geral que são bem relacionados com o modelo da cama elástica, e quais pontos acabam apresentando falhas na conexão entre a teoria e o modelo.

Um ponto em que o modelo da cama elástica se conecta bem com a Relatividade Geral é o fato de que as esferas distorcem a cama elástica assim como as massas distorcem o espaço-tempo circundante. Além disso, a cama elástica diminui sua distorção à medida que nos afastamos de uma esfera pesada, assim como a distorção do espaço-tempo diminui à medida que nos afastamos da fonte do campo gravitacional, e o movimento das esferas depende da distorção da cama elástica, assim como o das massas depende da distorção do espaço-tempo.

O modelo também mostra que a gravidade causada por uma massa não para de fazer efeito do nada a partir de um certo ponto, mas que ela vai diminuindo aos poucos. Esse é um ponto importante, pois muitos alunos têm a concepção alternativa de que a gravidade

termina abruptamente em certo ponto, como o ponto em que a atmosfera acaba, já que muitos desenvolvem a ideia de que a gravidade só atua onde há atmosfera, e que no espaço não há gravidade (BALDY, 2007).

O modelo destaca também que a gravidade não é instantânea, mas tem um tempo de propagação. Esse é um ponto muito relevante, já que pela lei da gravidade de Newton a gravidade seria instantânea. No entanto, isso não é verdade segundo Einstein, já que nada pode ter uma velocidade maior do que a da luz.

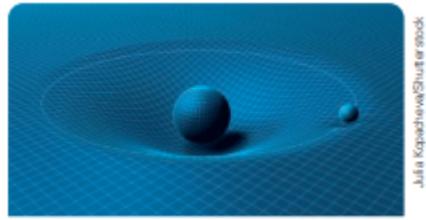
Dentre os pontos que podemos destacar como negativos do modelo da cama elástica, que falham em fazer uma correta relação entre o modelo e a teoria, há o fato de a cama elástica representar um espaço-tempo bidimensional, quando na realidade ele é composto por quatro dimensões. Isso é algo difícil de escapar, já que é impossível para nós, que estamos inseridos em 3 dimensões espaciais, imaginarmos uma dimensão superior, mas com certeza é um ponto necessário de ser destacado como limitação deste modelo quando ele for apresentado aos alunos.

Junto com a representação bidimensional do espaço-tempo, há as massas que são representadas em 3D. Isso pode ocasionar o erro conceitual de se pensar que as massas não estão inseridas no espaço-tempo, e também esconde que a curvatura do espaço-tempo se dá em todas as direções, tirando assim a simetria da gravidade, já que pelo modelo parece que a gravidade só atua em uma direção, quando na verdade ela atua em todas as direções de forma esférica (considerando que esta está sendo gerada por uma fonte com simetria esférica).

Além disso, um dos maiores problemas desse modelo é o papel duplo da gravidade, porque ao mesmo tempo que estamos argumentando que a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo, a curvatura da cama elástica se dá por conta da gravidade da Terra. A atuação dupla da gravidade nesse modelo pode então confundir os alunos sobre qual é de fato a causa da gravidade, e isso pode dificultar a dissociação da ideia de que a gravidade é uma força à distância newtoniana.

Outro problema grave no modelo é a falta da representatividade da distorção do tempo, já que não é possível representá-la no modelo que só contempla duas dimensões espaciais. (Alguns textos, talvez na tentativa de resolver esse problema, acabam causando uma confusão conceitual ainda maior, como na coleção “Matéria, Energia e Vida”, analisada no Capítulo 3, que, como pode ser visto na Figura 2, associa o eixo z a uma coordenada temporal, dando a entender erroneamente que o tempo corre naquela direção.) Por conta dessa impossibilidade, é preciso destacar essa distorção do tempo que não fica clara no modelo.

No geral, inclusive, para uma efetiva aplicação desse modelo, é preciso destacar antes, durante e depois de sua utilização todos os pontos em que o modelo falha em representar a Teoria da Relatividade Geral, para que assim, através de suas falhas, o aluno não tome o modelo como uma verdade, mas sim como uma simplificação da teoria real. Com essas



Julia Kapacheva/Shutterstock

Figura 2.60 – Representação da força gravitacional de acordo com a teoria da relatividade geral: manifestação de um corpo movendo-se em um espaço-tempo curvo. Nesta figura, estão apresentadas apenas duas coordenadas espaciais, x e y, e o tempo t é a terceira coordenada.

Figura 2 – Imagem da coleção “Matéria, Energia e Vida”, volume “Origens: o universo, a Terra e a vida”, capítulo 2, página 94 (MORTIMER et al., 2021), com interpretação incorreta do significado do modelo da cama elástica.

ressalvas, passamos à apresentação do ambiente virtual de ensino proposto neste trabalho.

5 Proposta de ambiente virtual de ensino

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento do ambiente virtual de ensino projetado a partir da pesquisa e objetivos desenvolvidos nos capítulos anteriores, cumprindo assim por fim o componente 3 do MRE: “*desenvolver e avaliar ambientes de ensino*”. Ele foi projetado com o objetivo principal de ser utilizado por professores de Física no Ensino Médio para o ensino de Relatividade Geral de forma conceitual e está disponível na internet através do site <https://alessandrolutterbach.github.io/relatividade>.

Visto que há muito conteúdo a ser explorado sobre o tema, para facilitar a organização do ambiente, o site foi subdividido em seções parcialmente inspiradas nos conteúdos-chave identificados na Tabela 2, sendo elas:

- (1) Introdução
- (2) Mudanças no Espaço e Tempo
- (3) O Princípio da Equivalência
- (4) Forças de Maré e Curvatura
- (5) A Teoria da Relatividade Geral

Estas seções estão listadas na página inicial do ambiente em conjunto com um link para uma página com informações sobre o projeto (“Sobre”), como pode ser visto abaixo na Figura 3.



Figura 3 – Print da página inicial do ambiente virtual. (Fonte: O autor)

Nas seções seguintes, serão detalhadas as estruturas de cada uma das seções do ambiente virtual, bem como as escolhas e intenções didáticas de cada um de seus itens.

5.1 Introdução

Esta seção se inicia com um vídeo sobre o filme *Interestelar*, em que o contexto do filme é explicado brevemente em conjunto com uma sequência de cenas do mesmo em que ocorre uma situação de dilatação temporal causada pela gravidade. A ideia é utilizar esse vídeo como uma motivação inicial, tanto para chamar a atenção dos alunos por ser um filme de cultura popular, quanto para utilizar a indagação que ele provoca — se esse fenômeno de dilatação temporal é mesmo real e pode ser causado como decorrência da gravidade — para guiar esta e as seções seguintes em um formato investigativo.

