

A aparência visual da contração relativística nos livros de física aprovados no Programa Nacional do Livro Didático-2018

The Visual Appearance of Relativistic Contraction in Physics Books Approved in PNLD 2018

Ricardo Capiberibe Nunes^{1*}, Wellington Pereira Queirós¹, Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha²

¹Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Cidade Universitária s/nº – CEP 79070-900 – Campo Grande, MS, Brasil.

²Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás, Av. Esperança s/nº – CEP 74.690-900 – Goiânia, GO, Brasil.

*E-mail: ricardo.capiberibe@ufms.br

Recibido el 21 de junio de 2021 | Aceptado el 20 de septiembre de 2021

Resumo

Nesse ensaio verificamos como os livros de física aprovados Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) 2018 abordam o aspecto visual de corpos que sofrem contração relativística. Para isso fizemos uma ampla revisão de literatura, selecionando trabalhos sobre a aparência visual dos corpos que sofrem uma contração relativística e comparamos com as apresentadas nos livros didáticos do PNLD-2018. Infelizmente constatamos que 9 das 12 obras ainda usam figuras inadequadas para ilustrar a contração relativística. Portanto é urgente que os autores e professores se conscientizem deste erro conceitual e ele seja erradicado.

Palavras-chave: Ensino de ciências; Livros didáticos; Teoria da relatividade especial; Erros conceituais; PNLD 2018.

Abstract

In this essay, we verified how the physics books approved by the National Textbook Program (PNLD) 2018 address the visual aspect of bodies on a relativistic contraction. For this, we carried out an extensive literature review, selecting works on the visual appearance of bodies that suffer a relativistic contraction and comparing them with those presented in the PNLD-2018 textbooks. Unfortunately, we find that 9 of the 12 works still use inadequate figures to illustrate the relativistic contraction. Therefore, it is urgent that authors and teachers become aware of this conceptual error and it is eradicated.

Keywords: Science Teaching; Textbooks; Theory of Special Relativity; Conceptual Errors; PNLD 2018.

I. INTRODUCCIÓN

Em 2002, Ostermann & Ricci fizeram uma análise rigorosa sobre como os livros didáticos (LD) abordavam o conteúdo de Teoria da Relatividade Especial (TRE). Os autores evidenciaram que estes livros apresentam o fenômeno da contração relativística de forma incongruente, isto é, inadequada, pois confundem o conceito de medida com o conceito de aparência visual. Na maior parte das obras analisadas, os autores de livros didáticos não parecem estar cientes da

diferença entre *medir* e *observar* (Ostermann, Ricci, 2002). Essa distinção é importante porque o fenômeno da contração do comprimento, que pode ser inferido a partir das transformações de Lorentz, diz respeito aos processos de *medida*. Estudos sobre *aparência* dos objetos sobre efeito de uma contração (Lampa, 1924, Penrose, 1959, Weisskopf, 1960, Boas, 1961, Scott, Vinner, 1965, Scott, Driel, 1970, Mathews, Lakshmanan, 1972, Sheldon, 1988, 1989, Terrell, 1989, Burke, Strode, 1991) mostram que em decorrência da constância da velocidade da luz (segundo postulado, proposto por Einstein), estes objetos não aparentarão estarem encurtados ou achatados, mas contorcidos. Posteriormente, esse fenômeno foi batizado de Efeito Terrell ou Efeito Lampa-Penrose-Terrell.

Em 2018, todos os livros didáticos de física aprovados pelo Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD-2018)¹, dedicam pelo menos um capítulo para discutir física moderna, incluindo TRE. Por outro lado, há poucos trabalhos que promovem discussões sobre o ensino de relatividade na educação básica (SAMPAIO *et al*, 2019) e como ele vem sendo abordado nos LD². Por essa razão, propusemos fazer uma análise do conteúdo de TRE todos os 12 LD de física aprovados pelo PNLD-2018, verificando se estão presentes incongruências sobre a contração relativística levantada por Ostermann & Ricci (2002).

Para realizar essa pesquisa, inicialmente fizemos uma ampla revisão de literatura sobre os trabalhos que discutem a aparência visual dos objetos que sofrem uma contração relativística (seção II). Estes dados compuseram o *corpus* teórico que utilizamos para analisar os livros didáticos, cujos detalhes se encontram na seção III, que trata da metodologia, e na seção IV, que onde apresentamos os resultados e os discutimos.

Gostaríamos de enfatizar que esse trabalho não objetivou em desmerecer os LD e seus autores. Entendemos que o LD apresenta diversas dimensões e por essa razão, esse trabalho é insuficiente para chegar a um veredito sobre a qualidade dos LD. Partimos do pressuposto de que não há obra perfeita e nem completa, e que discussões como esta servem de subsídio para melhorar o conteúdo dos LD e ajudar no processo formativo de educadores e estudantes da educação básica.

II. A APARÊNCIA VISUAL DOS OBJETOS EM UMA CONTRAÇÃO RELATIVÍSTICA

O conceito de contração dos corpos em movimento uniforme não surgiu na Teoria da Relatividade. No final do século XIX, os pesquisadores conduziram diversos experimentos que procuravam evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter (Whittaker, 1953, Miller, 1997, Martins, 1998, 2015). Um dos experimentos mais precisos, porventura foi aquele realizado em 1887, pelo físico Abraham Michelson (1852-1931) e o químico Edward Morley (1838-1923), utilizando um interferômetro óptico (Poincaré, 1902, Whittaker, 1953, Miller, 1997, Martins, 1998, 2012, 2015). O resultado deste experimento indicava que era impossível evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter (Poincaré, 1902, Whittaker, 1953, Miller, 1997, Martins, 1998, 2012 2015).

Diante desse resultado inesperado, os físicos George FitzGerald e Hendrik Lorentz propuseram, independentemente, que se o braço do interferômetro sofresse uma contração na direção longitudinal do movimento da Terra, então seria impossível evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter (Whittaker, 1953, Miller, 1997, Martins, 1998, 2015). Lorentz ainda tentou justificar essa contração, afirmando que esta contração poderia ocorrer porque o éter exerce uma força sobre as moléculas (Lorentz, 1895), porém, Poincaré criticou essa abordagem considerando-a como *ad hoc*, e sugeriu que as pesquisas sobre o eletromagnetismo deveriam utilizar como premissa fundamental o *princípio da relatividade* (Poincaré, 1900, 1902).

Em 1904, Lorentz conseguiu obter uma descrição eletrodinâmica que previa que nenhum experimento poderia detectar o movimento da Terra em relação ao éter e cuja “única restrição é que a velocidade [do sistema] seja menor que a da luz” (Lorentz, 1904, p. 811). Nesse mesmo ano, Poincaré comentou, em uma conferência em Saint sobre o atual estado da física teórica, que a eletrodinâmica de Lorentz exigia que os corpos se contraissem na direção longitudinal do movimento (Poincaré, 1904). E no ano seguinte, Poincaré demonstrou que a única eletrodinâmica compatível com o princípio da relatividade, era justamente aquela desenvolvida por Lorentz (Poincaré, 1905, 1906).

