Recital

Revista de Educação,
Ciência e Tecnologia de Almenara/MG.

CONCEITOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA DE EINSTEIN EM LIVROS DIDÁTICOS: UMA ABORDAGEM NA PERSPECTIVA DO ENSINO MÉDIO

Concepts of Einstein's Restricted Theory of Relativity in textbooks: a high school perspective approach

Ian Lima SANTANA
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (Uesb) - Campus Vitória da Conquista.
ianlimasantana@gmail.com

Ramon Alves dos SANTOS
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (Uesb) - Campus Vitória da Conquista.
ramonalvesfernandes@gmail.com

Carlos TAKIYA
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (Uesb) - Campus Vitória da Conquista.
takiya@uesb.edu.br

DOI: https://doi.org/10.46636/recital.v3i1.155

Resumo

Neste trabalho buscamos analisar e discutir como alguns conceitos da Teoria da Relatividade Restrita de Albert Einstein são abordados em alguns livros didáticos do ensino médio. Os conceitos mais recorrentes foram: espaço, tempo, contração do comprimento, dilatação do tempo, constância da velocidade da luz, princípio da relatividade e, principalmente, massa e energia. Os livros didáticos consultados foram publicados entre os anos de 2001 e 2012, a saber: Boas, Doca e Biscuola (2001); Ramalho, Nicolau e Toledo (2007) e Calçada e Sampaio (2012). Inicialmente, formulamos nossa base teórica a partir de livros de divulgação científica para base de comparações com os livros didáticos pesquisados. Os resultados apontam que há certas discordâncias entre os livros pesquisados no que diz respeito à relação de equivalência entre

massa e energia. Alguns autores consideram a conversão de massa em energia e vice-versa, enquanto outros tratam isso como um equívoco conceitual e a única relação que existe entre essas duas grandezas é meramente numérica. Ademais, cabe dizer que a análise e a discussão das abordagens feitas pelos livros didáticos pesquisados têm o objetivo de contribuir com uma visão mais ampla sobre o conteúdo tratado.

Palavras-chave: Ensino Médio. Física Moderna. Livros Didáticos. Teoria da Relatividade Restrita.

Abstract

This paper aims to analyze and discuss how some concepts of Albert Einstein's Theory of Special Relativity are addressed in some high school textbooks. The most recurring concepts were: space, time, contraction of length, expansion of time, constancy of the speed of light, principle of relativity and, mainly, mass and energy. The consulted textbooks were published between 2001 and 2012, namely: Boas, Doca and Biscuola (2001); Ramalho, Nicolau and Toledo (2007) and Calçada and Sampaio (2012). Initially, we formulated our theoretical basis from scientific dissemination books for comparisons with the researched textbooks. The results showed that there are certain disagreements between the books researched in regard to the equivalence relationship between mass and energy. Some authors consider the conversion of mass into energy and vice versa, while others treat this as a conceptual mistake and point out that the only relationship that exists between these two quantities is merely numerical. In addition, it is worth saying that the analysis and discussion of the approaches made by the researched textbooks has the objective to contribute with a broader view on the treated content.

Keywords: High school. Modern Physics. Textbooks. Einstein’s Restricted Theory of Relativity.

INTRODUÇÃO

No ano de 1905, Albert Einstein (1879-1955) aos seus 26 anos desenvolveu a Teoria da Relatividade (TR), uma conjugação de duas teorias: a Teoria da Relatividade Geral (TRG) e a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) ou Teoria da Relatividade Especial. Einstein desenvolveu uma versão moderna da Teoria da Relatividade Clássica para resolver pendências desta última, como, por exemplo, a falta de simetria apresentada em alguns fenômenos eletromagnéticos, o movimento descrito pelas órbitas dos planetas, os buracos negros. Dada a fama dessa nova teoria, é comum que a palavra relatividade possa lembrar uma imagem de Einstein, entretanto a ideia não começou com ele. Muitos grandes estudiosos exploraram a relatividade há muito tempo, como Galileu e Newton.

Esses dois grandes nomes da Física, que também estiveram envolvidos na exploração da relatividade, desenvolveram uma primeira versão bem aceita da Relatividade Clássica. O que Einstein fez foi desenvolver uma versão moderna da Teoria da Relatividade e, sobre isso, consta dizer que o nome inicial dado por ele a essa teoria foi Teoria dos Invariantes, e foi Max Planck quem sugeriu o nome Teoria da Relatividade para ressaltar o fato de que o movimento aparece sempre como o movimento relativo de um objeto em relação a outro. Essa nova teoria foi concebida para, dentre outras razões, resolver problemas pendentes da Teoria da Relatividade Clássica, conforme mencionado anteriormente. Essa nova versão é dividida em duas partes bem

amplas. Uma é a Relatividade Restrita ou Relatividade Especial, que lida com observadores que se movem em velocidade relativa constante. A outra é a Relatividade Geral, que analisa observadores acelerados. Nesse sentido, Einstein é famoso pelo fato de que suas teorias fizeram previsões revolucionárias para a Física como, por exemplo, as ondas gravitacionais. O mais importante desse feito é que suas teorias foram examinadas com grande precisão em inúmeros experimentos (DYSON; EDDINGTON; DAVIDSON, 1920), alterando para sempre o conceito de tempo e espaço (COLES, 2001).

A dificuldade dos fenômenos descritos pela Teoria da Relatividade é a visualização, visto que eles se tornam perceptíveis apenas sob certas condições. No entanto, o papel do professor é conscientizar os alunos sobre tais efeitos e que de certa forma esses feitos exerce influência, mesmo que seja mínima, em nosso cotidiano e que, de fato, há ferramentas teórico-metodológicas ligadas à Física que explicam fenômenos recorrentes do dia a dia. Nesse sentido, cabe dizer que, nas últimas décadas, a adoção do livro didático (LD) tem causado grandes empecilhos no processo educativo, por exemplo, um aprendizado mecanizado dos conteúdos, pois se tal ferramenta for utilizada de forma equivocada, ela passa a regular a forma como o conteúdo é abordado e limita o professor de criar novas estratégias para um ensino inovador. Esse fato deve ser algo preocupante, pois a Física, assim como outras ciências, está sempre em constantes transformações e, nesse sentido, ferramentas como os livros didáticos (LDs) devem ser materiais de alto poder metodológico para promover um bom ensino dos seus usuários.

Segundo Rodrigues (2001):

> A física é uma ciência, e como tal se encontra sempre em desenvolvimento. No entanto, neste último século, a quantidade de inovações e rupturas com visões anteriores tem alcançado um número muito grande, se comparado ao de outros períodos de sua história. O espectro do conhecimento físico, tanto no sentido do micro quanto do macro foi ampliado, em decorrência de rupturas com conceitos e significados clássicos. Teorias como a Relatividade e a Física Quântica têm servido de suporte na produção de novos conhecimentos em um novo panorama científico. Essas mudanças, no entanto, não se restringem ao universo científico, pois ultrapassam barreiras em rumo à sociedade em geral (RODRIGUES, 2001, p. 5).

O desenvolvimento da Física como ciência promove um novo panorama científico que ultrapassa os limites da sociedade como um todo e isso é extremamente relevante quando o tema é LD de Física, pois esse recurso deve estar voltado a essa visão: de ser uma ferramenta, com orientação do professor, capaz de guiar o aluno por meio de caminhos para formar uma jornada de conhecimentos científicos verdadeiros e motivadores.

Analisando a contextualização anteriormente feita, é importante considerar que a utilização de outras ferramentas didáticas como mapas conceituais, além do LD de Física, para o ensino e aprendizado da TRR, é um recurso importante que possibilita maior contribuição e melhorias no cenário do ensino de Física. Ainda nesse contexto, os mapas conceituais são "diagramas que indicam relações entre conceitos [...] que procuram refletir a organização conceitual de um corpo de conhecimento ou de parte dele, ou seja, sua existência deriva da estrutura conceitual de um conhecimento" (MOREIRA, 2016, p. 9). Tais relações permitem que o estudante catalogue e organize o conhecimento recém-adquirido de acordo com a interpretação dele do conteúdo abordado. Uma outra ferramenta que pode ser utilizada é apresentada no trabalho de Ostermann e Cavalcanti (2001) que trata o uso de pôster simples para a descrição de determinado conteúdo. O uso de pôster vinculado aos conceitos da TRR pode ser desenvolvido

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

para contribuir com uma forma alternativa para o ensino dos conceitos dessa teoria. O uso dessas ferramentas possibilita conhecimentos e ideias consistentes a professores do ensino médio de modo a criar materiais e formas didáticas de ensino potenciais.