Como um dos nossos objetivos específicos neste projeto é *facilitar o entendimento da Relatividade Geral ao apresentá-la em conjunto ou logo na sequência da Gravidade Newtoniana*, a partir desta indagação inicial o aluno é convidado a relembrar o que supostamente ele acabou de aprender sobre a Lei da Gravitação Universal de Newton, a fim de procurar nela algum indício de que esta preveja o fenômeno de dilatação temporal. É apresentada então a formulação padrão da gravitação Newtoniana e abaixo dela duas perguntas sobre a mesma (Figura 4). O objetivo é que o professor utilize essas questões como uma forma de incitar o debate na turma ao mesmo tempo em que tenta desconstruir dúvidas ou concepções alternativas que tenham persistido sobre o tema, já que essas perguntas foram feitas inspiradas em dúvidas comuns que os alunos apresentam enquanto estão aprendendo sobre gravidade (PALMER, 2001; WATTS, 1982). Uma resposta detalhada para cada pergunta pode ser acessada ao clicar em cima de cada uma delas.

Em seguida, é constatado que a Lei da Gravitação Universal de Newton não diz nada sobre qualquer tipo de dilatação temporal e que ela nem poderia dizer nada desse tipo, já que Newton acreditava que o espaço e o tempo eram absolutos. Esse aspecto é trazido à tona e ilustrado com uma fala do próprio Newton sobre o assunto (Figura 5).

Para encerrar essa seção introdutória, é apresentado um vídeo que discute a precessão do periélio de Mercúrio (extraído e traduzido de (WONDRIUM, 2012)) com o objetivo de demonstrar que a Lei da Gravitação Universal de Newton não só não explica o fenômeno que foi apresentado no vídeo de motivação inicial, retirado de uma situação ficcional, como também falha em explicar algo que ocorre de fato de forma observável na vizinhança do nosso planeta. O objetivo com isso é mostrar ao aluno que quando surgem situações que uma teoria vigente não pode explicar, é preciso a busca por uma nova teoria que possa englobar também essas novas situações. Isso contribui para um de nossos objetivos específicos, que é *proporcionar aos alunos uma visão mais precisa sobre o desenvolvimento científico*.

A Lei da Gravitação Universal de Newton

Como estudado anteriormente, a Lei da Gravitação Universal, desenvolvida por Isaac Newton no século XVII, diz que, se dois corpos possuem massa, ambos se atraíram com uma força proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}$$

Teste seus conhecimentos sobre Gravitação Newtoniana!

Pela Terceira Lei de Newton, a força que a Terra exerce sobre nós é igual em módulo à força que nós exercemos sobre a Terra. Por que, então, ao soltarmos um objeto no ar, é ele que cai e não a Terra que "sobe"? +

Se o Sol atrai a Terra em sua direção, por que ela o orbita em vez de "cair" até ele? +

Figura 4 – Formulação e perguntas sobre a Lei da Gravitação Universal de Newton. (Fonte: O autor)

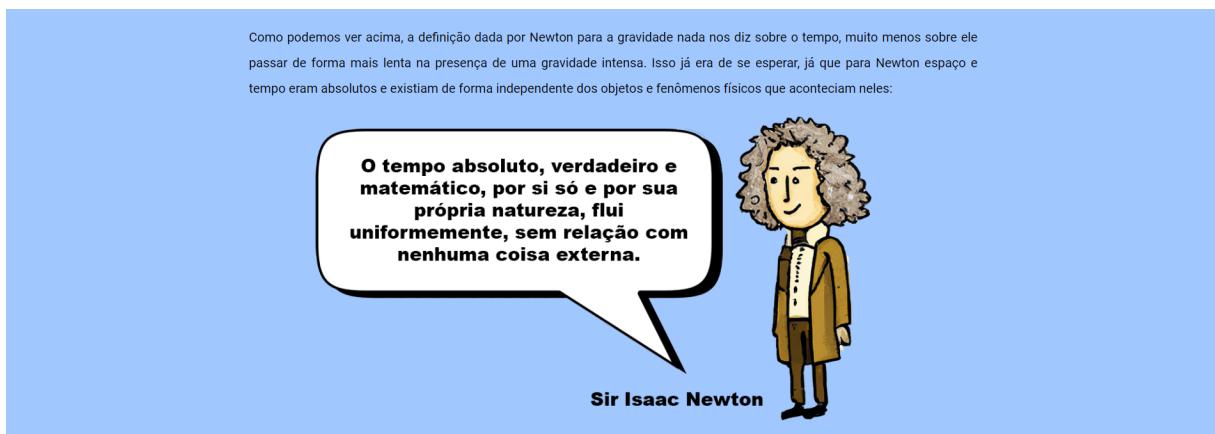


Figura 5 – Citação de Isaac Newton sobre o tempo absoluto. (Fonte: O autor)

5.2 Mudanças no Espaço e Tempo

Apesar de o foco do ambiente virtual ser trabalhar os conceitos da Relatividade Geral, decidimos antes construir alguns conceitos da Relatividade Restrita nesta segunda seção por dois motivos: primeiro, para tentar superar a dificuldade apontada por (KERSTING et al., 2018) e citada na Tabela 3, que diz que *a Relatividade Geral requer muito conhecimento prévio, em especial sobre a Relatividade Restrita*. E o segundo é porque consideramos a mudança do paradigma Newtoniano de espaço e tempo absolutos para o Einsteiniano — em que ambos são relativos — de grande importância, tanto para uma visão mais precisa sobre o desenvolvimento científico, quanto para introduzir os alunos à noção de espaço-tempo como uma só entidade física, ideia essencial à Teoria da Relatividade Geral.

Sendo assim, esta seção se inicia expondo que a Teoria da Relatividade Restrita surgiu

em decorrência de um conflito entre duas ideias: a de que a velocidade de um objeto depende do referencial em que o observador se encontra, e a de que a velocidade da luz é a mesma para todos os referenciais inerciais. É dito então que Einstein tomou a segunda ideia como princípio, determinou que a primeira só vale para velocidades muito menores que a da luz e ao mesmo tempo postulou que as leis da física preservam a sua validade em qualquer referencial inercial.

A partir daí, são trabalhadas três consequências diretas desses postulados: a relatividade da simultaneidade, a dilatação temporal e a contração espacial. As duas primeiras foram apresentadas com o uso de experimentos mentais (Figura 6), inspirados nos experimentos mentais presentes em (HEWITT, 2015), e a última foi expressa de forma mais breve somente com o auxílio de uma imagem e um vídeo, pois preferimos focar mais nas consequências temporais da Relatividade Restrita, já que essa foi a motivação inicial trazida na Introdução.