Em 1905, Einstein apresentou seu programa de pesquisa para física que seria orientado em duas premissas (postulados): o *princípio da relatividade* e a *constância da velocidade da luz*, além de uma rejeição do conceito de éter. Em seu ensaio original, Einstein desenvolveu a cinemática e a eletrodinâmica relativística (que se mostrou equivalente

¹ O Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) é um projeto do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) do Ministério da Educação (MEC) do Brasil e compreende um conjunto de ações para avaliar, aprovar e regular a distribuição de obras didáticas, pedagógicas e literárias, materiais de apoio à educação e congêneres, destinados aos discentes e docentes das escolas públicas de educação básica, instituições comunitárias, confessionais ou filantrópicas sem fins lucrativos e conveniadas com o Poder Público do País. (Brasil, s. a).

² A dissertação de mestrado Neves (2014) fez uma ampla discussão sobre como relatividade especial é abordado nos LD aprovados pelo PNLD-2012. Jardim, Otoyá & Oliveira (2015) analisaram como o conceito de massa é abordado nos capítulos destinados a relatividade nos LD aprovados pelo PNLD-2015. Silva *et al* (2019) discutiram os aspectos históricos e sobre Natureza da Ciência abordados nos capítulos destinados a relatividade nos LD indicados no PNLEM-2015/2017.

àquela desenvolvida por Lorentz) (Martins, 2005, 2012, 2015). Assim como Lorentz e Poincaré, Einstein também previu que os corpos em movimento deveriam sofrer uma contração na direção longitudinal, porém, enquanto para Lorentz e Poincaré, a contração era um efeito *real*, para Einstein, era *aparente* (Martins, 2015).

Einstein também inferiu sobre a aparência dos objetos em movimento uniforme. Ao comentar sobre o significado físico das transformações do espaço, Einstein (1905, p. 903) declara que: “vê-se assim que um corpo rígido cuja forma se apresenta esférica quando é medido em estado de repouso passa a ter a forma de um elipsóide de revolução quando estiver em movimento, sendo observado do sistema em repouso.” Posteriormente, essa interpretação foi generalizada e passou-se a afirmar que um objeto em movimento com uma velocidade próxima à da velocidade da luz, visualmente aparentaria como um “achatamento” na direção longitudinal do movimento. Na célebre obra de divulgação científica *Mr Tompkins in Wonderland*, de autoria de George Gamow (1939), publicada em 1939, a contração do comprimento é ilustrada por meio da seguinte imagem (figura 1):

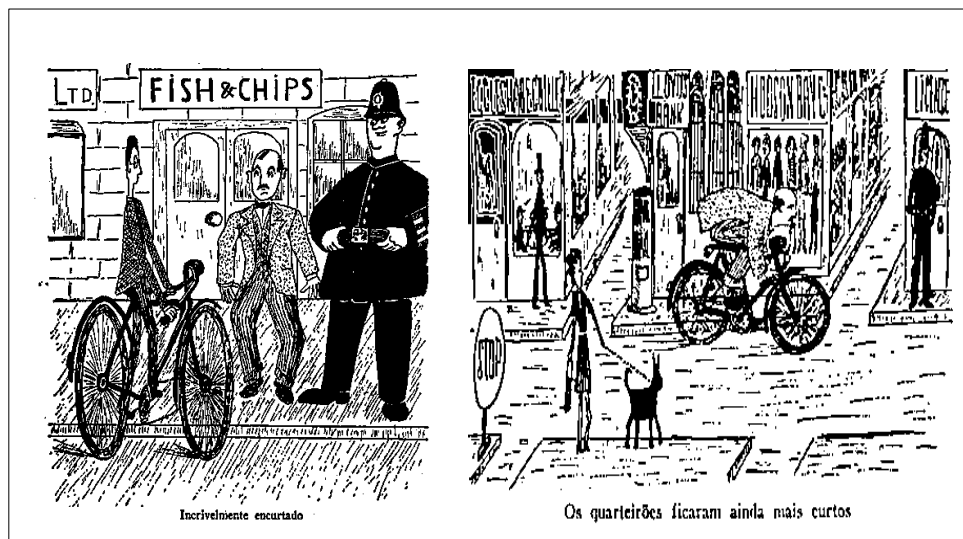


FIGURA 1. A representação visual da contração do comprimento na década de 30. Fonte: Gamow (1980, p. 18-19).

Entretanto, em 1959³, Penrose fez um estudo criterioso sobre o aspecto visual de uma esfera em movimento e constatou que, ao contrário do que afirma Einstein, a esfera não assumiria a forma de um elipsoide oblato:

Seria natural supor que, de acordo com a teoria da relatividade especial, um objeto se movendo com uma velocidade comparável à da luz deveria parecer achatado na direção do movimento por causa de sua contração de FitzGerald-Lorentz. Será mostrado aqui, entretanto, que esse não é o caso geralmente. Acontece, em particular, que a aparência de uma esfera, não importa como ela esteja se movendo, é sempre tal que apresenta um contorno circular a qualquer observador. Assim, uma fotografia instantânea de uma esfera em movimento rápido tem o mesmo contorno de uma esfera estacionária. (Penrose, 1959, p. 159)

Embora Penrose (1959, p. 139) tenha se restringido ao estudo de uma esfera, as suas conclusões podem ser aplicadas a qualquer corpo não-esférico que esteja em movimento retilíneo uniforme. Isso implica que aparência visual dos corpos em movimento não será um achatamento (ou um encurtamento) na direção paralela ao movimento. Nesse caso, “A aparência de tal objeto é sempre uma transformação circular (ou seja, produto de inversões) do que apareceria em alguma orientação quando estacionário. Assim, as linhas retas parecem circulares (ou retas).” (Penrose, 1959, p. 139). No mesmo ano, essa conclusão foi corroborada por uma análise realizada pelo físico James Terrell (Terrell, 1959, Miller, 1997).

Usando as transformações relativísticas, Terrell previu que um fenômeno mais surpreendente da mente do que Lorentz ou Einstein haviam suposto porque a diferença nos tempos para a luz chegar à câmera em K de diferentes pontos no corpo sólido em k, faria com que o corpo em k fosse fotografado rotacionado, mas não contraído; na verdade, dependendo do estado de movimento do corpo, um observador em K pode ver suas costas primeiro. (Miller, 1997, p. 251)

³ Cronologicamente, foi o físico austríaco Anton Lampa, em 1924, que apresentou a primeira análise criteriosa sobre a aparência visual de uma haste em movimento. Na conclusão de seu trabalho, ele escreveu: “o cálculo do comprimento da haste móvel, portanto, requer, além do conhecimento da velocidade da haste, a medição do comprimento y' e dos ângulos.” (Lampa, 1924, p. 148). Porém, foi só partir dos trabalhos de Penrose e Terrell, publicados em 1959, que esta interpretação se tornou conhecida.