Nesse âmbito, torna-se possível a construção de um conhecimento dialógico e interacional que diste do tradicionalismo educacional, pois, à medida que os estudantes discutem os principais conceitos da TRR, o professor poderá auxiliá-los na construção de mapas conceituais e de pôsteres referentes aos conceitos. Ao colocar em primeiro plano a participação coletiva dos estudantes na discussão do conteúdo, tal metodologia de ensino, por meio das ferramentas abordadas, permite que os alunos exponham sua compreensão do tema tratado e dos fenômenos dentro do escopo da TRR. Em tal sentido, sabendo que a TRR é um dos conteúdos vigentes nas Ciências Naturais, deve-se ter as habilidades e competências de ensino-aprendizagem de investigação e compreensão postas na modalidade de ensino regular quando esse conteúdo for abordado nas aulas de Física.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais estabelecem que o ensino de Ciências Naturais deve ser obrigatório na modalidade regular de ensino e que tal campo de estudo deve proporcionar ao aluno as habilidades e competências nos âmbitos de investigação e compreensão, e que esses critérios lhe proporcionem uma perspectiva crítica perante o conhecimento. Assim, tendo em vista essa forma que o ensino deve se estabelecer, no âmbito do ensino de Física todo o viés científico assenta-se majoritariamente na Mecânica Clássica, mais particularmente nas Leis de Newton, no Eletromagnetismo, na Termodinâmica, Óptica e Ondas, isto é, na Física Clássica em si, visto que ela descreve com acentuado grau de precisão os fenômenos do cotidiano. Dessa forma, o estudo sobre as leis do movimento, por exemplo, pode se tornar monótono e sujeito a uma mera análise quantitativa dos fatos, se não forem levadas em conta as habilidades e competências de investigação e compreensão dos conceitos envolvidos perante o conhecimento a ser obtido. Sobre esse método de ensino defasado, Hawking (2018) afirma que:

> As escolas, no entanto, oferecem apenas uma estrutura elementar onde às vezes a rotina de decoreba, equações e provas podem indispor os jovens contra a ciência. A maioria das pessoas responde a uma compreensão qualitativa, sem a necessidade de equações complicadas. Livros de divulgação científica e artigos sobre ciência também ajudam a explicar ideias sobre o modo como vivemos [...] (HAWKING, 2018, p. 228).

Nesse sentido, em paralelo ao uso do LD, pode-se dizer que tanto os professores quanto as escolas em si não devem se alienar num ensino repetitivo, com base em memorização de conceitos e plena aplicação de equações, mas promover um ensino inovador e capaz de ampliar o horizonte de conhecimentos dos alunos em sala de aula. A forma como a Física é apresentada aos estudantes se restringe a uma mera descrição matemática da realidade vazia de significados e que não possuem nenhuma relação com as vivências dos estudantes. Conforme afirma Karam (2005):

> A forma como a Física vem sendo ensinada, na grande maioria das escolas brasileiras de Ensino Médio, tem sido alvo de muitas críticas. A ênfase na memorização e aplicação direta de fórmulas, bem como a descontextualização do desenvolvimento desta ciência, têm contribuído fortemente para distanciá-la da preferência dos estudantes e torná-la quase um mito (KARAM, 2005, p. 6).

Do recorte acima, pode-se dizer que tais formas mencionadas em relação ao ensino de Física podem torná-la uma disciplina detestada/odiada pelos alunos, uma vez que é uma forma de

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

distanciar os discentes da aprendizagem, afastando-os, assim, do verdadeiro contexto dessa ciência que é buscar entender a natureza com base na compreensão humana. Essa busca é sobretudo baseada no entendimento de conceitos e aplicações desses conhecimentos no viver, para assim entendermos nossas interações no universo que nos cerca e buscar significações para o nosso lugar no mundo.

Diante do exposto, este trabalho tem o objetivo de analisar como os conceitos da TRR são abordados em alguns livros dentro do recorte de sua análise. Nessa perspectiva, uma possível crítica em relação às considerações dos autores não é uma condenação às suas ideias, mas promover uma visão mais ampla sobre o conteúdo tratado para que tenhamos leques e ferramentas didáticas-conceituais que possam ser utilizadas em conjunto, a fim de tornar o ensino mais dinâmico e atrativo.

Este trabalho está estruturado como se segue: na seção 1, apresentamos formulações como base de comparações com os conceitos analisados nos LDs consultados; na seção 2, apresentamos a metodologia com a qual se justifica e se firma o presente trabalho e os materiais de pesquisa; na seção 3, apresentamos os resultados e discussão das fontes abordadas; como vêm sendo apresentados os conceitos da TRR no ensino médio. Na seção 4 apresentamos uma discussão perante as abordagens; por fim, apresentamos nossas considerações finais.

1 FORMULAÇÕES BASE DE CONCEITOS DA TRR

Referente à análise da TRR nos livros didáticos, utilizaremos uma estratégia pedagógica bastante inovadora, a qual constituirá nossa base teórica para comparações com o conteúdo abordado nos livros. Com o objetivo de facilitar a compreensão da TRR, os conceitos aqui tratados serão firmemente embasados em obras de divulgação científica, devido a seu caráter dinâmico e, em sua maioria, acessível. Utilizaremos dois livros em especial: O Universo Elegante (GREENE, 1999) e O Tecido do Cosmo (GREENE, 2005), ambos de autoria do físico norte americano Brian Greene. Vale ressaltar que utilizaremos apenas alguns capítulos de cada obra, os quais possuem uma leitura muito fluida, além de conter analogias que auxiliam a compreensão de seus conceitos.

As leis de Newton traçaram um panorama muito sólido referente ao estudo da Mecânica Clássica. Tal ferramenta possibilitou a unificação dos fenômenos celestes e terrestres através de um sistema matemático consistente, ao considerar as forças atuantes sobre um corpo ou sistema de corpos. Para Newton, o tempo e o espaço são entidades rígidas e absolutas que possibilitam o palco para os desdobramentos de todos os eventos no universo. No entanto, a partir do início do século XX, as ideias newtonianas foram colocadas em xeque por uma estrutura teórica que alterou substancialmente as bases da Física Clássica, conhecida como Teoria da Relatividade Restrita. Nessa perspectiva, Greene (2005) afirma que:

> O espaço e o tempo prendem a imaginação mais do que qualquer outro tema científico. E por boas razões. Eles compõem o cenário da realidade, o verdadeiro tecido do cosmo. Toda a nossa existência – tudo o que fazemos, pensamos e vivenciamos — ocorre em alguma região do espaço durante algum intervalo de tempo (GREENE, 2005, p. 9).

Nessa perspectiva, Einstein afirma que o espaço e o tempo são estruturas dinâmicas e mutáveis, passíveis de alteração em relação ao sistema de referência analisado. No ensino básico, a

dificuldade da Relatividade Restrita não reside em seu caráter matemático, mas sim na sutileza da sua base conceitual, pois elas contradizem diretamente as nossas concepções sobre a ciência, de modo que seus efeitos são ínfimos em nosso cotidiano. Ainda de acordo com Greene (1999):

> Por meio da relatividade especial, Einstein resolveu o conflito entre a "intuição tradicional" a respeito do movimento e a constância da velocidade da luz. Em síntese, a solução é que a nossa intuição está errada — ela é informada por movimentos extremamente lentos em comparação com a velocidade da luz e essas velocidades baixas ocultam o verdadeiro caráter do espaço e do tempo. A relatividade especial revela a natureza do espaço e do tempo e mostra que eles diferem radicalmente das concepções anteriores (GREENE, 1999, p. 42).

Ainda citando o autor a respeito da TRR de Einstein:

> Dessa vez, ele não só demonstrou que o espaço e o tempo são partes de uma mesma totalidade, mas também revelou que, com as suas dobras e curvas, eles participam da evolução cósmica. Longe de serem as estruturas rígidas e imutáveis descritas por Newton, o espaço e o tempo, na visão einsteiniana, são flexíveis e dinâmicos (GREENE, 2005, p. 18).

Nesse cenário, a TRR assenta-se em dois postulados. O primeiro está relacionado às leis da Física de um modo geral, denominado Princípio da Relatividade, sobre o qual, de acordo com Greene (1999, p. 27), "[...] Einstein percebeu que o princípio da relatividade tem uma acepção ainda mais ampla: as leis da física — quaisquer que sejam — têm de ser absolutamente idênticas para todos os observadores em estado de movimento uniforme". A principal implicação desse postulado é que não há um sistema de referência universal e, não obstante, todos os fenômenos são regidos pelas mesmas leis sob a mudança de um referencial para outro.