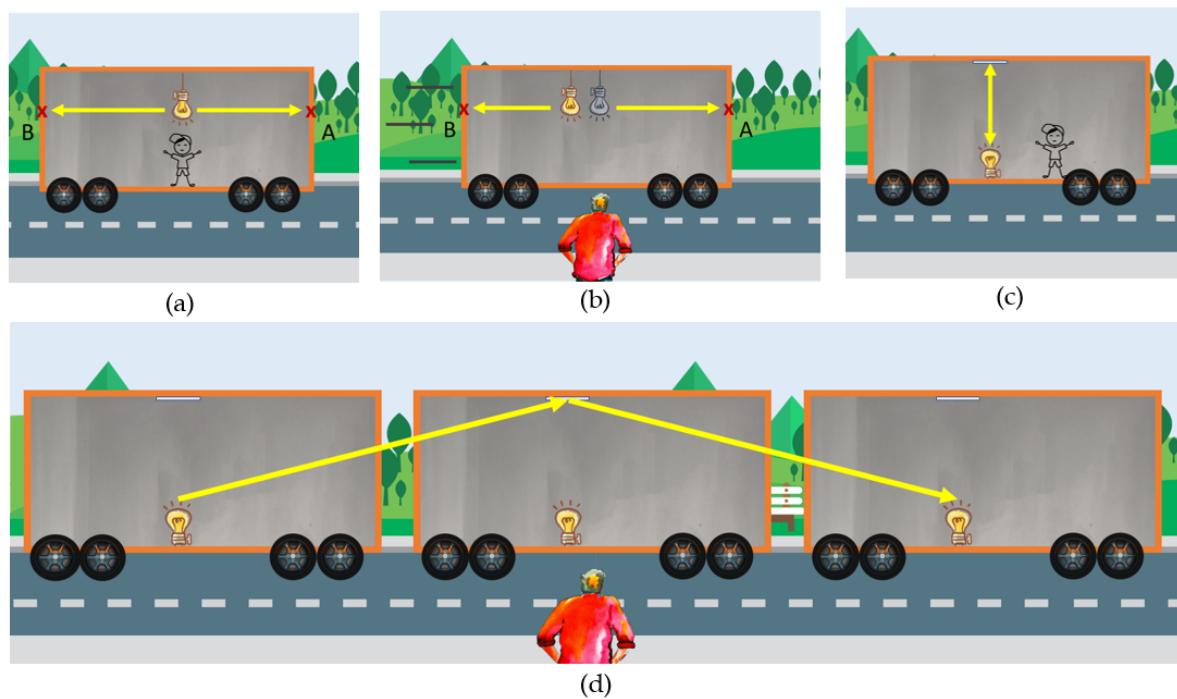


Figura 6 – Os quadros (a) e (b) ilustram um experimento mental que demonstra a relatividade da simultaneidade e os quadros (c) e (d) ilustram um experimento mental que auxilia a discussão sobre a dilatação temporal. (Fonte: O autor)

Após a discussão sobre a dilatação temporal, é dito que essa ainda não explica a dilatação temporal vista no vídeo inicial de motivação, já que ela não tem nenhuma relação com a gravidade e que é preciso então continuar investigando.

No final da seção, há uma balão com uma fala do matemático Hermann Minkowski sobre a união do espaço-tempo em uma entidade física só (Figura 7), com o objetivo de destacar uma das consequências mais importantes desta seção, assim como para mais uma vez promover uma visão mais assertiva do fazer científico ao mostrar que as ideias

da Relatividade não surgiram todas só de Einstein, mas que essas tiveram também a colaboração de outros cientistas, até mesmo de outras áreas.



Figura 7 – Citação de Hermann Minkowski sobre o espaço-tempo. (Fonte: O autor)

5.3 O Princípio da Equivalência

Enfim, na terceira seção finalmente começamos a de fato falar sobre os conceitos da Teoria da Relatividade Geral como vistos no Capítulo 3, começando pelo Princípio da Equivalência, que foi justamente de onde Einstein partiu para construir essa teoria. Essa seção começa com uma pequena contextualização histórica, que é seguida por um vídeo de uma bola e uma pena caindo no vácuo (extraído de (BBC, 2014)) que demonstra a universalidade da gravitação. Há também um “box” em formato de pergunta que discute em maiores detalhes o porquê de ambos os objetos caírem com a mesma aceleração, utilizando conhecimentos prévios dos alunos sobre gravitação newtoniana.

É dito então que Einstein chegou ao princípio da equivalência a partir dessa ideia, acompanhado de um balão com uma citação do mesmo sobre o que ele considerou “o pensamento mais feliz de sua vida” (Figura 8).

Após isso, o Princípio da Equivalência é mais formalmente enunciado, e em sequência é dito que ele está por trás da sensação de gravidade zero que os astronautas experimentam na Estação Espacial Internacional, apesar de eles estarem sempre sobre a influência da gravidade da Terra. O objetivo com essa parte é ajudar a desconstruir uma das concepções alternativas apontadas por (WATTS, 1982) como uma das mais comuns entre os alunos: que a gravidade não existe fora da atmosfera da Terra, e por isso não agiria sobre os astronautas ou sobre a Lua, por exemplo.

Na sequência, é explicitado o fenômeno da dilatação temporal gravitacional como uma consequência do Princípio da Equivalência. Esse fenômeno é explorado a partir de um experimento mental, onde se compara o tempo de um relógio em queda livre (C) com dois relógios A e B fixos em diferentes alturas da Terra (Figura 9). Como, graças à Relatividade