Os trabalhos de Penrose, em especial o trabalho de Terrell, encontrou boa recepção na comunidade científica, sendo citado em publicações posteriores (Weisskopf, 1960, Boas, 1961, Scott, Vinner, 1965, Scott, Driel, 1970, Mathews, Lakshmanan, 1972, Sheldon, 1988, 1989, Terrell, 1989, Burke, Strode, 1991). Em 1965, os físicos, G. D. Scott & M. R Viner, apresentaram qual seria a aparência visual de um retículo quadriculado (figura 2) e de paralelepípedos (figura 3) em movimento uniforme com velocidades próximas da luz. E em 1970, D. Scott e H. J. van Driel, mostraram qual seria o aspecto visual de uma esfera reticulada em movimento uniforme com a velocidade próximas à da luz. Mais recentemente Kraus *et al* (2002), simularam a aparência visual de uma esfera em movimento, conforme previsto pela Relatividade Especial e como seria se o efeito de contração não existisse (figura 4). Em 1972, P. Mathews & I. Lakshmanan, mostraram qual seria o aspecto visual de um cubo, em três posições distintas, em movimento uniforme, para velocidades próximas à luz (figura 5). Em 2002, Kraus *et al*, mostraram qual seria aparência visual do ciclista de Gamow (figura 6).

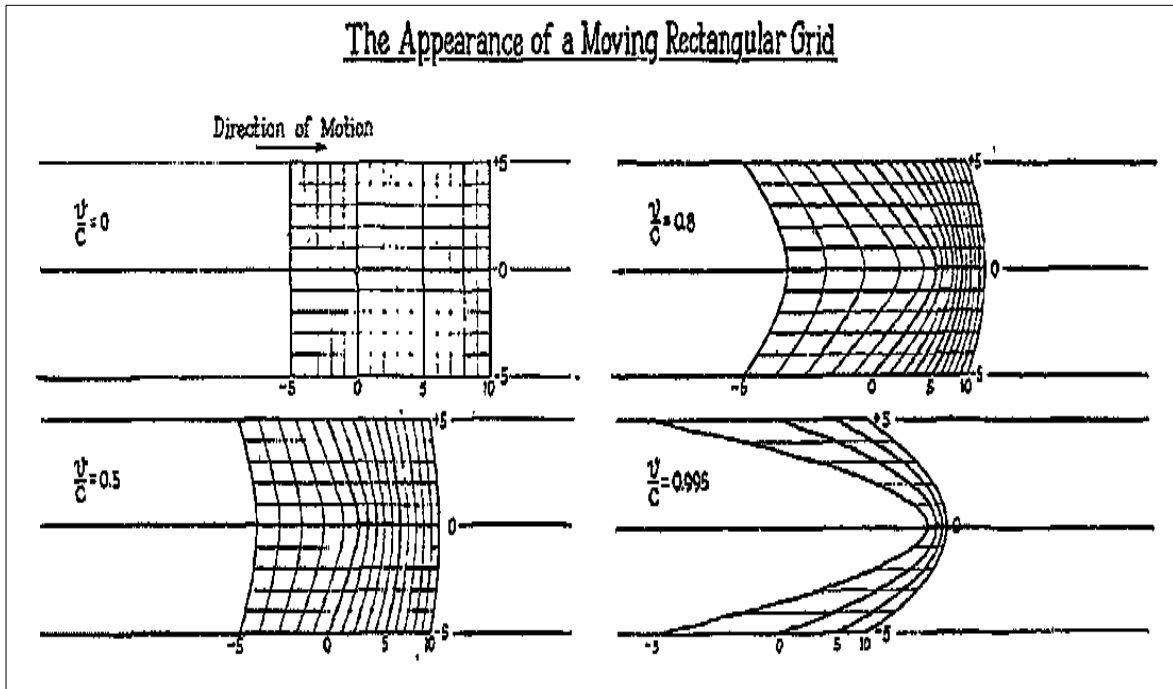


FIGURA 2. Aparência visual de uma grade retangular sob uma contração relativística. Fonte: Scott & Viner (1965, p. 535)

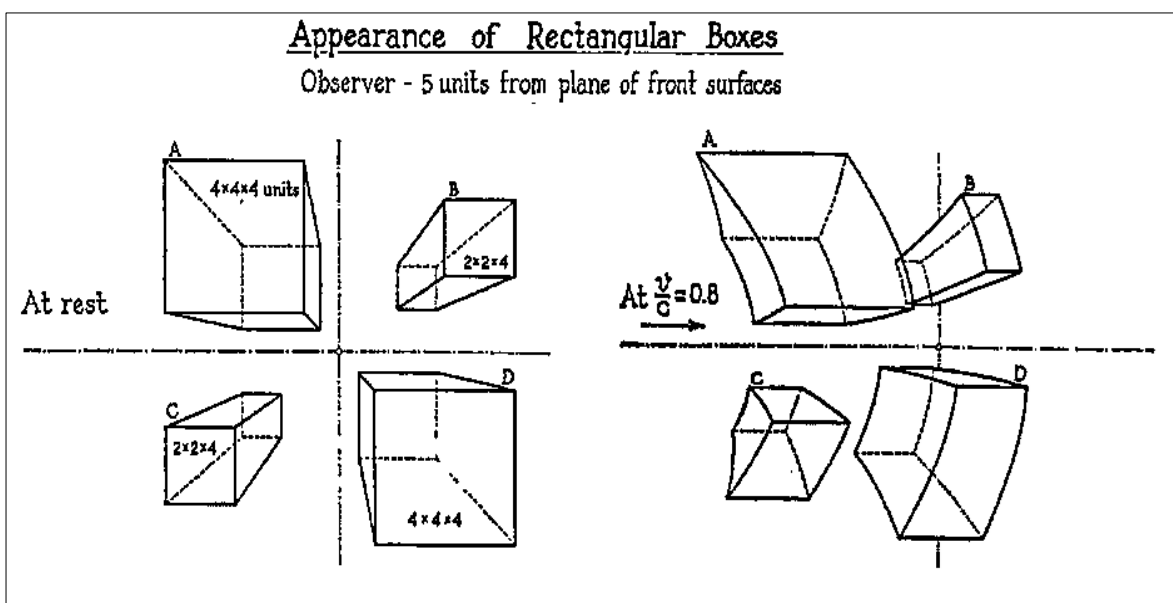


FIGURA 3. Aparência visual de caixas em movimento uniforme próximos a velocidade da luz. Fonte: Scott & Viner (1965, p. 536)

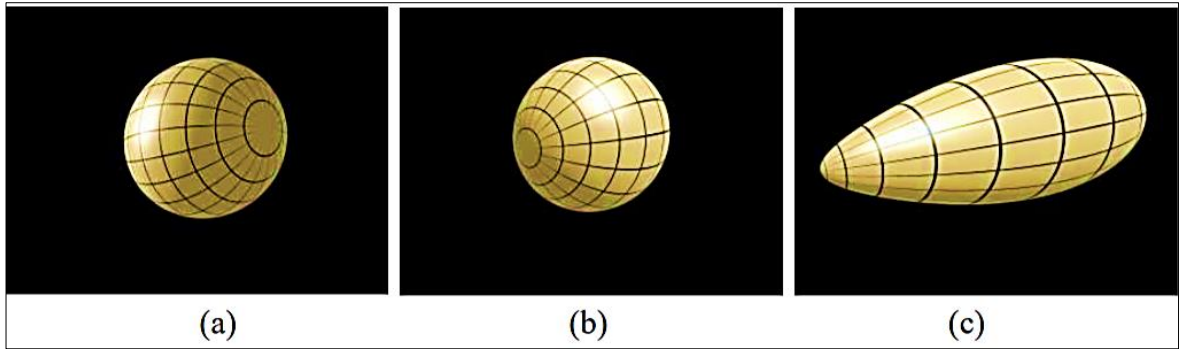


FIGURA 4. (a) Uma esfera em repouso em relação ao observador. (b) A aparência visual da esfera em movimento ($v = 0,95c$) sobre o efeito da contração relativística. (c) A aparência visual de uma esfera em movimento ($v = 0,95c$) se não existisse o efeito de contração relativística. Fonte: Kraus *et al* (2002, p. 78).