O segundo postulado, conhecido como Princípio da Constância da Luz, afirma que a velocidade da luz é constante em relação a todos os sistemas de referência e independe do movimento da fonte. Tal afirmação traz consequências notórias se comparada com as concepções clássicas, pois para um objeto que se move próximo à velocidade da luz, fenômenos como a dilatação temporal e a contração espacial tornam-se perceptíveis. Para Greene (1999, p. 31), "A constância da velocidade da luz requer que abandonemos a noção tradicional de que a simultaneidade é um conceito universal a respeito do qual todos, independentemente do seu estado de movimento, estão de acordo [...]".

O Santo Graal da TRR consiste numa estrutura teórica a qual afirma que o tempo também é uma dimensão e que, para um objeto em repouso em relação a um sistema de referência, a totalidade do movimento dá-se através da dimensão temporal. Por outro lado, a Relatividade Geral unificou o espaço e o tempo em uma única unidade, conhecida como espaço-tempo.

De acordo com Greene (1999):

> Einstein percebeu que exatamente essa ideia – a divisão do movimento entre as diferentes dimensões – está presente em todos os aspectos da física da relatividade especial. Isso se nos dermos conta de que não são apenas as dimensões espaciais que envolvem o movimento de um objeto, pois a dimensão do tempo também o envolve (GREENE, 1999, p. 39).

Na sua teoria, Einstein também demonstrou que outras propriedades físicas, como a massa e a energia, estão atreladas por meio da equação $E = mc^2$. Essa expressão tão simples relaciona duas grandezas fundamentais ao estabelecer uma equivalência entre elas: massa e energia.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Outro fato importante é que a equação anterior também define uma energia associada aos objetos estacionários, denominada energia de repouso, dada por $E_0^0 = m_0c^2$. Para Greene (1999):

> [...] Einstein mostrou também que outras propriedades físicas do mundo são também entrelaçadas. A sua equação mais famosa constitui um dos exemplos mais importantes. Nela, Einstein afirmou que a energia (E) de um objeto e a sua massa (m) não são conceitos independentes; podemos determinar a energia se conhecermos a massa (multiplicando a massa duas vezes pela velocidade da luz, c^2) e podemos determinar a massa se conhecermos a energia (dividindo a energia duas vezes pela velocidade da luz). Em outras palavras, a energia e a massa — como dólares e francos — são moedas passíveis de conversão. Ao contrário do que acontece com o dinheiro, no entanto, a taxa de câmbio, que é o quadrado da velocidade da luz, é fixa e eterna. Como essa taxa é tão grande (c^2 é um número grande), uma pequena massa produz uma enorme quantidade de energia (GREENE, 1999, p. 41).

Dessa forma, é imprescindível que novas abordagens referentes ao ensino de Física Moderna sejam adotadas, principalmente no âmbito da TRR. Terrazzan (1992) aponta em seus estudos que se deve refletir sobre a possibilidade do desenvolvimento de tópicos relacionados a esse ensino. É de suma importância que o professor utilize recursos didáticos alternativos e trace novas estratégias para tratar um conteúdo que é pouco abordado nas escolas de nível médio. Vários instrumentos podem ser utilizados em conjunto com o LD, como, por exemplo, artigos científicos, livros de divulgação científica, vídeos interativos ligados ao tema em questão, com o objetivo de dar mais significado ao conhecimento e, assim, torná-lo mais dinâmico e atrativo. Isso, por sua vez, pode conduzir a um crescimento e evolução do pensamento científico, o qual favorece uma visão de mundo mais ampla, crítica e sobretudo moderna. Nesse sentido, Giacomelli, Perez e Rosa (2019) afirmam que:

> A evolução do conhecimento científico conduz a uma visão cada vez mais ampla e crítica do mundo. Essa visão precisa permear o pensamento dos professores do ensino médio, e estes, por sua vez, devem levá-la para a sala de aula. No que diz respeito à Física, um salto importante e abrupto na evolução do conhecimento científico ocorreu com o surgimento da chamada Física Moderna (FM). A mudança na forma de interpretar o mundo decorrente dessa nova Física não tem qualquer paralelo na história. As novas teorias são contra intuitivas, abstratas, extremamente imaginativas e conduzem a uma interpretação dos fenômenos naturais que difere significativamente das que se haviam construído até então. Compreender e aceitar as consequências dessa nova visão de mundo pode se mostrar complexa para um físico experiente e se revela um verdadeiro desafio para os estudantes do ensino médio. No entanto, esse desafio intelectual pode se tornar um importante elemento no processo de ensino e aprendizagem em Física, servindo de referência para discussões mais profundas e que ultrapassam os limites desta ciência (GIACOMELLI; PEREZ; ROSA, 2019, p. 131).

No sentido desse recorte, a TRR traz um desafio grande sobre conceitos de Física Moderna no ensino médio, tornando importante o elemento de ensino-aprendizagem com o uso de formas inovadoras de ensino, que amplie os horizontes de conhecimento professor-aluno.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao considerar que o LD constitui uma importante ferramenta para o ensino, analisaremos como a TRR vem sendo abordada nesse tipo de material. Em síntese, foram pesquisados 3 LDs utilizados no ensino médio, publicados entre os anos de 2001 e 2012, a saber: Boas, Doca e Biscuola (2001); Junior, Ferraro e Soares (2007), comumente conhecidos como Ramalho, Nicolau e Toledo (2007) e Calçada e Sampaio (2012). Todos os livros analisados estão inclusos no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD). A justificativa para escolha desses LDs, publicados nesse período, se deu pelo fato de que, feita uma busca de LDs do ensino médio desses mesmos autores, analisou-se que as novas atualizações não alteraram significamente, de modo que os mesmos conceitos que serão apresentados aqui, retirados de tais obras, permanecem basicamente os mesmos. Em alguns casos, determinados conceitos não foram alterados, e os que sofreram alguma reformulação se apresentaram pouco embasados teoricamente diante da forma que foram apresentados no período considerado ou então foram retirados do LD, dando mais espaço para outros conteúdos. Assim, por considerar esses LDs publicados nos anos de 2001, 2007 e 2012, com os conceitos mais sólidos diante a TRR, é que se justifica a escolha adotada.

O LD possui amplo uso no cenário nacional e é considerado uma via segura para o conhecimento. Através dele as informações são organizadas e chegam até os leitores. Pesquisadores como Zambon e Terrazzan (2017) e Pessoa (2009) têm analisado o uso desse recurso como única ferramenta para o ensino, pois o livro é o grande responsável pela formação da consciência e está vinculado a questões históricas, filosóficas e socioeconômicas. Para justificar a análise feita nos livros mencionados, basearemos nossa metodologia nas ideias de Deitos e Malacarne (2020), ao afirmar que:

> [...] a adequação dos conteúdos, conceitos e metodologias foram direcionadas com o intuito de potencializar a capacidade do instrumento – livro didático –, em consonância com as novas propostas incorporadas pela educação, com a intenção de redirecionar a utilização do livro didático, ofertando atividades mais conscientes e reflexivas (DEITOS; MALACARNE, 2020, p. 2).

No âmbito do ensino, o LD atinge não só a disciplina de Física, mas a grade curricular como um todo e, em grande parte, é responsável pela formação da consciência dos alunos enquanto usuários desse material. Dessa forma, a discussão sobre as coleções didáticas perpassa não só o uso do livro, mas também a atuação do professor como um link para o conhecimento do aluno.

3 ABORDAGEM DA TRR NOS LIVROS DIDÁTICOS PESQUISADOS

No livro *Os Fundamentos da Física*, dos autores Ramalho, Nicolau e Toledo (2007), a TRR é descrita da seguinte forma: “A teoria da **relatividade especial ou restrita**, publicada em 1905 por Albert Einstein, discute fenômenos que envolvem sistemas de referência inerciais, propondo a não existência de um sistema de referência universal [...]” (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 414, grifo dos autores). Em seguida, os autores tratam do primeiro postulado: “As leis da Física são idênticas em relação a qualquer referencial inercial” (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 414).

Feito isso, o segundo postulado é elaborado:

> A velocidade da luz no vácuo é uma constante universal. É a mesma em todos os sistemas inerciais de referência. Não depende do movimento da fonte de luz e tem igual valor em todas as direções.
>
> A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite no universo. As leis da Mecânica Clássica foram modificadas por Einstein. Vamos, neste capítulo, analisar algumas consequências dos postulados da relatividade especial, como, por exemplo, a contração do comprimento e a dilatação do tempo (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 415).