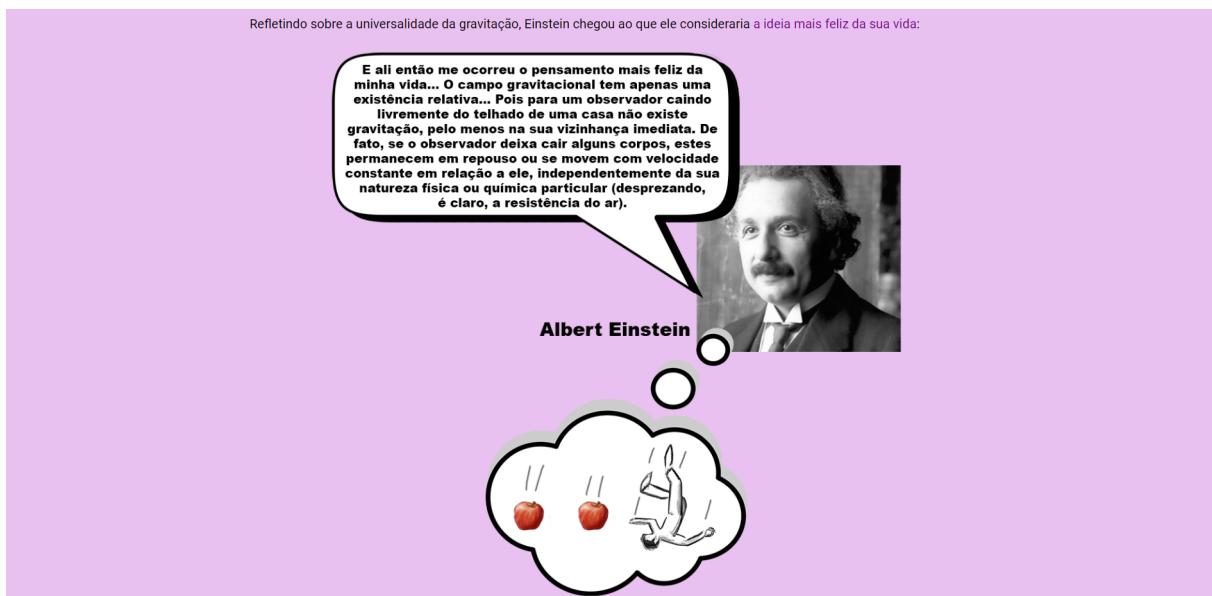


Figura 8 – Citação de Albert Einstein sobre o “o pensamento mais feliz de sua vida”: O Princípio da Equivalência. (Fonte: O autor)

Restrita, C percebe o relógio de A batendo mais lentamente que o seu, e logo após B batendo seu relógio ainda mais lentamente, pode-se concluir que, quanto mais próximo da fonte do campo gravitacional, mais devagar o tempo flui.

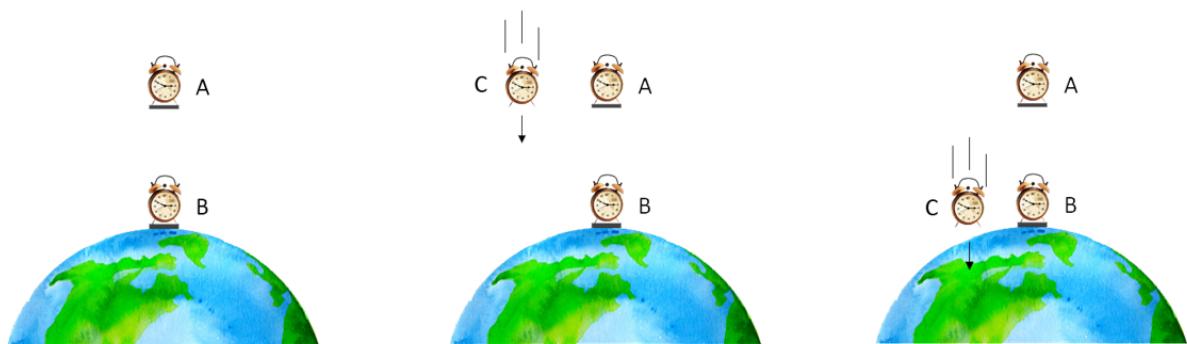


Figura 9 – Experimento mental que auxilia no entendimento do efeito de dilatação temporal gravitacional. (Fonte: O autor)

No final da seção há ainda dois “boxes” de perguntas. No primeiro, indaga-se sobre a importância da dilatação temporal para o funcionamento do GPS, o que é acompanhado de uma resposta que explora o funcionamento do mesmo e a importância das correções relativísticas para sua aplicação de forma funcional. O objetivo aqui ao explorar o GPS é cumprir o objetivo específico número três deste trabalho: *promover a compreensão de alguma tecnologia atual*.

Já no segundo “box”, pergunta-se como a gravidade influencia o movimento da luz, o que é explicado novamente com o auxílio de um experimento mental. Foi incluído também na resposta o fato de esse desvio da luz pela gravidade do Sol ter sido pela primeira vez

comprovado parcialmente aqui no Brasil e como esse fenômeno é observado até hoje em fotos astronômicas, como na recente foto do telescópio espacial James Webb (NASA, 2022). Os objetivos aqui são muitos. O primeiro é destacar mais uma vez as diferenças entre os modelos Newtoniano e Einsteiniano para a gravidade, já que o modelo de Newton não prevê nenhuma influência da gravidade sobre a luz. O segundo é promover a valorização do Brasil no desenvolvimento científico, ao mostrar aos alunos que a primeira comprovação de uma das teorias mais importantes do século XX foi feita em solo brasileiro. E o último é *impulsionar o interesse dos alunos em ciências* (um de nossos objetivos específicos), ao trazer esta relação entre a teoria que ele está aprendendo e uma das divulgações científicas mais impactantes do ano.

5.4 Forças de Maré e Curvatura

Nesta seção, tem-se como objetivo realizar a conexão entre a quebra da validade do Princípio da Equivalência para referenciais muito grandes e o entendimento da gravidade como a manifestação da curvatura do espaço-tempo. Nos parece que este se apresenta como o maior desafio deste e de qualquer outro material que busca ensinar a Teoria da Relatividade Geral, já que este é um raciocínio e salto conceitual bem sofisticado e difícil de ser simplificado para um público mais leigo. Entre os livros sobre Relatividade Geral que analisamos durante o Capítulo 3, o que consideramos que apresentou um caminho mais simples e bem construído para realizar esta conexão foi o (THORNE, 1995), e por isso decidimos por fazer uma narrativa similar à dele em nosso ambiente virtual.

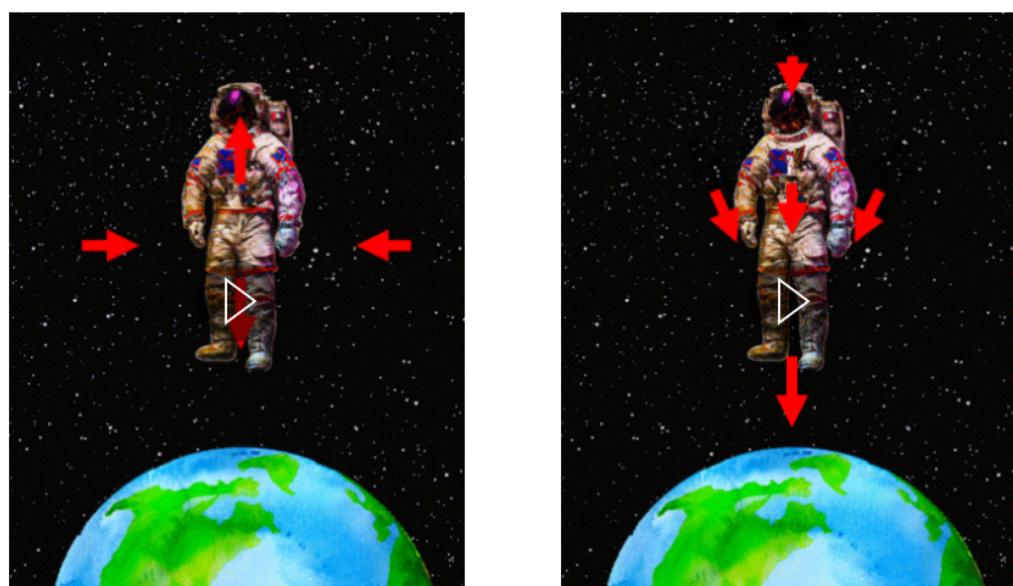


Figura 10 – Figuras (animações no ambiente virtual) que ilustram o experimento mental do astronauta gigante caindo em direção à Terra. (Fonte: O autor)