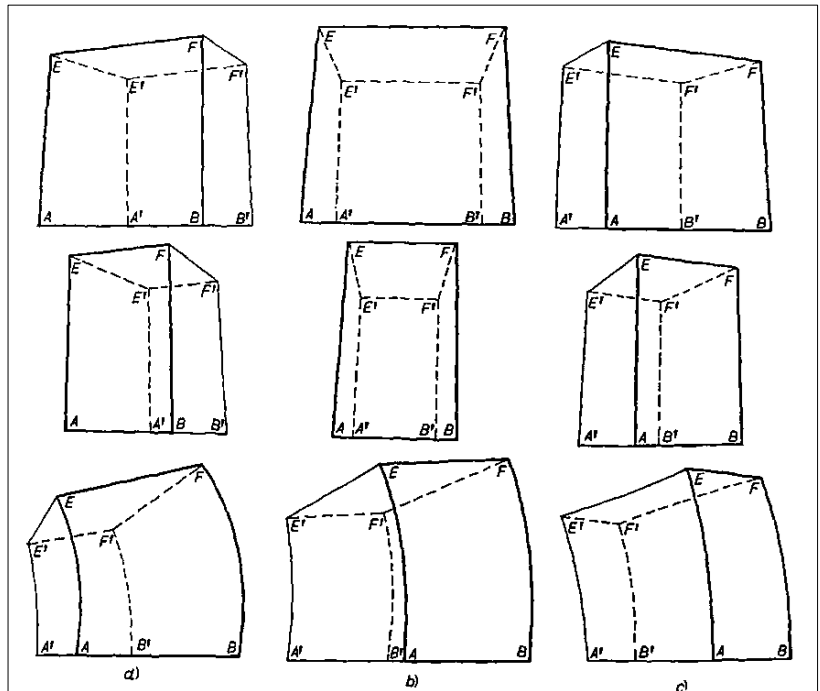


FIGURA 5. As imagens na linha superior representam os cubos estacionários. Nas linhas intermediárias, vemos o efeito da contração relativística como eram concebidas por Einstein e Gamow. Nas imagens inferiores, vemos qual seria a aparência de uma contração relativística. Fonte: Mathews & Lakshmanan (1972, p. 173).

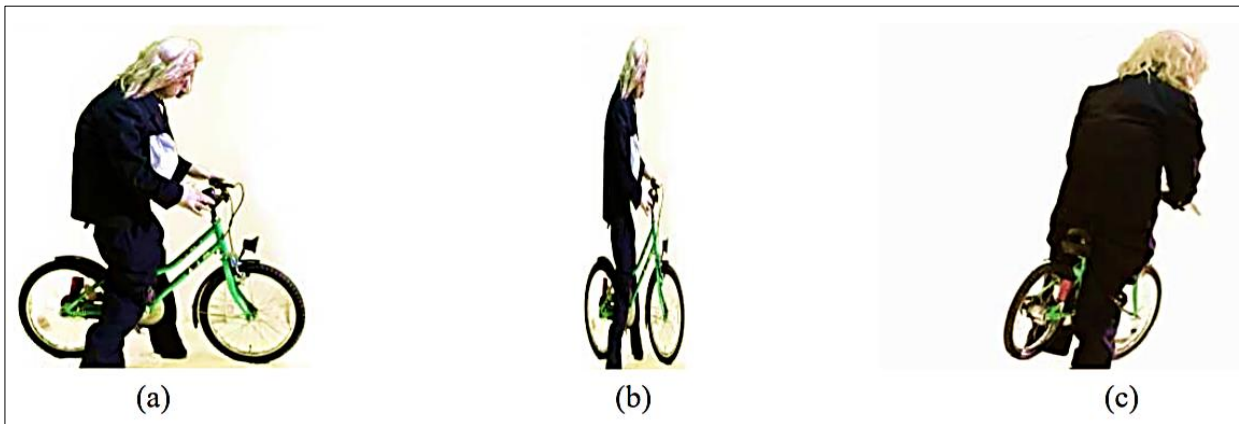


FIGURA 6. (a) ciclista Gamow em repouso. (b) Como Gamow imaginava que seria sua aparência à 93% da velocidade da luz. (c) A aparência visual do ciclista visto a 93% da velocidade da luz. Fonte: Kraus *et al* (2002, p. 78).

Portanto, a partir da década de 1960, estava claro que a aparência de visual dos objetos sobre efeito de uma contração de Lorentz não era de um achatamento, mas uma transformação circular⁴ ou uma contorção (Sheldon, 1988, 1989). É importante salientar que o Efeito Terrell é uma consequência da finitude da velocidade da luz e ocorreria mesmo na ausência de efeitos relativísticos (Gourgoulhon, 2013, p. 158-163)⁵. Por essa razão, ao discutir a contração relativística é preciso diferenciar o *ato de medir* do *ato de observar*.

Como o observador que utiliza este referencial medirá o comprimento L da régua sem ambigüidade alguma? Não basta que um único observador, utilizando um sistema de referência qualquer, olhe ou fotografe a régua em um certo instante t , e daí obtenha as coordenadas das duas extremidades da régua. Isto não está correto devido a finitude da velocidade de propagação da luz. Os dois raios de luz provenientes dessas duas extremidades são registrados como atingindo simultaneamente a retina do olho do observador ou o filme fotográfico, mas de fato foram emitidos de maneira não simultânea: o que veio da extremidade da régua mais distante do observador ou da máquina fotográfica foi emitido primeiro que o outro. Medir as posições das extremidades da régua, portanto, não é exatamente a mesma coisa que ver ou fotografar, como estamos acostumados a pensar cotidianamente. É fundamental distinguir precisamente o que se entende por medir na Relatividade Restrita daquilo que costumeiramente entendemos por ver, observar ou fotografar, sob pena de substituir noções precisamente definidas por outras vagas ou imprecisas. Assim, o observador precisará medir simultaneamente (para ele) as posições das extremidades da régua relativística no referencial S utilizado. (Ostermann, Ricci, 2002, p. 1982-183)

Portanto, seria esperado que os livros didáticos que abordam Teoria da Relatividade Especial trouxessem essas informações para os educandos. Porém, a ampla pesquisa sobre como a contração relativística estava sendo abordado em livros didáticos, no período de 1996 e 2001, realizada por Ostermann & Ricci (2002) mostraram que todos os livros analisados apresentavam a aparência visual da contração relativística como um achatamento ou encurtamento. Naquela ocasião, o conteúdo de física moderna, o que inclui Teoria da Relatividade, não era amplamente abordado nos livros didáticos nacionais (Ostermann, Ricci, 2002) e o artigo objetiva em “alertar para o fato de que o assunto não tem merecido o devido cuidado, fazendo com que os livros apresentem sérios erros conceituais, quando confundem medir com observar ou quando omitem tal distinção, provocando má interpretação pelo leitor.” Em 2018, todos 12 livros didáticos de física aprovados pelo PNLD-2018 apresentam uma seção reservada a física moderna e, por isso, estabelecemos no presente estudo verificar como os livros didáticos de Física apresentam o aspecto visual de uma contração relativística e se os mesmos diferenciam os conceitos de *medida* e de *aparência visual*.