Não obstante, os escritores também tratam das modificações na Relatividade Galileana:

> Considerando que a velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os referenciais inerciais, temos de modificar as transformações galileanas. As modificações encontradas por Einstein e que são conhecidas como transformações de Lorentz são as seguintes:
>
> $$x' = \gamma(x - u.t)$$
> $$y' = y$$
> $$z' = z$$
> $$t' = \gamma\frac{(t - vx)}{c^2}$$
>
> O coeficiente γ, denominado fator de Lorentz, é dado por:
>
> $$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$
>
> Quando a velocidade *u* é bem menor do que a velocidade de propagação da luz no vácuo, *y* é muito próximo de 1. Nessas condições, resulta $x' = x - u \cdot t$ e $t' = t$, que são as equações das transformações galileanas (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 415).

Para a contração do comprimento, esses mesmos autores consideram que:

> A contração do comprimento só ocorre na direção do movimento.
>
> O comprimento medido no referencial em relação ao qual um objeto está em movimento é menor que o comprimento medido no referencial ao qual o objeto está em repouso (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 416).

Em relação à dilatação temporal, os autores a descrevem com um acentuado rigor teórico, dizendo que:

> Os intervalos de tempo também são afetados pela relatividade de Einstein, contrariando a simultaneidade de eventos, proposta por Galileu.
>
> Seja $\Delta t'$ o intervalo de tempo de ocorrência de um fenômeno, medido por um relógio no referencial *R'*, que se move com velocidade *u* em relação a outro referencial *R*. Nesse referencial *R*, o mesmo fenômeno ocorrerá no intervalo Δt, de tal forma que:
>
> $$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

> Pela expressão anterior, Δt é maior que $\Delta t'$, pois $\gamma > 1$(γ só se iguala 1 quando $u=0$. Assim, um relógio em movimento em relação a outro indica um intervalo $\Delta t'$ menor e, consequentemente, se atrasa: é a dilatação do tempo. Não são apenas os relógios em movimento que se atrasam, mas os processos físicos em geral, já que envolvem movimento. Contudo esse atraso só é considerado quando as velocidades são comparáveis à da luz, o que ocorre no domínio das partículas elementares (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 418).

Referente a equação que trata a relação entre massa e energia os autores dizem:

> Seja m_0 a massa de repouso de um corpo, isto é, a massa de um corpo que está em repouso em relação a um sistema de referência inercial *R*. Seja *m* a massa do mesmo corpo quando se move com velocidade *u*, em relação ao mesmo referencial *R*.
>
> A relação entre m e m_0, sendo $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$é dada por:
>
> $$m = \gamma \cdot m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$
>
> Com $\gamma > 1$ e $(\gamma = 1)$ quando $(u = 0)$ decorre $m > m_0$, isto é, a massa do corpo é maior quando em movimento do que quando em repouso. O aumento de massa não significa que aumenta o número de partículas (átomos, moléculas etc.) do corpo, e sim a inércia deste. Se o corpo atingisse a velocidade da luz, nenhuma força seria capaz de acelerá-lo, pois foi atingida a velocidade limite. Nesse caso, a inércia do corpo seria infinita.
>
> Para as finalidades práticas da vida diária, objetos como carros, aviões e foguetes, cujas velocidades são pequenas, quando comparadas com a da luz, têm, por massa, a sua massa de repouso. Assim, um avião de 20 toneladas, à velocidade do som, sofreria um aumento de massa de apenas 13 microgramas, o que é desprezível.
>
> Uma das maiores consequências da teoria da relatividade especial é o fato de que a massa é uma forma de energia, ou seja, a energia tem inércia. Segundo as próprias palavras de Einstein:
>
> - Toda energia *E*, de qualquer forma particular, presente em um corpo ou transportada por uma radiação, possui inércia, medida pelo quociente do valor da energia pelo quadrado da velocidade da luz ($\frac{E}{c^2}$);
> - Reciprocamente a toda massa m deve-se atribuir energia própria, igual a mc^2, além da energia potencial que o corpo possui num campo de forças;
> - Assim, massa e energia são duas manifestações diferentes da mesma coisa, ou duas propriedades diversas da mesma substância física.
>
> $$E = mc^2$$
>
> [...] Por essa equação, 1 kg de massa é equivalente a $(9 \cdot 16^{16} J)$, ou seja, $2.5 \cdot 10^{10}$quilowatts-hora. Com essa energia, uma lâmpada de 100 W poderia ficar acesa durante $2.5 \cdot 10^{11} h$, o que equivale a aproximadamente $2.8 \cdot 10^{7}$anos. A conversão de matéria em energia ocorre continuamente em fontes de energia como o Sol e outras estrelas e em todos os processos nos quais a

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

> energia é liberada como, por exemplo, nas bombas atômicas (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 421).

No livro *Física Clássica*, os autores Calçada e Sampaio (2012) introduzem as ideias da TRR ao afirmarem que as leis de Newton se aplicam a referenciais inerciais e, em seguida, discutem um problema de natureza eletromagnética, como é apresentado a seguir:

> Quando estudamos as leis de Newton [...], vimos que elas valem para qualquer referencial inercial. Um corpo pode ter velocidades diferentes em referenciais inerciais diferentes, mas em todos os referenciais inerciais sua aceleração será a mesma, de modo que a força resultante ($\boldsymbol{F}$) sobre o corpo será a mesma em todos os referenciais inerciais: $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$. O resultado disso é que qualquer experimento mecânico dará o mesmo resultado em qualquer referencial inercial, sendo esse fato chamado Princípio de Relatividade Galileana.
>
> Porém, no final do século XIX, parecia que as leis do Eletromagnetismo dependiam do referencial [...] (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 407).

Em seguida, os autores abordam um viés histórico sobre o eletromagnetismo:

> Em 1867, foi publicado o monumental trabalho do escocês James Clerck Maxwell (1831-1879) que unificou as leis do Eletromagnetismo e mostrou que elas conduziam à existência de ondas eletromagnéticas. Essas ondas foram produzidas em laboratório pela primeira vez em 1887 pelo alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894). Pelas leis do Eletromagnetismo, as ondas eletromagnéticas se propagavam no vácuo, com uma velocidade que coincidia com a da luz, obtida por medidas em vários experimentos. A partir daí, ficou estabelecido que a luz é uma onda eletromagnética (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 407).

Calçada e Sampaio (2012) ainda complementam que:

> Como as ondas mecânicas necessitam de um meio para se propagar, os físicos em geral acreditavam que a luz (e as ondas eletromagnéticas em geral) também necessitava de um meio para se propagar. Tal meio foi chamado de éter, o qual deveria preencher todo o espaço e penetrar em todos os corpos. Assim, a velocidade da luz somente teria o valor (c) ($c \cong 3{,}0 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$)em relação ao éter. Se um observador se movesse em relação ao éter, deveria obter um outro valor para a velocidade da luz (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 407).

Os dois postulados da TRR recebem a seguinte roupagem por esses autores:

> I. Princípio da Relatividade: as leis da Física têm a mesma forma em todos os referenciais inerciais.
>
> II. A luz se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida (c) independentemente da velocidade da fonte ou do observador (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 408).

Em seguida, são feitas as considerações sobre suas consequências: "Uma primeira consequência dos postulados é que o tempo não é absoluto. Isso significa que, ao observar um fenômeno, o intervalo de tempo em que ocorreu o fenômeno depende do referencial [...]" (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 409). E ao longo do texto afirmam ainda que: "Einstein

mostrou que os comprimentos também são afetados pelo movimento" (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 413).

Ademais, os autores dão uma descrição bem detalhada para a relação entre massa e energia:

> Entre o grande público, o aspecto mais conhecido da Teoria da Relatividade é, sem dúvida, a equação:
>
> $$E = mc^2$$
>
> [...] ele mostrou que a massa inercial de um corpo varia toda vez que esse corpo ganha ou perde energia, qualquer que seja o tipo de energia. Se um corpo receber uma quantidade de energia ΔE, sua massa inercial terá um aumento Δm dado por:
>
> $$\Delta E = (\Delta m)c^2$$
>
> Assim, quando um corpo recebe calor, sua massa aumenta, e quando ele perde calor, sua massa diminui. Do mesmo modo, se comprimirmos uma mola, que estava inicialmente com seu comprimento natural, ela ganhará energia potencial elástica e, portanto, sua massa aumentará.
>
> Nas aulas de Química você deve ter aprendido a Lei de Conservação da Massa de Lavoisier. Segundo essa lei, a massa total dos reagentes é igual à massa total dos produtos de uma reação química. Agora sabemos que essa igualdade é aproximada, pois durante uma reação química em geral há absorção ou liberação de calor (ou luz) para o ambiente. Desse modo, há uma variação de massa.
>
> Porém [..] essa variação de massa é tão pequena que as balanças não conseguem determiná-la. Só foi possível verificar a validade da equação de Einstein quando os físicos conseguiram analisar as transformações com os núcleos dos átomos, pois, durante essas transformações, as variações de massa são muito maiores do que as que ocorrem numa reação química e, assim, podem ser mais facilmente percebidas [...] (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 419).