Começamos então com um experimento mental de um astronauta gigante caindo em direção à Terra. Com o auxílio de animações (Figura 10), é possível ver que, quando um referencial em queda livre é consideravelmente grande, o Princípio da Equivalência deixa de ser válido, já que forças residuais (conhecidas como forças de maré) começam a ser sentidas. Argumentamos então que essas forças residuais são a chave para o entendimento da natureza da gravidade.

O experimento mental é seguido de um “box” em formato de pergunta que explora a relação das forças de maré com as marés oceânicas sentidas aqui na Terra. A intenção aqui é promover uma ligação entre os conceitos que estão sendo estudados e algo que pode ser observado no cotidiano do aluno (se esse vive em uma região litorânea, é claro), a fim de assim tentar promover um interesse maior do aluno pelo conteúdo que está sendo ensinado.

A partir daí os conceitos de curvatura e de geodésica são apresentados: espaços em que duas retas inicialmente paralelas continuam paralelas são espaços de curvatura nula (Figura 11.a), espaços em que esse paralelismo não se mantém são curvos (Figura 11.b), dada a substituição de “reta” pelo conceito mais geral de “geodésica”, que é a curva sobre um espaço qualquer que é a “mais reta possível” dada a geometria deste.

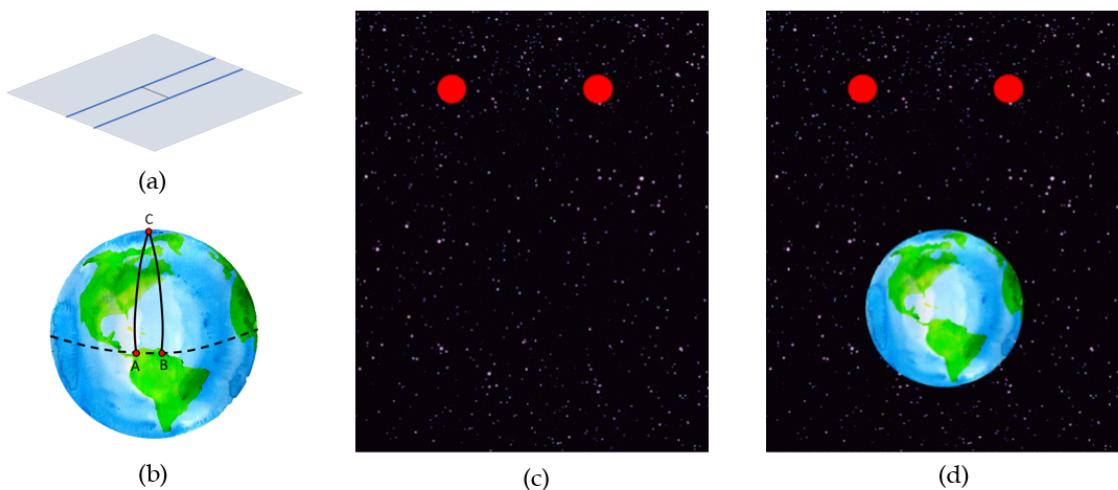


Figura 11 – Ilustrações de espaços com diferentes curvaturas (A) e (B), e o comportamento de partículas livres em um universo sem gravidade (C) e com gravidade (D) — animações no site. (Fonte: O autor)

Em seguida, relacionamos esses conceitos com a gravitação ao mostrarmos que partículas inicialmente em repouso seguem geodésicas no espaço-tempo de forma paralela quando não estão sob a influência da gravidade (Figura 11.c), e de forma não paralela quando estão sob a influência de um campo gravitacional (Figura 11.d). Concluímos então que as forças de maré vistas anteriormente, e a própria gravidade, na verdade são a manifestação da curvatura do espaço-tempo em que vivemos.

5.5 A Teoria da Relatividade Geral

Enfim, após o desenvolvimento de todos os conceitos importantes da Teoria da Relatividade Geral, esta última seção tem como objetivo reunir de forma resumida as ideias-chave da teoria (como apontadas na Seção 3.1), assim como explorar de forma breve algumas situações em que a mesma se faz importante.