III. METODOLOGIA

Na seção anterior mostramos que ao tratar o fenômeno da contração relativística deve-se diferenciar o conceito de medida do conceito aparência visual dos objetos. Do ponto de vista da medida, os objetos em movimento uniforme sofrem um encurtamento na direção longitudinal ao movimento, porém, observadores externos terão a impressão que este objeto sofreu uma contorção e não como um encurtamento (ou achatamento) na direção paralela ao movimento. Esse fenômeno é o que convencionou-se chamar de Efeito Terrell (Sheldon, 1988, 1989). A partir dessa conclusão, passamos a analisar os capítulos que abordam de Teoria da Relatividade nos livros didáticos de Física aprovados pelo PNLD-2018, listados na tabela I.

Para efetuarmos a análise procedemos de duas formas: (1) comparamos as figuras que representam a aparência de uma contração relativística com as imagens adequadas que apresentamos na seção II. (2) na ausência de figuras, analisamos como os textos descrevem o fenômeno da contração relativística. Buscamos também evidenciar se os textos diferenciam os conceitos de *medida* e de *aparência visual*, conforme discutimos na seção II.

Para cada obra analisada, atribuímos uma nomenclatura: **C**, quando o conceito é apresentado no livro de maneira correta; **I**, quando o conceito é apresentado no livro de maneira incorreta; **A**, quando o conceito não é apresentado no livro e **A*** quando o conceito é mencionado, porém não é discutido no livro. Por fim, após a análise, construímos uma tabela para sintetizar os resultados obtidos (tabela II).

⁴ Esse tipo de transformação é chamado de inversão e ela está associada ao isomorfismo entre o grupo de Homogêneo de Lorentz, $SO(1,3)$ (e suas transformações) e o grupo de Möbius, $PSL(C)$ (e suas transformações). Para detalhes ver: Penrose (1959), Scott & Viener (1965), Fock (1959, p. 377-384), Miller (1997, 209-258) e os capítulos 1.8 e 2.6 de Brown (2011).

⁵ “Se levarmos em consideração apenas a finitude da velocidade da luz em uma teoria não relativística (teoria galileana), uma esfera em movimento pareceria alongada na direção do movimento, como ilustrado na Fig. [4. c]. [Porém], graças à contração de FitzGerald – Lorentz, [a esfera] parece exatamente esférica. Também está claro na Fig. [4. b] que a esfera em movimento parece ter sido girada, mostrando uma parte de sua face oposta à direção do movimento.” (Gourgoulhon, 2013, p. 162).

TABELA I. Livros didáticos aprovados no PNLD-2018 que foram analisados. Fonte: Autoral.

Código	Título	Autor(es)	Ano
A	Física 3: Eletricidade, Física Moderna	Biscoula, Bôas, Doca	2016
B	Física: Eletromagnetismo, Física Moderna	Guimarães, Piqueira, Carron	2016
C	Física 3: Interação e Tecnologia (2016); [D]	Gonçalves Filho & Toscano	2016
D	Física 3: Eletromagnetismo, Física Moderna	Bonjorno <i>et al</i>	2016
E	Compreendendo a Física: Eletromagnetismo e Física Moderna	Gaspar	2017
F	Física para o Ensino Médio 3: Eletricidade, Física Moderna	Kamamoto & Fuke	2017
G	Física em Contextos 3	Pietrocola <i>et al</i>	2016
H	Física por Aula 3: Eletromagnetismo – Física Moderna	Barreto Filho & Silva	2016
I	Conexões com a Física 3: Eletricidade – Física do Século XXI	Martini <i>et al</i>	2016
J	Física, Ciência e Tecnologia 3: Eletromagnetismo, Física Moderna	Torres <i>et al</i>	2016
K	Ser Protagonista – Física 3	Válio <i>et al</i>	2016
L	Física 3: Contexto & Aplicações	Máximo, Alvarenga, Guimarães	2017

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

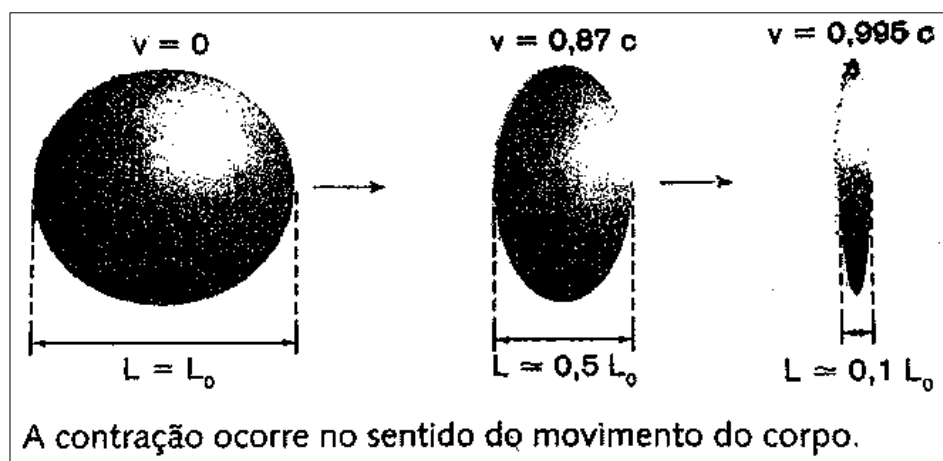
A pesquisa evidenciou que apesar dos esforços do MEC e a constante reformulação dos livros didáticos, os problemas conceituais apontados por Ostermann & Ricci (2002) ainda estão presentes na maior parte dos livros didáticos. A tabela II, sintetiza em quais obras foram encontradas as incongruências.

TABELA II. Ficha de análise e quantificação dos conceitos e episódios históricos. Fonte: Autoral.

Livros Didáticos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Abordagem do conceito de contração relativística	I	I	A*	I	C	I	I	I	I	I	A	I

No que diz respeito à aparência visual dos objetos em uma contração relativística, somente a obra [E] apresenta o conceito de contração relativística de forma correta (C). A obra [C] fala apenas menciona a contração do espaço de forma extremamente sucinta.

As obras [D], [G], [I], [J] e [L] apresentam imagens para ilustrar o efeito da contração relativística. Porém, essas imagens são incorretas (I). Vejamos o porquê. Na obra [D], os autores utilizam a imagem de uma esfera se contraindo (figura 7), que está em desacordo com os resultados discutidos na seção 1 (compare com a figura 4).

**FIGURA 7.** A aparência visual de uma contração de uma esfera segundo a obra [D]. Fonte: Bonjorno *et al* (2016, p. 216).