Com o objetivo de adentrar nas entrelinhas da relação entre massa e energia, a obra *Física Clássica* (2012) aborda uma concepção bem mais profunda, ao dizer que:

> Quando a equação $\Delta E = (\Delta m)c^2$ é comentada em artigos publicados em jornais ou revistas, frequentemente lemos frases do tipo: "A energia pode ser convertida em massa e vice-versa". Essa frase, porém, não está correta. Não há conversão de energia em massa (ou vice-versa). Vejamos por quê.
>
> Em primeiro lugar, a massa não é uma "coisa", mas sim uma propriedade, é uma medida da inércia. Portanto, não pode ser convertida (transformada) em nada. Em segundo lugar, quando há conversão, algo deve desaparecer para dar lugar a outra coisa. No entanto, quando fornecemos energia a um corpo, ela não desaparece, continua lá, como energia.
>
> Consideremos, por exemplo, o caso da compressão de uma mola. Ao comprimirmos a mola, fornecemos a ela uma energia que fica armazenada na forma de energia potencial elástica, ela não desaparece [...].
>
> Outra noção frequente que também deve ser evitada é a da equivalência entre massa e energia, pois ela dá uma ideia de igualdade entre massa e energia, o que não é verdade. A massa inercial mede a inércia de um corpo, isto é, sua

> resistência a mudanças de velocidade, enquanto a energia representa, numa definição simplificada, a capacidade de realizar trabalho.
>
> O que podemos dizer, então, é que a equação de Einstein exprime uma proporcionalidade entre os valores numéricos das variações de massa e energia (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 420).

No livro *Tópicos de Física*, os autores Boas, Doca e Biscuola (2001), iniciam a discussão sobre relatividade da seguinte forma:

> Como vimos no estudo da Mecânica, a velocidade, por exemplo, é uma grandeza relativa, isto é, uma grandeza que depende do referencial em relação ao qual é medida. Consequentemente, também são relativas outras grandezas que dependem da velocidade, como a energia cinética e a quantidade de movimento.
>
> A energia potencial de gravidade é outra grandeza cujo caráter relativo é evidente. De fato, o valor dessa energia *(mgh)* depende do nível de referência adotado para medir alturas.
>
> As grandezas **comprimento**, **tempo** e **massa**, entretanto, sempre foram tratadas como **absolutas**, isto é, independentes do referencial em que são medidas.
>
> Se alguém afirmar que o comprimento de uma ponte, o tempo de duração de uma aula e a massa de uma pessoa dependem do referencial, você certamente achará absurdas essas afirmações.
>
> Entretanto, como veremos nessa breve exposição, comprimento, massa e tempo, grandezas consideradas absolutas na Mecânica Clássica, também são grandezas **relativas**! A relatividade dessas grandezas, porém, só fica evidenciada quando estudamos situações em que as velocidades são muito altas, isto é, não-desprezíveis em comparação com a velocidade da luz no vácuo, que é *300 000 km/s*, aproximadamente.
>
> O motivo da nossa perplexidade diante do caráter relativo do comprimento, do tempo e da massa é estarmos habituados a situações em que as velocidades são insignificantes em comparação com a da luz [...] (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001 p. 423, grifo dos autores).

Em seguida, é feita uma abordagem histórica:

> Entre o final do século XIX e o princípio do século XX, vários fatos importantes não estavam explicados.
>
> Como vimos, alguns foram esclarecidos pela Física quântica. Entretanto, outras questões continuavam sem respostas. Estas só foram dadas por outra teoria: A Teoria da Relatividade, de Einstein.
>
> Essa teoria, que introduziu profundas transformações em conceitos básicos, é composta por duas partes.
>
> Uma delas é a Teoria da Relatividade Restrita (ou Especial), publicada por Einstein em 1905, quando ele tinha 26 anos de idade. Nessa parte, todos os fenômenos são analisados em relação a referenciais necessariamente **inerciais**.

> A outra parte é a Teoria da Relatividade Geral, publicada em 1915, que aborda fenômenos do ponto de vista de referenciais **não-inerciais**.
>
> É importante destacar que a Teoria da Relatividade não destruiu a Mecânica newtoniana, que continua válida para velocidades desprezíveis em comparação com a velocidade da luz no vácuo (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 423, grifo dos autores).

Em relação aos dois postulados da TRR, os autores consideram que:

> 1º) As leis da Física são as mesmas, expressas por equações que têm a mesma forma, em qualquer referencial inercial. Não existe um referencial inercial privilegiado.
>
> 2º) A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor *c (c=300 000 km/s)* em relação a qualquer referencial inercial.
>
> **Nota dos autores:**
>
> - Em virtude principalmente do seu movimento de rotação, a Terra não é um referencial inercial. Entretanto, para fenômenos de curta duração em relação às 24 horas, ela pode ser considerada um referencial inercial.
> - É preciso destacar que, para elaborar a Teoria da Relatividade, Einstein contou não só com sua grande genialidade, mas também com os trabalhos de outros físicos, como os americanos Albert A. Michelson (1852-1931) e E. W. Morley (1838-1923) e o holandês H. A. Lorentz (1853-1928) (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 424, grifo dos autores).

Em relação à dilatação temporal, os autores tratam que:

> Constataremos que o intervalo de tempo decorrido entre dois eventos, isto é, entre dois acontecimentos, depende do referencial que se observa esses eventos.
>
> Para isso, considere um vagão em movimento retilíneo e uniforme, com velocidade *v* em relação ao solo. Um espelho plano está colado no teto do vagão e uma lanterna está colada em seu piso, a uma distância *d* do espelho [...].
>
> A lanterna emite um pincel de luz que vai até o espelho e retorna à lanterna. Vamos definir dois eventos:
>
> - **Primeiro evento:** a lanterna emite o pincel de luz.
> - **Segundo evento:** o pincel retorna à lanterna.
>
> Vamos analisar o intervalo de tempo, decorrido entre esses dois eventos, em relação a dois referenciais assim definidos:
>
> - ***R'*:** referencial em repouso em relação ao local onde ocorreram os dois eventos. Para esse referencial, o intervalo de tempo entre os eventos será representado por *Δt'*.
> - ***R*:** referencial em movimento em relação ao local onde ocorreram os eventos. Para esse referencial, o intervalo de tempo entre os eventos será representado por *Δt* (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 425, grifo dos autores).

Em seguida, são destacados os seguintes pontos:

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

- Se $\boldsymbol{v}$ for desprezível em relação a ($\boldsymbol{c}$), $\frac{v^2}{c^2}$será praticamente igual a zero e Δt será praticamente igual a $\Delta t'$. Por isso, podemos dizer que a Mecânica Clássica, para a qual Δt é igual a $\Delta t'$, é um caso particular da Teoria da Relatividade em que as velocidades são muito baixas, impossibilitando a detecção dos efeitos relativísticos.
- Se, na situação analisada na exposição desse item, os eventos, em vez de ocorrerem no vagão, **ocorressem no solo** (lanterna e espelho fixos em relação ao solo), o referencial ***R'*** estaria no solo (referencial em repouso **em relação ao local dos eventos**) e ***R*** estaria no vagão (referencial em movimento **em relação ao local dos eventos**). O Intervalo de tempo Δt, medido por ***R***, continuaria **maior** que $\Delta t'$, medido por ***R'***, e a expressão para Δtcontinuaria exatamente a mesma (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 426, grifo dos autores).

A contração do comprimento recebe um tratamento análogo, a saber:

> Constataremos que o comprimento de um corpo depende do referencial em que é medido.
>
> Para isso, considere o mesmo vagão do item anterior, nas mesmas condições lá estabelecidas.
>
> Vamos supor que o vagão vai passar por um túnel [...] despreze o comprimento do vagão em comparação com o túnel.
>
> A medida do comprimento do túnel será analisada em relação a dois referenciais assim definidos:
>
> - ***R*:** referencial em repouso **em relação ao corpo cujo comprimento será medido** (no caso, o corpo é o túnel). Para esse referencial, o comprimento do túnel é *l*.
> - ***R'*:** referencial móvel **em relação ao corpo (túnel) cujo comprimento será medido**. Para esse referencial, o comprimento do túnel é *l'*.
>
> Para o referencial ***R***, o comprimento do túnel mede l. Então, enquanto o vagão passa completamente pelo túnel, esse referencial ***R*** o vê percorrer uma distância l durante um intervalo de tempo Δt, medido num relógio em seu pulso [...] (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 427, grifo dos autores).