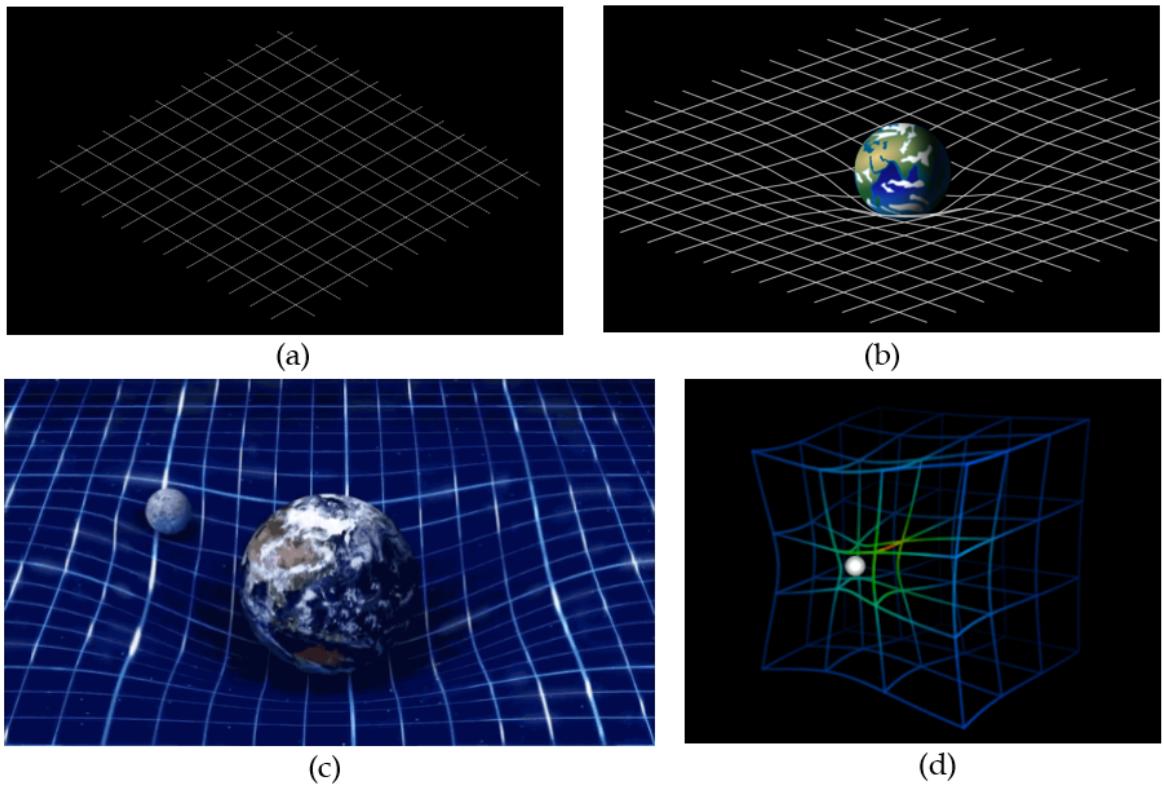


Figura 12 – O modelo da cama elástica (em A, B e C) e uma tentativa de visualização da curvatura do espaço em 3 dimensões (em D). (Fonte: (IUCASVB'S, 2016)(THE VERGE, 2016))

Nós começamos então esse resumo com o uso do modelo da cama elástica (explorado em maiores detalhes na Subseção 4.2.1) para, além de resumir as ideias-chave da Relatividade Geral, também trazer uma visualização melhor dos conceitos da mesma. É visto então, com o auxílio dos itens “a”, “b” e “c” da Figura 12 como esse modelo funciona. Porém, como vimos na Subseção 4.2.1, este modelo apresenta falhas que podem causar concepções alternativas entre os alunos e o melhor jeito de evitar que isso ocorra é destacando para eles os aspectos que este modelo falha em traduzir. Por isso, foi inserida também a Figura 12.d, que, apesar de não estar completamente correta conceitualmente, pode ajudar os alunos a fixar melhor que a gravidade atua em todas as direções do espaço — e não somente na direção mostrada no modelo da cama elástica. Porém, esse modelo também falha em mostrar que a dimensão temporal do espaço-tempo também é deformada pela presença de objetos com massa, por isso, foi inserido também um lembrete de que, como

visto anteriormente, o tempo também é afetado pela gravitação e de que, quanto mais próximo de um objeto massivo, mais devagar o tempo passa.

Para encerrar essa primeira parte em que os conceitos da Relatividade Geral são sintetizados, foi inserido um balão com uma citação do físico John Wheeler (Figura 13) que resume, em uma única frase, as principais conclusões da teoria. O objetivo de acrescentar essa citação, assim como as demais vistas ao longo do ambiente virtual, é trazer para o aluno rostos de diferentes cientistas que foram importantes para a construção do conceito da gravidade com o passar dos anos, em uma tentativa de assim mostrar que a ciência é feita com a colaboração de muitos, e não é uma atividade individualizada, buscando assim mais uma vez contribuir para o objetivo de *proporcionar aos alunos uma visão mais precisa sobre o desenvolvimento científico*.



Figura 13 – Citação do físico John Wheeler sobre a Teoria da Relatividade Geral. (Fonte: O autor)

Na segunda parte da Seção, então, discute-se sobre algumas situações em que a Relatividade Geral se mostra importante. Para isso, é inserido um parâmetro de medição dado pela Equação (5.1) (HARTLE, 2006):

$$\epsilon = \frac{GM}{Rc^2}, \quad (5.1)$$

onde G é a constante gravitacional universal, M é a massa característica do sistema, R é seu tamanho característico e c é a velocidade da luz no vácuo. O resultado dessa equação para cada fenômeno de interesse dá um número adimensional que, quando pequeno, indica que a descrição Newtoniana é adequada e, quando grande (próximo de 1), indica que as correções relativísticas são importantes.

Em seguida então é calculado esse número para alguns dos casos que foram vistos anteriormente durante o ambiente virtual (os satélites de GPS e a precessão do periélio de Mercúrio). Mesmo que essa quantidade seja pequena em ambas as situações, ainda assim efeitos relativísticos tem grande impacto na sua descrição, como foi visto.

Na sequência, esse número é calculado para objetos mais densos no universo, como as anãs brancas e as estrelas de nêutrons, onde o seu resultado é bem expressivo, e portanto as correções relativísticas para esses objetos se tornam muito mais relevantes.

E, por fim, cita-se quanto esta quantidade vale para buracos negros, e é feita uma breve explicação sobre a sua natureza e um pouco da história das fotografias recentes tiradas de buracos negros supermassivos pelo Event Horizon Telescope (The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019) (Figura 14). O objetivo aqui é mais uma vez impulsionar o interesse dos alunos em ciências ao conectar o que eles estão aprendendo com divulgações científicas recentes que foram amplamente veiculadas pela mídia e que possivelmente chamam a atenção dos estudantes.

O ambiente virtual chega ao fim com uma frase de encerramento que busca mais uma vez ressaltar as diferenças entre a gravidade clássica e a relativística, destacando que apesar de a descrição newtoniana da gravidade ser válida e poder se aplicada para diversos casos do cotidiano, a teoria da gravidade apresentada por Einstein oferece uma descrição mais completa para o nosso universo e prevê diversos fenômenos que a gravidade de Newton não consegue explicar.