Na obra [G] há duas imagens representando a contração, a primeira se trata de uma questão para explorar o assunto (figura 8) e a segunda está nos exercícios, trata-se de uma questão do vestibular da UFRN, que pergunta qual será o aspecto visual de cubos em movimentos próximos a velocidade da luz (figura 9), veja que nenhuma das alternativas se assemelha aos aspectos visuais de cubos em movimento uniforme discutidos na seção 1 (compare com a figura 3 e com a figura 5).

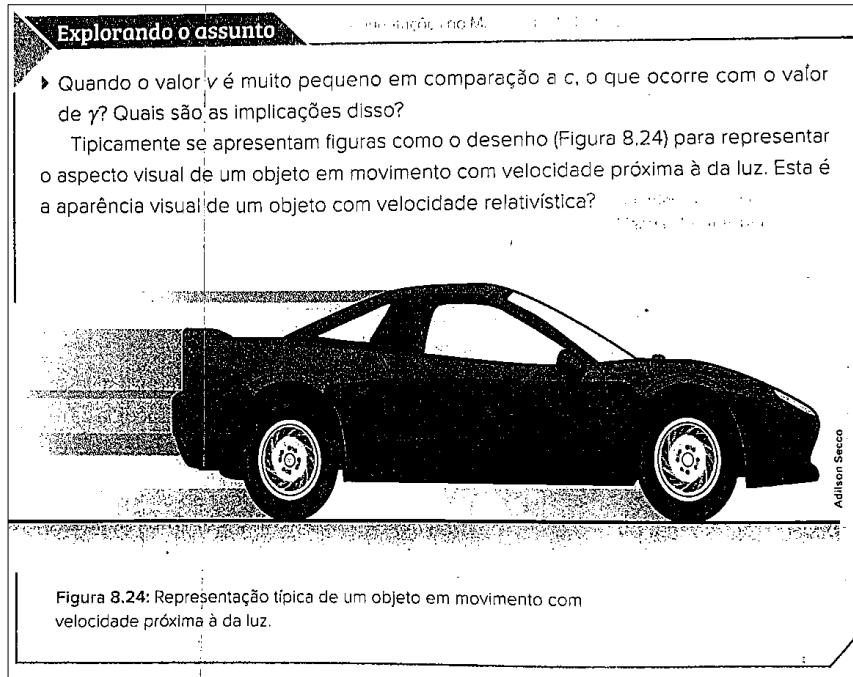


FIGURA 8. Exercício sobre o aspecto visual de um carro em movimento uniforme na obra [G]. Fonte: Pietrocola *et al* (2016, P. 190).

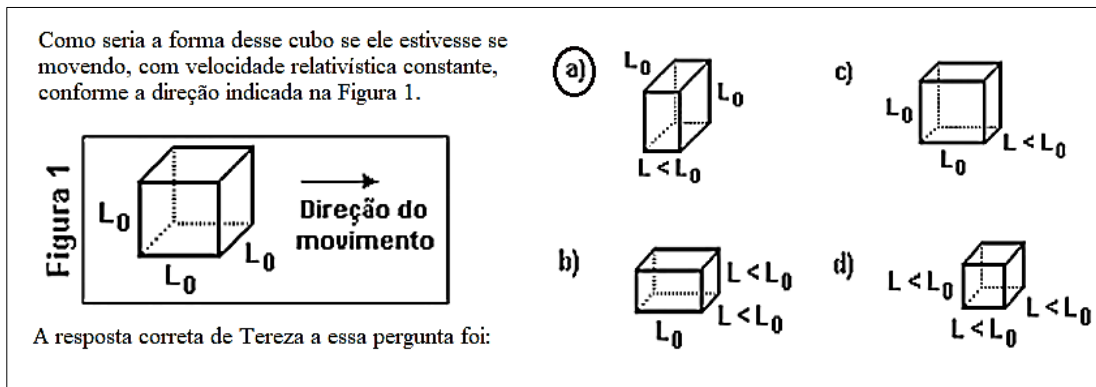


FIGURA 9. Questão do vestibular da UFRN sobre o aspecto visual de um cubo em movimento uniforme apresentado na obra [G]. Fonte: Pietrocola *et al* (2016, p. 196).

Na obra [I] e na obra [J] temos, respectivamente, uma imagem de um carro em movimento representando a contração relativística (figura 10) e um hipopótamo dentro de um trem em movimento sobre o efeito de uma contração (figura 11). As duas imagens destacam o aspecto de encurtamento (ou achatamento) e não de contorção. Embora na figura 11, os autores não afirmem que esta é a aparência visual da contração, como eles não discutem a diferença entre *medida* e *aparência visual*, o leitor poderá inferir que aquela seja a aparência de uma contração relativística.

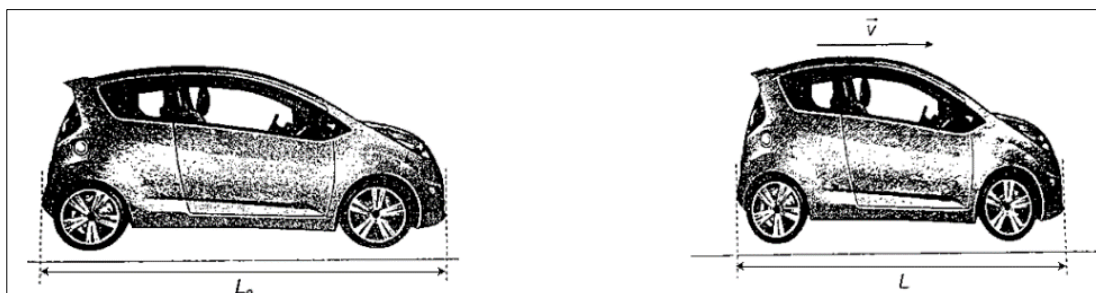


FIGURA 10. O aspecto visual de uma contração relativística na obra [I]. Fonte: Martini *et al* (2016, p. 241).

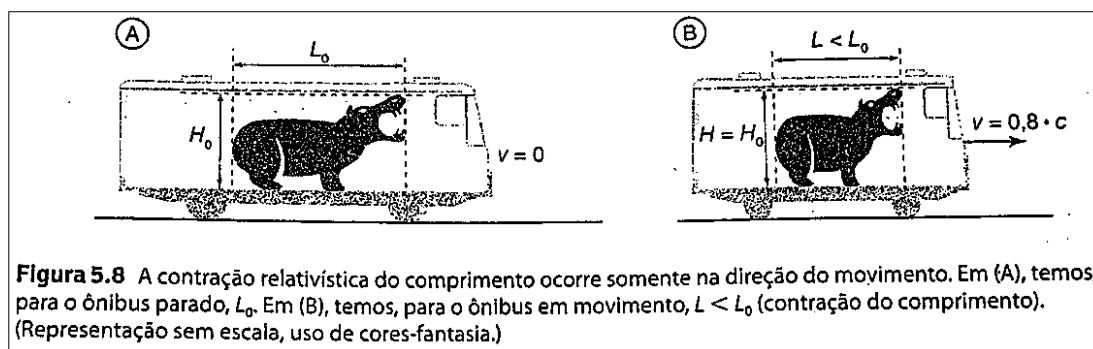


FIGURA 11. Contração relativística na obra [J]. Fonte: Torres *et al* (2016, p. 193).