Os autores ainda reforçam que:

- Para um referencial ***R***, que está em repouso em relação a um corpo, esse corpo tem comprimento *l*, para um referencial ***R'***, que se move em relação ao mesmo corpo, o comprimento desse corpo é *l'*, sendo *l'* **menor** que *l*. A isto se dá o nome de **contração do comprimento** (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 429, grifo dos autores).

Para a equação que trata da relação entre massa e energia, os autores afirmam que:

> Considere [...] uma pedra em repouso em relação ao solo.
>
> Sendo sua massa de repouso m_0, pode-se demonstrar que essa massa equivale a uma energia intrínseca, dada por:
>
> $$E_0^0 = m_0 c^2$$

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 1, jan./abr. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Por exemplo, se fosse possível aniquilar uma pedra de massa igual a 1 g, transformando-a totalmente em energia, obteríamos:

$$E_0^0 = m_0 \cdot c^2 = (1.10^{-3}kg) \cdot (3.10^8 \frac{m}{s})^2 = 9 \cdot 10^{13}J$$

Essa energia seria suficiente para manter acesas 1000 lâmpadas de 100W por quase 30 anos!

Portanto, uma pequeníssima massa equivale a uma enorme quantidade de energia.

Todas as reações que liberam energia, inclusive as reações químicas exotérmicas, o fazem devido a uma perda de massa, que se transforma em energia.

A energia solar, por exemplo, provém de uma reação nuclear denominada **fusão nuclear**. Nessa reação, quatro núcleos de hidrogênio se fundem produzindo um núcleo de hélio. A massa do núcleo de hélio, porém, é ligeiramente menor que a soma das massas dos quatro núcleos de hidrogênio, e essa perda de massa corresponde à energia liberada. Nesse processo, o Sol perde cerca de 4 milhões de toneladas de massa a cada segundo! A fusão nuclear também pode ocorrer na explosão de uma bomba de hidrogênio.

Nota dos autores:

- Do exposto, concluímos que a massa é uma forma de energia.
- Quando um corpo está em movimento, sua energia total E é a soma da sua energia de repouso E_0 com sua energia cinética. Essa energia total também pode ser expressa por $E = mc^2$, em que m é a massa relativística (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001, p. 435, grifo dos autores).

4 ANÁLISE DOS LIVROS DIDÁTICOS

As abordagens contidas nos livros didáticos pesquisados se diferem em relação à base teórica, pois todo seu respaldo teórico é constituído por obras de divulgação científica. Não obstante, tais obras têm o objetivo de tratar os temas de forma mais simples e conceitual, sem dar ênfase ao caráter matemático dos conteúdos. Em comparação às concepções aqui descritas, os livros pesquisados apenas ressaltam o fato de que o espaço e o tempo são estruturas mutáveis e dinâmicas, sem uma descrição mais precisa de tal afirmação, isto é, seria necessário dar uma explicação mais detalhada, ou seja, tratar esse assunto de forma mais minuciosa, a respeito das afirmações abordadas nos livros didáticos. Assim, tais obras poderiam fazer uma abordagem mais significativa, com uma linguagem mais acessível dos conceitos da TRR, em que o discente pudesse ter uma compreensão mais firme e clara sobre tais conceitos.

No que tange à abordagem adotada pelo livro Fundamentos da Física (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007), os autores abordam os postulados da TRR, em seguida a dilatação do espaço-tempo, e falam ainda sobre conceitos que os outros livros pesquisados não abordam, como as equações de Lorentz e, mais detalhadamente, trata o objeto de estudo da TRR de forma bastante minuciosa, ao destacar a não existência de um referencial inercial absoluto e definir tal sistema com bastante precisão. As formulações dadas aos dois postulados apresentados no livro didático se assemelham bastante às definições adotadas neste trabalho e

os autores do referido livro também destacam as consequências referentes ao princípio da constância da velocidade da luz no vácuo.

Em relação ao primeiro postulado da TRR apresentado por Ramalho, Nicolau e Toledo (2007), percebe-se a falta de abordagem de que esse postulado é mais geral que o proposto por Galileu, pois abrange não só as leis da Mecânica, mas sim todos os fenômenos físicos (sejam eles mecânicos, eletromagnéticos, térmicos, ópticos, etc.). É totalmente válido afirmar que elas são invariantes em relação à mudança de referenciais inerciais, ou seja, tais fenômenos são descritos pelas próprias leis mesmo em referenciais inerciais distintos. Se as leis que regem os fenômenos físicos tomassem configurações distintas para os observadores em movimento relativo, seria necessário descrever de forma analítica as equações para o objeto de estudo em repouso e para o objeto em movimento, no qual concluímos que não há um sistema de referência universal. Já referente ao segundo postulado, ele contradiz uma das consequências das leis de Newton, pois, de acordo com a Mecânica Clássica, desde que uma força resultante não-nula atue sobre um corpo, esse elemento poderá alcançar uma velocidade infinita (PERUZZO, 2013). Sobre as consequências do segundo postulado, os autores mesclam uma abordagem matemática e conceitual sólida, a qual possibilita uma maior compreensão por parte do aluno.

Ramalho, Nicolau e Toledo (2007) ainda apresentam um conjunto de equações, conhecidas como equações de Lorentz. Nas entrelinhas, a ideia transmitida pelos autores é que o fator de Lorentz é um mecanismo de correção incorporado às equações formuladas por Galileu, com o objetivo de modificá-las para a condição de velocidades elevadas, de modo que o fator de correção possa assumir valores distintos e, dessa forma, apresentar diferentes condições. Em último plano, os autores estabelecem a relação entre massa e energia através da famosa equação $E = mc^2$, além de traçar situações contextualizadas que evidenciam esse processo. Uma ressalva muito importante é que essa equação também define uma energia associada aos objetos estacionários, isto é, um corpo estacionário em relação a um sistema de referência possui energia, denominada energia de repouso. Entretanto, em nenhum momento os autores tratam esse ponto. Já em relação a massa de um determinado objeto, os autores ainda complementam que a massa de um objeto é maior quando em movimento e que esse acréscimo não resulta no aumento da sua massa em si, mas sim na sua inércia que, em síntese, mede o grau de resistência à mudança de velocidade. Dessa forma, se um corpo atingisse a velocidade da luz, que é a velocidade limite do universo, sua inércia seria infinita.

Por outro lado, o livro Física Clássica (CALÇADA; SAMPAIO, 2012) inicia a discussão sobre relatividade apresentando um problema sobre o eletromagnetismo um tanto interessante. Os autores fazem uma análise em relação às forças atuantes sobre uma carga elétrica *Q* que desloca-se no interior de um vagão para dois referenciais: um sistema de referência estacionário e o outro em movimento. Para o referencial fixo, a carga *Q* está em movimento e, além de campo elétrico, ela também produz um campo magnético. Dessa forma, se uma carga de prova *q*, a qual possui velocidade *v*, for colocada nas proximidades de *Q*, os dois referenciais não estarão em concordância sobre as forças que atuam em *q*. Para o sistema de referência estacionário, sobre *Q* atuarão duas forças: uma de ordem elétrica e a outra de caráter magnético. Já para o referencial em movimento, apenas a força magnética agirá sobre o sistema.

Feito isso, os autores trazem uma abordagem histórica sobre a unificação das leis do eletromagnetismo, ao destacar o trabalho de vários cientistas nessa empreitada. Nesse sentido, verifica-se que no século XIX ainda perdurava a concepção de um meio em que a luz se propagava, conhecido como éter luminífero, concepção que logo foi abandonada em função da validade do segundo postulado da TRR. A apresentação dos dois postulados é semelhante à

abordagem descrita nos livros de divulgação e em outras obras de caráter didático, de modo que essas afirmações foram tratadas de forma bem consistente nos parágrafos anteriores.

Em relação às consequências desses postulados, apenas a questão da dimensão temporal recebe devida importância. Os autores afirmam que o tempo é uma grandeza relativa e que o transcorrer de dois eventos pode diferir de um referencial para outro, de modo que essa formulação está em plena consonância com os conceitos adotados. Todavia, a obra impôs um caráter excludente ao espaço, pois ela apenas afirma que objetos que se deslocam com velocidades próximas à da luz sofrem uma contração em seu comprimento. É dado um tratamento muito matematizado a esse conceito, o qual encobre o caráter dinâmico do espaço.