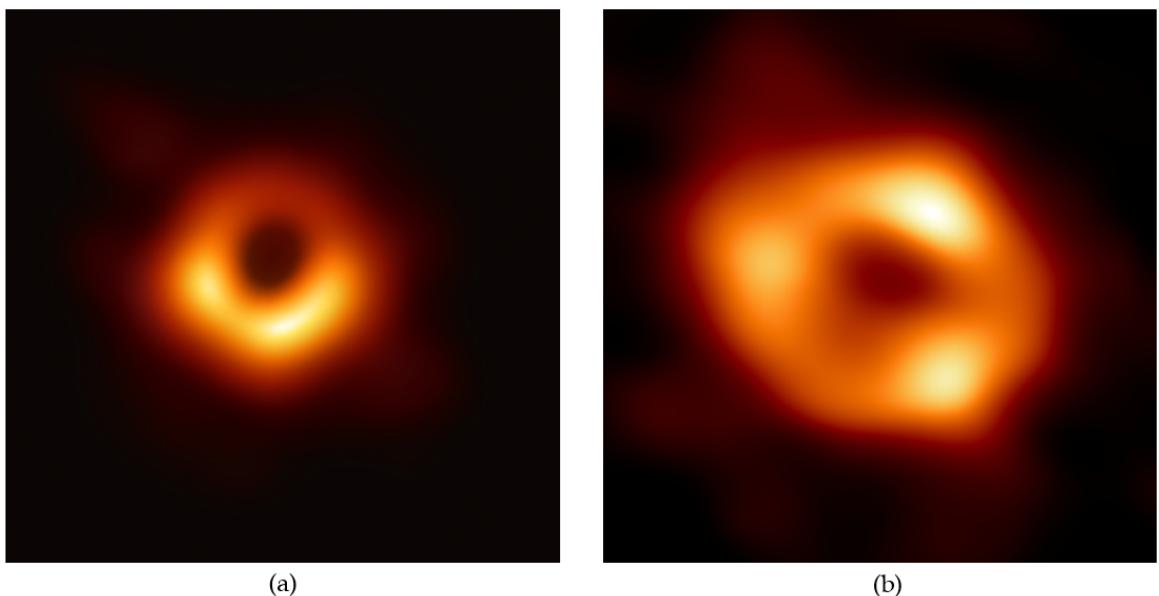


Figura 14 – (a) A primeira imagem de um buraco negro, localizado no centro da galáxia Messier 87, 2019. (b) Fotografia de Sagittarius A*, o buraco negro localizado no centro da nossa galáxia, 2022. (Fonte: (The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019; The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2022))

6 Conclusão

O presente trabalho se inciou, dentre outros motivos, da necessidade de se ensinar tópicos de Física Moderna no Ensino Médio; temas que, apesar de existirem há mais de um século, não se fazem ainda muito presentes nas salas de aula dos alunos dessa faixa etária. Como o material disponível para tal ainda não é muito amplo, buscou-se com esse trabalho o desenvolvimento de um ambiente virtual que promovesse o Ensino da Teoria da Relatividade Geral no Ensino Médio de forma conceitual e dinâmica. Durante nossa pesquisa, ao nos debruçarmos sobre algumas das vantagens do ensino da Relatividade Geral no Ensino Médio, surgiram algumas metas adicionais que foram incorporadas aos objetivos a serem alcançados com o ambiente virtual. Por fim, após uma pesquisa a respeitos dos conceitos-chave que compõem a Teoria da Relatividade Geral, os principais desafios ao ensiná-los e os principais recursos utilizados para tal, foi enfim proposto o ambiente virtual embasado em todas as informações que foram obtidas de nossa pesquisa anterior. O mesmo está disponível no site <https://alessandrolutterbach.github.io/relatividade>.

Podemos dizer que o Ambiente Virtual foi pensado do início ao fim de forma a cumprir também com os objetivos específicos que foram delimitados anteriormente: houve, durante as suas seções, várias inserções que buscaram impulsionar o interesse dos alunos em ciências, assim como proporcionar aos alunos uma visão mais precisa sobre o desenvolvimento científico. Além disso, o objetivo de promover a compreensão de alguma tecnologia atual foi cumprido com a inserção de um box com informações sobre o GPS e a sua relação com a Relatividade. O último objetivo — facilitar o entendimento da Relatividade Geral ao apresentá-la em conjunto ou logo na sequência da Gravidade Newtoniana — também foi cumprido já que o Ambiente Virtual foi inteiramente pensado para que o tema da Relatividade Geral fosse trabalhado em sala de aula logo depois da Gravitação Universal de Newton.

Apesar de os objetivos propostos terem sido cumpridos, ainda há espaço para melhorias que o autor pretende implementar futuramente, como a adaptação do Ambiente Virtual para dispositivo móveis e o teste do mesmo em salas de aula, que com certeza trarão um grande aperfeiçoamento para os recursos desenvolvidos.

Referências

- 1UCASVB'S. *Einstein's General Theory of Relativity*. 2016. Disponível em: <<https://1ucasvb.tumblr.com/post/142605511227/in-einsteins-general-theory-of-relativity-space>>. Citado na página 35.
- ABBOTT, B. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, American Physical Society (APS), v. 116, n. 6, feb 2016. Citado na página 6.
- AMABIS et al. *Universo e Evolução*. São Paulo: Moderna, 2021. (Coleção Moderna Plus). Citado na página 17.
- ANDRADE, B. L. D.; FERRARI, N. As analogias e metáforas no ensino de ciências à luz da epistemologia de Gaston Bachelard. *Revista Ensaio*, v. 2, n. 2, p. 182–192, 2002. Citado na página 23.
- BALDY, E. A New Educational Perspective for Teaching Gravity. *International Journal of Science Education*, Routledge, v. 29, n. 14, p. 1767–1788, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 6, 15 e 25.
- BBC. *Brian Cox visits the world's biggest vacuum*. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs>>. Citado na página 31.
- BERNARDO, J. R. da R. Questões sociocientíficas no ensino de física: tensões, limites e possibilidades. In: CAMARGO, S. et al. (Ed.). *Controvérsias na Pesquisa em Ensino de Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2014. p. 327–343. Citado na página 13.
- BRASIL. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+). Ciências da Natureza e Matemática e suas tecnologias. 2006. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 13.
- BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. 2018. Citado na página 6.
- CALTECH. *How are quantum phenomena used in technology today?* 2018. Disponível em: <<https://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/quantum-technology>>. Citado na página 13.
- CHOUDHARY, R. K. et al. Can a short intervention focused on gravitational waves and quantum physics improve students' understanding and attitude? *Physics Education*, IOP Publishing, v. 53, n. 6, p. 065020, oct 2018. Citado na página 9.
- DUIT, R. et al. The Model of Educational Reconstruction — a Framework for Improving Teaching and Learning Science. In: JORDE, D.; DILLON, J. (Ed.). *Science Education Research and Practice in Europe: Retrospective and Prospective*. Rotterdam: SensePublishers, 2012. p. 13–37. ISBN 978-94-6091-900-8. Citado na página 7.
- EINSTEIN, A.; LEVY, S. *A teoria da relatividade: Sobre a teoria da relatividade especial e geral*. Porto Alegre: L&PM Editores, 2022. ISBN 9786556663272. Citado na página 22.