Por fim, na obra [L], os autores utilizaram a imagem proposta por Gamow (figura 1) para ilustrar a aparência visual de uma contração (figura 12). Porém, como vimos na seção II, provou-se que essa ilustração é inadequada (compare com a figura 6).



FIGURA 12. O aspecto visual de uma contração relativística na obra [J]. Fonte: Torres *et al* (2016, p. 193).

As obras [A], [B], [F], e [H] não apresentam imagens para ilustrar o fenômeno da contração, mas pecam por utilizar palavras que tratam como sinônimo os atos de *medir* e *visualizar*. Na obra [F], após a dedução algébrica da contração do espaço, os autores escrevem: “observe que esse efeito só pode ser *visto* na direção do movimento relativo: a única dimensão da barra que sofre a deformação. A largura e a espessura continuam preservadas.” (Kamamoto, Fuke, 2017, p. 241, *itálicos nossos*). Na obra [A] introduz o conceito de contração do espaço discutindo a situação em que um trem atravessa um túnel. Este túnel, a princípio, possui um comprimento menor que o do trem em repouso, porém, devido ao efeito de contração, para um observador em repouso em relação ao túnel, o trem se tornaria menor que o túnel e por isso poderia sumir completamente. Esse problema também é abordado no segundo exercício da seção *Questões Propostas*.

Na obra [B], quando os autores discutem o conceito de contração, eles utilizam corretamente a palavra *medir*, porém, assim como na edição de 1995, analisada por Ostermann & Ricci (2002, p. 187), “a obra peca em não diferenciar claramente o que se entende por medir e observar, nem em distinguir a aparência visual daquilo que é revelado pelas medidas de comprimento”. Porém, a principal razão para incluí-la como incongruente, é por causa do exercício 14, cujo enunciado é:

14. Um painel de propaganda tem formato retangular com 5 m de comprimento e 3 m de altura. Para que o formato desse painel pareça quadrado para um viajante espacial, este deverá estar em movimento: a) em uma direção paralela ao lado mais curto do painel. b) em uma direção paralela ao lado mais comprido do painel. c) em uma direção perpendicular ao lado mais comprido do painel. d) em qualquer direção. (Guimarães, Piqueira, Carron, 2016, p. 198)

Os autores sugerem como resposta correta a alternativa (b), porém como foi mostrado na seção 1, não existe uma direção de movimento em que a placa retangular aparente ser quadrada. Qualquer movimento relativístico fará que ela aparente estar contorcida (veja a figura 2).

Na obra [H], os autores fazem uma importante distinção entre a contração do espaço na perspectiva de Lorentz e Fitzgerald, como um fenômeno real que afetava a distribuição molecular do material, e a na perspectiva de Einstein que esse fenômeno era apenas aparente e decorre das formas de medidas empregadas por diferentes observadores.

Vamos fazer uma última consideração sobre os resultados obtidos. Será que, nos casos em que é observada a contração do espaço, ela é de fato real? Existe uma alteração na estrutura dos materiais, nas moléculas que os compõem, ou trata-se de uma mera consequência da aparência visual de um objeto em movimento? Essa pergunta também não teve uma resposta imediata. A princípio, teóricos como Lorentz acreditavam que a contração era resultado da ação do éter sobre as forças moleculares, que deveriam ser alteradas pelo movimento. Einstein, ao contrário, acreditava que a contração se tratava de um mero efeito da aparência visual dos objetos em movimento relativo, que é a interpretação pregada, aceita e disseminada hoje pela Teoria da Relatividade. (Torres et al, 2016, p. 212, grifos nossos)

Como vimos na seção II, é verdade que Einstein acreditava que a contração do movimento é *de um mero efeito da aparência visual dos objetos em movimento relativo*, e que de fato os objetos aparentariam estar “achatados”, mas essa concepção provou-se equivocada. Infelizmente os autores não fazem essa discussão e da forma como é apresentada, infere-se que a contração do espaço visualmente se assemelha a um encurtamento. Inclusive, o problema 15, da seção exercícios propostos reforça essa concepção incongruente: “15. Um observador vê uma barra de 4 m de comprimento passando com uma velocidade igual a $0,6c$ em relação a ele. Determine a medida do comprimento dessa barra. [Resposta:] 3,2 m.” (Torres et al, 2016, p. 213, itálicos nossos)⁶.

Na obra [K], o conceito de contração do espaço é apenas mencionado em uma breve frase: “de acordo com a nova teoria, para movimentos com velocidades próximas a da luz, ocorre a contração do espaço, enquanto o tempo se dilata.” (Válio et al, 2016, p. 255). Como não há discussão sobre o processo de medida e a aparência dos objetos, classificamos como *Ausente (A)*.

Por fim, convém discutir o caso da obra [C]. Dos 12 livros didáticos aprovados no PNLD-2018, essa é a única que não apresenta um capítulo dedicado a Teoria da Relatividade. O texto aborda os conceitos básicos de relatividade no decorrer de cerca de duas páginas. A discussão sobre a contração do espaço é toda qualitativa e ocupa apenas um parágrafo. O conceito de contração do espaço é apenas mencionado a partir de uma discussão envolvendo o paradoxo dos gêmeos. Como objetivo da análise era verificar a relação entre *medida* e *aparência* em uma contração relativística e essa discussão não é feita pelos autores, optamos assina-la como **A***.

V. CONCLUSÕES

Apesar dos alertas Ostermann & Ricci (2002) sobre as incongruências conceituais envolvendo o conceito de contração relativística, ela se mantém presente em algumas dos LD de física aprovados no PNLD-2018. Alguém poderia objetar que essas discussões são muito “avançadas”, “complexas” ou “preciosismos” para uma aula de física no ensino médio. Concordamos com Ostermann & Ricci (2002, p. 188) que não se trata de um mero detalhe ou preciosismo, cuja relevância pode ser relevada por se tratar de um conteúdo introdutório adaptado a alunos de ensino médio, pois

Dado o caráter violador do senso comum intrínseco à Relatividade Restrita, tais tarefas são inevitáveis ao professor. Omitilas, simplesmente, é transmitir erroneamente o conteúdo, reforçando não somente as concepções espontâneas que o aluno evoca da simples leitura do texto, mas também todas aquelas advindas do uso e abuso de temas da Relatividade Restrita na literatura não-científica, no cinema e na televisão, correndo o sério risco de transformar educação científica em ficção científica. (Ostermann, Ricci, 2002, p. 188)

Por isso, é importante que o professor se atente a estes detalhes e os denunciem em sala de aula. Não trata-se de desacreditar o livro didático ou seus autores, mas mostrar aos alunos que as autoridades acadêmicas podem cometer erros, que é importante buscar outras fontes e análises destas obras. Trata-se de cultivar nos alunos um ceticismo moderado, uma atitude crítica e reflexiva e ensinar os alunos como verificar informações. Esse tipo de exercício é vital em uma realidade onde os discursos de pós-verdades e as *fakes news* fluem com uma facilidade nunca antes vista. Também esperamos que as discussões feitas nesse ensaio cheguem aos autores e revisores de LD e aos técnicos do MEC, e esperamos que nossos próximos PNLDs essas incongruências sejam erradicadas.