Em seguida, os autores utilizam conceitos de Mecânica e Termodinâmica para reforçar o significado da equação $E = mc^2$, ao associar tal relação com as energias térmica e potencial elástica. Ademais, Calçada e Sampaio (2012) ainda traçam um paralelo da equação anterior com o Princípio de Lavoisier, ao considerar que, em uma reação química, a conservação da massa não ocorre de fato, pois em tal fenômeno há liberação ou absorção de calor (ou luz), de forma que há uma pequena variação de massa na amostra analisada. Não obstante, ainda na mesma página, os autores apresentam conceitos que contradizem as afirmações anteriores, ao considerarem que não há conversão de massa em energia (e vice-versa) e isso, por sua vez, é um diferencial a ser considerado, já que põe em questão a relação de massa e energia.

Por outro lado, Calçada e Sampaio (2012) deixam nítido o fato de que a massa é uma propriedade intrínseca/inerente à matéria, dando apenas uma característica a essa grandeza. Os autores ressaltam também, no que diz respeito a energia, o fato de que, sob condições ideais, quando certa quantidade de energia é fornecida a um corpo de massa m, tal energia não é dissipada, mas pode se apresentar sob diferentes formas. Em termos equivalentes, isso significa dizer que a equação $E = mc^2$ obedece ao Princípio de Conservação da Energia.

Calçada e Sampaio (2012) destacam, também, o fato de que não há uma relação conceitual de equivalência entre massa e energia, pois, apesar de serem grandezas atreladas entre si pela equação posta anteriormente, elas possuem significados distintos. No entanto, mesmo apresentando esse fato, os autores não concordam com essa ideia e, como contra-exemplo, destacam os processos de fusão nuclear, que ocorrem no interior do Sol, e a aniquilação de pares, de modo que, quando uma partícula colide com sua respectiva anti-partícula, ocorre a emissão de dois feixes de raios gama (radiação eletromagnética), que se deslocam em sentidos opostos, obedecendo a *Conservação do Momentum*, isto é, a força total externa que age sobre dois corpos de um sistema isolado é nula. Isso permite determinar, por exemplo, o *momento linear* do sistema, definido como uma grandeza que fornece uma medida da *quantidade de movimento* dos corpos, antes e depois da interação entre eles, sem a necessidade de se conhecer todos os seus detalhes. Assim, o *momento linear* é constante, ou seja, é conservado.

Um aspecto importante da obra Física Clássica (CALÇADA; SAMPAIO, 2012) é a descrição da massa como uma grandeza que mede a inércia de um corpo, ou seja, sua resistência à mudança de velocidade. Em síntese, quanto maior a massa de um corpo, maior será a energia aplicada sobre ele para alterar seu estado de movimento. Todavia, Calçada e Sampaio (2012) apresentam uma definição simplificada para o conceito de energia, ao afirmar que a energia é a mera capacidade de realizar trabalho. Tal definição restringe o conceito de energia ao âmbito da Mecânica.

Já o livro Tópicos de Física (BOAS; DOCA; BISCUOLA, 2001) introduz a discussão sobre relatividade, destacando o fato de que a velocidade é uma grandeza relativa, ou seja, que ela é

dependente do referencial adotado. Os autores da obra também mencionam que outras grandezas, como a energia cinética e a quantidade de movimento também são relativas. Fato que não é destacado em outras obras.

Boas, Doca e Biscuola (2001) discutem o caráter relativo da energia potencial, pois ela depende do nível de referência adotado no qual, nas proximidades da Terra, o campo gravitacional é constante. Essa informação quase não é discutida nos livros didáticos. Em seguida, os autores destacam o tratamento absoluto dado pela Mecânica Clássica em relação às grandezas, comprimento, massa e tempo. Nessa perspectiva, tais grandezas são consideradas invariantes sob a mudança de um referencial inercial para outro. Na sequência, são apresentadas situações cotidianas que são colocadas em xeque pela TRR, como as modificações da massa e o comprimento dos objetos.

Feito isso, os autores dão ênfase à uma abordagem histórica e apresentam uma nomenclatura diferente para a teoria da Relatividade Especial. Nessa perspectiva, tal teoria é especial, pois ela se aplica somente a sistemas de referência inerciais. Para um referencial não-inercial, sua aceleração é não-nula, seu âmbito de validade está centrado na TRG.

Em relação aos dois postulados da TRR, os autores dão um tratamento análogo às obras analisadas anteriormente, ressaltando o fato de que as leis da Física possuem a mesma configuração para qualquer sistema de referência que se mova com velocidade constante e que a velocidade da luz é invariante para tais sistemas. Os autores ainda fazem uma observação importante ao afirmar que a Terra é um referencial acelerado, pois ela está sujeita a uma aceleração centrípeta. Todavia, podemos considerar nosso planeta como um referencial inercial se o transcorrer de um evento for ínfimo quando comparado com a duração de um dia. Referente às consequências dos postulados, os autores tratam a dilatação temporal sob duas perspectivas distintas: para um sistema de referência em repouso e para outro sistema em movimento. A situação descrita está relacionada com o feixe de luz emitido por uma lanterna, a qual está fixada num vagão em movimento, em que ambos os observadores em seus referenciais não estarão em consonância quanto ao intervalo de tempo transcorrido para o fenômeno analisado. Boas, Doca e Biscuola (2001) ressaltam o fato de que, se a velocidade do objeto for desprezível em comparação com a velocidade da luz, os observadores estarão de acordo quanto à duração de cada evento.

A contração do comprimento recebe um tratamento muito similar à situação anterior. O comprimento de um objeto também é analisado na perspectiva de dois referenciais distintos: um sistema de referência fixo e outro móvel. Caso um objeto se desloque nas proximidades da velocidade da luz, ambos referenciais não estarão de acordo quanto ao seu comprimento. De acordo com Boas, Doca e Biscuola (2001), os fenômenos que estão no âmbito da Mecânica Clássica podem ser considerados como casos particulares da TRR, pois a teoria clássica se situa no âmbito das baixas velocidades.

Em seguida, Boas, Doca e Biscuola (2001) ressaltam a devida importância de outros cientistas como Albert Michelson, Edward Morley e Hendrik Lorentz, que foram imprescindíveis para a formulação da TRR elaborada por Einstein.

Todos os LDs estudados abordam a equação de Einstein de forma distinta. Segundo Boas, Doca e Biscuola (2001), massa e energia são grandezas equivalentes, ou seja, a tese defendida pelos autores é de que há a conversão de massa em energia e, como exemplo, os autores destacam o processo de fusão nuclear. No entanto, alguns expoentes da literatura, como Calçada e Sampaio (2012), como mencionado anteriormente, afirmam que essa concepção é totalmente

equivocada, pois a massa é uma grandeza que está associada à inércia de um objeto e a única relação que possui com a energia é meramente numérica de acordo com a equação $E = mc^2$. Ainda de acordo com Calçada e Sampaio (2012), a ideia de equivalência, no sentido mais restrito da palavra, é um termo impreciso, pois transmite uma noção de igualdade entre duas grandezas distintas.

Pela análise dos LDs consultados, a discordância entre a equivalência ou não entre massa e energia é algo que ainda está em debate na Física. Talvez, nos simpósios, seminários, congressos e outros meios de divulgação científica, essa discussão sobre conversão de massa em energia tenha mais sentido do que em LDs do ensino médio, já que os LDs devem apresentar o que há de mais sólido, no momento de sua concepção, no campo da Física. Ademais, é fato que essa questão ainda não está totalmente superada e o debate na Física prossegue para alguns autores, conforme apresentado neste artigo. Nesse sentido, cada LD traz, de acordo com o ponto de vista de seu autor, uma visão da Física. Pode-se entender que, nesse caso, o professor de Física é quem deve fazer a intermediação, discutindo com seus alunos a versão do livro de Física que eles utilizam e de outras variantes que possam haver no campo.