- FREIRE, P. *Pedagogia do Oprimido*. São Paulo: Paz e Terra, 2000. ISBN 9788521900054. Citado na página 19.
- FUKUI et al. *Evolução, tempo e espaço*. São Paulo: SM Educação, 2021. (Coleção Ser Protagonista). Citado na página 17.
- GASPAR, A. *Eletromagnetismo e Física Moderna*. São Paulo: Editora Ática, 2013. (Coleção Compreendendo a Física). Citado na página 19.
- GIL, D.; SOLBES, J. The introduction of modern physics: Overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, v. 15, p. 255–260, 1993. ISSN 14645289. Citado na página 9.
- GODOY, L. P. de; DELL'AGNOLO, R. M.; MELO, W. C. de. *Origens*. São Paulo: FTD, 2021. (Coleção Multiversos). Citado na página 17.
- GUTFREUND, H.; RENN, J. *The Road to Relativity: The History and Meaning of Einstein's "The Foundation of General Relativity"*. Princeton: Princeton University Press, 2015. Citado na página 12.
- HARTLE, J. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. ISBN 9781316517543. Citado na página 19.
- HARTLE, J. B. General Relativity in the undergraduate physics curriculum. *American Journal of Physics*, American Association of Physics Teachers (AAPT), v. 74, p. 14–21, 2006. ISSN 0002-9505. Citado 5 vezes nas páginas 16, 18, 19, 24 e 36.
- HEWITT, P. *Física Conceitual - 12.Ed*. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015. ISBN 9788582603413. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 30.
- IBGE. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - Educação 2019*. 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101736_informativo.pdf>. Citado na página 17.
- KAUR, T. et al. Teaching Einsteinian physics at schools: part 1, models and analogies for relativity. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 52, n. 6, p. 065012, sep 2017. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 9.
- KAUR, T. et al. Teaching Einsteinian physics at schools: part 3, review of research outcomes. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 52, n. 6, p. 065014, sep 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 15.
- KAUR, T. et al. Determining the Intelligibility of Einsteinian Concepts with Middle School Students. *Research in Science Education*, Springer Science and Business Media LLC, v. 50, n. 6, p. 2505–2532, 2018. Citado na página 14.
- KERSTING, M. et al. General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction. *Physical Review Physics Education Research*, American Physical Society, v. 14, 5 2018. ISSN 24699896. Citado 4 vezes nas páginas 6, 20, 21 e 29.
- KERSTING, M.; STEIER, R. Understanding curved spacetime: The role of the rubber sheet analogy in learning general relativity. *Science and Education*, Springer Netherlands, v. 27, p. 593–623, 10 2018. ISSN 15731901. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

- KUHN, T. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Editora Perspectiva, 2020. (Debates). ISBN 9786555050257. Citado na página 11.
- LOPES, S.; ROSSO, S. *Evolução e universo*. São Paulo: Moderna, 2021. (Coleção Ciências da natureza: Lopes & Rosso). Citado na página 17.
- MORTIMER et al. Origens: O universo, a matéria e a vida. Editora Scipione, São Paulo, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.
- NASA. *NASA's Webb Delivers Deepest Infrared Image of Universe Yet*. 2022. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/nasa-s-webb-delivers-deepest-infrared-image-of-universe-yet>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 33.
- PALMER, D. Students' alternative conceptions and scientifically acceptable conceptions about gravity. *International Journal of Science Education*, v. 23, p. 691–706, 2001. ISSN 09500693. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 28.
- PEREZ, D. G. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, p. 125–153, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 12.
- PITTS, M. et al. An Exploratory Study to Investigate the Impact of an Enrichment Program on Aspects of Einsteinian Physics on Year 6 Students. *Research in Science Education*, Kluwer Academic Publishers, v. 44, p. 363–388, 2014. ISSN 15731898. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- POSSEL, M. Relatively complicated? Using models to teach general relativity at different levels. 2018. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1812.11589>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- REINER, M.; BURKO, L. M. On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the Consequences for Physics Education. *Science & Education*, v. 12, p. 365–385, 2003. Citado na página 22.
- RINDLER, W. General relativity before special relativity: An unconventional overview of relativity theory. *American Journal of Physics*, American Association of Physics Teachers (AAPT), v. 62, n. 10, p. 887–893, 1994. Citado na página 12.
- RODRIGUES, C. M.; SAUERWEIN, I. P. S.; SAUERWEIN, R. A. Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no ensino médio via estudo do GPS. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, FapUNIFESP (SciELO), v. 36, n. 1, 2014. Citado na página 13.
- SANTOS, K. C. dos. *O Universo da Ciência e a Ciência do Universo*. São Paulo: Moderna, 2021. (Coleção Diálogo). Citado na página 17.
- SELINGARDI, G.; MENEZES, M. V. M. Compreendendo o que é ser um professor reflexivo ante a ação pedagógica. *ACTIO: Docência em Ciências*, Universidade Tecnologica Federal do Parana (UTFPR), v. 2, n. 3, p. 270, 2017. Citado na página 20.
- SHABAJEE, P.; POSTLETHWAITE, K. What happened to modern physics? arXiv, 2004. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/physics/0401016>>. Citado na página 14.

SILVA, J. R. N. da; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. 69–83, 2013. Citado na página 9.

STANNARD, R. The relativity translator. TES Magazine, 1999. Citado na página 14.

The Event Horizon Telescope Collaboration et al. First M87 event horizon telescope results. I. the shadow of the supermassive black hole. *Astrophys. J. Lett.*, American Astronomical Society, v. 875, n. 1, p. L1, abr. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 37.

The Event Horizon Telescope Collaboration et al. First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. the shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way. *Astrophys. J. Lett.*, American Astronomical Society, v. 930, n. 2, p. L12, maio 2022. Citado na página 37.

THE VERGE. *Scientists have finally proven Einstein's century-old theory about gravitational waves*. 2016. Disponível em: <<https://www.theverge.com/2016/2/11/10965312/einstein-gravitational-waves-discovered-announced-video>>. Citado na página 35.

THOMPSON et al. *Universo, Matéria e Evolução*. São Paulo: Moderna, 2021. (Coleção Conexões). Citado na página 17.

THORNE, K. *Black Holes and Time Warps: Einsteins Outrageous Legacy*. Nova York: WW Norton, 1995. (Commonwealth Fund Book Program). ISBN 9780393312768. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 33.

VELENTZAS, A.; HALKIA, K. The use of thought experiments in teaching physics to upper secondary-level students: Two examples from the theory of relativity. *International Journal of Science Education*, Routledge, v. 35, n. 18, p. 3026–3049, 2013. Citado na página 22.

WATTS, D. M. Gravity - don't take it for granted! *Physics Education*, v. 17, n. 3, p. 116, 1982. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 31.

WONDRIUM. *The Mysterious Orbit of Mercury*. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hSXNE0pNtr8&ab>>. Citado na página 28.