⁶ Esse exercício é extremamente problemático. Mesmo que relevemos o fato de que os objetos em movimento uniforme se contorcem e não se encurtam, o autor diz que o observador vê (mais precisamente, mede) uma barra de 4 metros. Oras, este valor aferido é justamente da barra “contraída”. Logo, o comprimento da barra deveria ser maior (exatamente, 5 m) e não menor (3,2 m). Esse valor só seria possível se o enunciado do exercício dissesse que o comprimento da barra no referencial próprio é de 4 metros. Trata-se de um erro conceitual crasso.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/MEC – Brasil.

REFERÊNCIAS

- Barreto Filho, B. Silva, C. X. (2016). *Física aula por aula 3: eletromagnetismo, física moderna*. 3ª. ed., São Paulo: FTD.
- Biscuola, J. G. Bôas, N. V. Doca, R. H. (2016). *Física 3: eletricidade, física moderna*. 3ª. ed, São Paulo: Saraiva.
- Boas, M. L. (1961) Apparent shape of large objects at relativistic speeds. *American Journal of Physics*, 29(5), 283–286.
- Bonjorno, J. R. et al. (2016). *Física 3: eletromagnetismo, física moderna*. 3ª ed., São Paulo: FTD.
- Brasil (s. a.). Ministério da Educação. Programas do Livro. *Sobre os Programas do Livro*. Acessado em: <<https://www.fnde.gov.br/programas/programas-do-livro>>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- Brown, K. (2011). *Reflections on Relativity*. Morrisville: Lulu Press.
- Burke, J. R., Strode, F. J. (1991). Classroom exercises with the Terrell effect. *American Journal of Physics*, 59(10), 912–915.
- Fock, V. (1959). *The Theory of Space, Time, and Gravitation*. New York: Pergamon.
- Gamow, G. (1939) *Mr Tompkins in Wonderland*. New York: The Macmillan Company.
- Gamow, G. (1980). *O Incrível Mundo da Física Moderna*. São Paulo: IBRASA.
- Gaspar, A. (2017). *Compreendendo a Física: eletromagnetismo e física moderna*. 3ª. ed., São Paulo: Ática.
- Gonçalves Filho, A. Toscano, C. (2016). *Física 3: interação e tecnologia*. 2ª. ed., Rio de Janeiro: Leya Brasil.
- Gourgoulhon, E. (2013). *Special Relativity in General Frames: From Particles to Astrophysics*. Berlin: Springer.
- Guimarães, O. Piquiera, J. R. Carron, W. (2016). *Física: eletromagnetismo e física moderna*. 3ª. ed., São Paulo: Saraiva.
- Jardim, W. T. Otoya, V. J. V. Oliveira, C. G. S. (2015). A teoria da relatividade restrita e os livros didáticos do Ensino Médio: Discordâncias sobre o conceito de massa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(2), 2506.
- Kamamoto, K. Fuke, L. F. (2017). *Física para o Ensino Médio 3: eletricidade, física moderna*. 4ª. ed., São Paulo: Saraiva.
- Kraus, U. et al (2002). Was Einstein noch nicht sehen konnte. *Physik Journal*, 1(7/8), 77-82.
- Lampa, A (1924). Wie erscheint nach der Relativitätstheorie ein bewegter Stab einem ruhenden Beobachter? *Zeitschrift für Physik*, 27, 138–148.
- Lorentz, H. (1895). *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden: E. J. Brill.
- Lorentz, H. (1904). Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, v. 6: 809–831.
- Martini, G et al. (2016). *Conexões com a Física 3: eletricidade, física do século XXI*. 3ª. ed., São Paulo: Moderna.
- Martins, R. A. (1998). Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2 - Física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 15(3), 265-300.

Martins, R. A. (2005). El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poincaré. In: Faas, H.; Saal, A.; Velasco, M. (Eds.). *Epistemología e Historia de la Ciencia. Selección de Trabajos de las XV Jornadas. Facultad de Filosofía y Humanidades*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

Martins, R. A. (2012) *Teoria Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física.

Martins, R. A. (2015). *A Origem Histórica da Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física.

Mathews, P. M. Lakshmanan, M. (1972). On the Apparent Visual Forms of Relativistically Moving Objects. *Nuovo Cimento B*, 12(1), 168–181.

Máximo, A. Alvarenga, B. Guimarães, C. (2016). *Física 3: contexto & aplicações*. 2ª. ed., São Paulo: Scipione.

Miller, A. I. (1997). *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)*. New York: Springer.

Neves, J. A. (2014). *Uma análise do conteúdo da relatividade restrita nos livros didáticos do Ensino Médio*. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

Ostermann, R. Ricci, T. F. (2002). Relatividade restrita no ensino médio: Contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(2), 176-190.

Penrose, R. (1959). The apparent shape of a relativistically moving sphere. *Proceedings of Cambridge Philosophical Society*, 55(01), 137-139.

Pietrocola, M. (2016). *et al. Física em Contextos 3*. São Paulo: Editora do Brasil.

Poincaré, H. (1900). Les relations entre la physique expérimentale et de la physique mathématique. *Rapports présentés au Congrès International de Physique réuni à Paris en 1900*, v. 1, 1-29.

Poincaré, H. (1902) *La science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion.

Poincaré, H. (1904). L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique. Conférence lue le 24 septembre 1904 au Congrès d'Art et de Science de Saint Louis. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, v. 23, 302-24.

Poincaré, H. (1905). Sur la dynamique de l'électron. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. 140, 1504–1508.

Poincaré, J. H. (1906). Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 21, 129–176.

Scott, G. D. van Driel, H. J. (1970). Geometrical Appearances at Relativistic Speeds. *American Journal of Physics*, 38(8), 971–977.

Scott, G. D. Viner, M. R. (1965). The geometrical appearance of large objects moving at relativistic speeds. *American Journal of Physics*, 33(7), 534–536.

Sheldon, E. The twists and turns of the Terrell Effect. (1988). *American Journal of Physics*, 56(3), 199–200.

Sheldon, E. (1989) The Terrell Effect: Eppure si contorce! *American Journal of Physics*, 57(6), 487.

Silva, A. G. *et al.* (2019). Análise da história da Teoria da Relatividade Restrita em livros didáticos do terceiro ano do ensino médio indicados no PNLEM 2015/2017. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 13(4), 4305.

Terrel, J. (1959). Invisibility of the Lorentz Contraction. *Physical Review*, 116, 1041-1045.

Terrell, J. (1989). The Terrell Effect. *American Journal of Physics*, 57(1), 9–10.

Torres, C. M. A. *et al.* (2016). *Física, Ciência e Tecnologia 3: eletromagnetismo, física moderna*. 4ª. ed., São Paulo: Moderna.

Válio, A. B. M. *et al.* (2016). *Ser Protagonista – Física 3*. 3ª. ed., São Paulo: SM Brasil.

Weisskopf, V. F. (1960). The visual appearance of rapidly moving objects. *Physics Today*, 13(9), 24-27.

Whittaker, E. T. (1953). *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol 2. New York: American Institute of Physics.