Do exposto, realizada a análise dos LDs pesquisados, no que diz respeito à discordância entre os autores sobre a relação de massa e energia na TRR, cabe dizer que a separação clássica das leis de conservação da massa e da energia é defeituosa. Nem massa nem energia sozinhas por elas mesmas se conservam nos processos naturais. A quantidade, na verdade, conservada – Massa-Energia – combina massa e energia levando em consideração suas equivalências. Assim, em contraste com a teoria clássica, na TRR, o conceito que envolve massa e energia antes separados, torna-se um único chamado Massa-Energia. Isso resolve as aparentes discordâncias, pois trata-se agora de um único conceito, o que torna sem efeito as comparações de ambos, massa e energia, que decorrem da defeituosa separação. Assim, o que antes era separado teoricamente, o conceito de massa e o de energia, hoje é tido como um único conceito, combinando-os, isto é, a equivalência desses termos é considerada, pelo princípio de conservação da massa, que perde sua independência e funde-se com o da conservação de energia (OKUN, 2009).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Teoria da Relatividade promoveu uma mudança profunda na maneira como entendemos o espaço e o tempo. As normas do "senso comum" que se usam para relacionar as medidas de espaço e tempo na visão de mundo newtoniana diferem com seriedade das regras adequadas para velocidades próximas à da luz. A descrição da TRR proposta em 1905 por Albert Einstein descreve como o tempo, espaço e os fenômenos físicos são analisados em diferentes sistemas de referência que se movem com velocidade constante entre si. Isso já difere do trabalho posterior de Einstein sobre a Teoria da Relatividade Geral, que trata de qualquer quadro de referência, incluindo até mesmo os quadros acelerados.

Ao contrário da Mecânica de Newton, que busca descrever o movimento das partículas, a TRR não se restringe a um tipo particular de fenômeno em si. Suas regras de espaço e tempo tendem a afetar todas as teorias físicas fundamentais. Nesse sentido, é importante pontuar que as modificações da Mecânica newtoniana na TRR não invalidam a Mecânica Clássica nem exigem sua substituição propriamente dita. Ao invés disso, as equações da Mecânica Relativística

diferem significativamente das equações da Mecânica Clássica apenas para objetos que se movem em velocidades relativísticas, ou seja, velocidades menores que, mas comparáveis, à da luz.

O presente trabalho verificou como alguns conceitos da TRR vêm sendo abordados em três LDs do ensino médio utilizados por vários professores e alunos. Em relação aos postulados, eles são bem trabalhados em todos os LDs e o que pode haver é um ou outro equívoco conceitual por parte dos autores. Já em relação às consequências dos postulados da TRR, nenhum dos livros aborda esse fato em comparação com a base teórica utilizada. Outra questão que causa discordâncias nos livros pesquisados ocorre no que diz respeito à relação de equivalência entre massa e energia, em que alguns autores afirmam que a massa pode ser convertida em energia e vice-versa, enquanto outros consideram que isso é um equívoco conceitual.

No livro dos autores Ramalho, Nicolau e Toledo (2007), a TRR tem seus conceitos tratados de forma bastante minuciosa e precisa. Além disso, apresenta as consequências referentes ao princípio da constância da velocidade da luz no vácuo. Ademais, os autores estabelecem a relação entre massa e energia através da equação de Einstein.

É cabível, também, chamar a atenção dos professores que venham a adotar o LD de Calçada e Sampaio (2012) como livro texto que possui uma abordagem bem descritiva e detalhada, que faz uma descrição histórica significativa e que aborda a existência de uma contradição na definição de equivalência entre massa e energia na TRR. Pelo que pôde ser analisado, os autores, apesar de apresentarem tal ideia, não concordam com ela. Então, deve-se ter de fato cuidado com tal abordagem realizada na obra e na utilização dela em sala de aula.

Na obra de Boas, Doca e Biscuola (2001), a TRR recebe atenção especial ao ser tratada da forma mais completa e concisa em relação às outras apontadas neste trabalho. Os autores fazem abordagens e observações importantes, conforme apresentado na seção anterior, que as outras obras não fazem e destaca a importância histórica da TRR e de cientistas que foram imprescindíveis para a formulação da TRR de Einstein.

Dados os conceitos da TRR, ela possui uma matemática um tanto simples em nível de ensino médio, o que favorece ao professor poder trabalhar essa parte de forma bem atenta e detalhadamente, para que os alunos possam relacionar os conceitos com as equações utilizadas. No que diz respeito aos conceitos dessa teoria, o que mais surpreende, não pelo fato de serem complicados mas pelo fato de serem capazes de desafiar, é o “senso comum” da realidade nas sutilezas desses conceitos.

Para finalizar, cabe dizer que a TRR, assim como muitas outras teorias da Física e de outras ciências, deve ser bem abordada nos LDs, a fim de tornar mais sólido o conhecimento dos alunos. Nesse sentido, o LD é uma ferramenta didática importante para a construção do conhecimento professor-aluno. Ademais, é prudente ressaltar que, quando se trata de ferramentas didáticas, a literatura de divulgação científica, como a abordada neste trabalho, deve ser tratada como texto complementar ao LD e que o professor deve analisar até que ponto o esforço em facilitar os conceitos não compromete o entendimento apropriado do conteúdo. A avaliação desses aspectos não é simples e, na verdade, vai além da literatura de divulgação científica. Ela faz parte da transmissão e evolução do conhecimento. Assim, adotar diferentes ferramentas para o ensino-aprendizagem e analisar a potencialidade de sua aplicação é crucial para a construção do conhecimento de todos os envolvidos.

REFERÊNCIAS

BOAS, N. V.; DOCA, H.; BISCUOLA, G. J. **Tópicos de Física**. 15. ed. São Paulo: Saraiva, 2001.

CALÇADA, C. S.; SAMPAIO, J. L. **Física Clássica**. 1 ed. São Paulo: Atual, 2012.

COLES, P. Einstein, Eddington and the 1919 Eclipse. In: **Proceedings of International School on The Historical Development of Modern Cosmology**, 2001. Disponível em: https://cds.cern.ch/record/489163/files/0102462.pdf. Acesso em: 11 ago. 2020.

DEITOS, G. M. P.; MALACARNE, V. Experimentação no ensino de ciências: um olhar para os livros didáticos do ensino fundamental. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 13, n. 1, p. 1-15, jan./abr. 2020.

DYSON, F. W.; EDDINGTON A. S.; DAVIDSON, C. A determination of the deflection of light by the sun's gravitational field from observations made at the total eclipse of May 29, 1919. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 220, 291, 1920.

GIACOMELLI, A. C.; PEREZ, C. A. S.; ROSA, C. T. W. Discussão sobre a inserção de tópicos de relatividade no ensino médio: análise na voz de professores Física em formação. **Amazônia | Revista de Educação em Ciências e Matemática**, Amazônia, v. 15, n. 34, jul-dez 2019, p. 130-150.

GREENE, B. **O tecido do cosmo:** o espaço, o tempo e a textura da realidade. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

GREENE, B. **O Universo elegante:** supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

HAWKING, S. **Breve Respostas Para Grandes Questões**. 1. ed. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2018.

JUNIOR, F. R.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os Fundamentos da Física**. 9 ed. São Paulo: Moderna, 2007.

KARAM, R. A. S.. **Relatividade restrita no início do ensino médio: elaboração e análise de uma proposta**. Santa Catarina – Florianópolis. 236 f. [Dissertação (mestrado)]. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, UFSC, 2005. Disponível em: http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102174. Acesso em: 11 ago. 2020.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e Diagramas V:** subsídios didáticos para o professor pesquisador em ensino de ciências. 2. ed. Porto Alegre: Instituto de Física, UFRGS, 2016.

OKUN, L. B. **Energy And Mass In Relativity Theory**. World Scientific Publishing Company, 2009.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. (2001). Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola. **Física na Escola**. v. 2, n. 1, p. 13-18.

PERUZZO, J. **Teoria da Relatividade Especial**. Irani: Clube de Autores, 2013.

PESSOA, R. R. O livro didático na perspectiva da formação de professores. **Trab. linguista. apl.**, Campinas, v. 48, n. 1, pág. 53-69, junho de 2009.

RODRIGUES, C. D. U. **A inserção da teoria da relatividade no ensino médio**. Santa Catarina. 172 f. [Dissertação (mestrado)]. Universidade Federal de Santana Catarina. Centro de Ciências da Educação – Programa de Pós Graduação em Educação, UFSC, 2001. Disponível em: https://sites.usp.br/nupic/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/DISSERT_daniel.pdf. Acesso em: 12 ago. 2020.

TERRAZZAN, E A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2° grau. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

ZAMBON, L. B; TERRAZZAN, E. A. Livros didáticos de física e sua (sub)utilização no ensino médio. **Ens. Pesqui. Educ. Ciênc.**, Belo Horizonte, v. 19, 2017.

Recebido em: *21 de fevereiro 2021*

Aceito em: *1º de junho 2021*