

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
REDE NORDESTE DE ENSINO
DOUTORADO EM ENSINO**

JOSÉ RENAN GOMES DOS SANTOS

**HISTÓRIA, FILOSOFIA E RECONSTRUÇÕES RACIONAIS DIDÁTICAS:
CONEXÕES CONCEITUAIS PARA UM ENSINO DE CIÊNCIAS
MULTIDISCIPLINAR**

**MACEIÓ – AL
2025**

JOSÉ RENAN GOMES DOS SANTOS

**HISTÓRIA, FILOSOFIA E RECONSTRUÇÕES RACIONAIS DIDÁTICAS:
CONEXÕES CONCEITUAIS PARA UM ENSINO DE CIÊNCIAS
MULTIDISCIPLINAR**

Tese de doutorado apresentada à banca examinadora da Rede Nordeste de Ensino – RENOEN. Doutorado em Ensino, polo Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como exigência para obtenção do título de Doutor em Ensino.

Orientador: Prof. Dr. Jenner Barreto Bastos Filho

**MACEIÓ – AL
2025**

**Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Cláudio César Temóteo Galvino – CRB4: 1459

S237h	Santos, José Renan Gomes dos. História, filosofia e reconstruções racionais didáticas: conexões conceituais para um ensino de ciências multidisciplinar / José Renan Gomes dos Santos. – 2025. 145 f. Orientador: Jenner Barreto Bastos Filho. Tese (Doutorado em Ensino) – Universidade Federal de Alagoas. Rede Nordeste de Ensino. Centro de Educação. Maceió, 2025. Bibliografias: f. 29-34; 50-52; 70-72; 96-98; 125-130; 141-142. Apêndices: f. 143-145.
	1. Conexões conceituais. 2. Reconstruções racionais didáticas. 3. História e filosofia da ciência. 4. Eratóstenes. 5. Unificação de Newton. I. Título.

CDU: 37.02

Folha de Aprovação

JOSÉ RENAN GOMES DOS SANTOS

HISTÓRIA, FILOSOFIA E RECONSTRUÇÕES RACIONAIS DIDÁTICAS: CONEXÕES CONCEITUAIS PARA UM ENSINO DE CIÊNCIAS MULTIDISCIPLINAR

Tese de doutorado apresentada à banca examinadora, já referendada pela Rede Nordeste de Ensino – RENOEN. Doutorado em Ensino, polo Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como exigência para obtenção do título de Doutor em Ensino, e aprovada em 03 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
JENNER BARRETO BASTOS FILHO
Data: 07/12/2025 10:33:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente: Prof. Dr. Jenner Barreto Bastos Filho
Universidade Federal de Alagoas (RENOEN/UFAL)

 Documento assinado digitalmente
ELTON CASADO FIREMAN
Data: 08/12/2025 08:20:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador interno: Prof. Dr. Elton Casado Fireman
Rede Nordeste de Ensino - Universidade Federal de Alagoas (RENOEN/UFAL)

 Documento assinado digitalmente
IVANDERSON PEREIRA DA SILVA
Data: 15/12/2025 15:15:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador interno: Prof. Dr. Ivanderson Pereira da Silva
Rede Nordeste de Ensino - Universidade Federal de Alagoas (RENOEN/UFAL)

 Documento assinado digitalmente
FRANCISCO NAIRON MONTEIRO JUNIOR
Data: 07/12/2025 16:39:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador externo: Prof. Dr. Francisco Nairon Monteiro Junior
Rede Nordeste de Ensino - Universidade Federal Rural de Pernambuco
(RENOEN/UFRPE)

 Documento assinado digitalmente
MARCOS ANTONIO BARROS SANTOS
Data: 08/12/2025 16:52:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador externo: Prof. Dr. Marcos Antonio Barros Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

À minha família e amigos.

Em especial, aos meus pais, Lindinalva Gomes e Ranulfo Paranhos (*in memoriam*),
pelo esforço em garantir uma educação de qualidade aos filhos e pelo exemplo de
vida que permanece como inspiração.

À minha esposa, Sâmya, pela compreensão, paciência e apoio incondicional em
todos esses anos de caminhada.

À minha filha, Valentina, por revelar diariamente o verdadeiro sentido da vida e
renovar minhas forças.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de doutorado só foi possível graças ao apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas, às quais registro minha sincera gratidão.

A Deus, pela inspiração e pela força que me orientaram ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jenner Barreto Bastos Filho, pela orientação competente, pela paciência, pelas críticas construtivas e pelo constante estímulo à reflexão acadêmica. Sua dedicação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do doutorado, da turma “Os Desbravadores”, agradeço pela troca de ideias, pelo apoio mútuo e pelos momentos de companheirismo que tornaram o percurso mais leve.

À minha família, pela compreensão, pelo amor e pelo apoio em todas as etapas desta jornada. Especialmente, as minhas irmãs, Sônia e Reny e aos meus irmãos Paulo, Cicero e Ranulfo.

Aos amigos e amigas que estiveram ao meu lado, agradeço pela escuta atenta e pelo incentivo constante. De modo especial, à Profa. Ma. Giselli Kézia, pelo apoio e discussões sobre ensino.

Ao Programa de Pós-Graduação RENOEN – AL, aos docentes, funcionários e técnicos administrativos, pelo apoio institucional e pelas oportunidades oferecidas.

Aos membros da banca examinadora, agradeço a leitura atenta, pelas críticas e pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

Por fim, registro minha gratidão a todos e todas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esta tese fosse concluída.

Divulgar a ciência – tentar tornar os seus métodos e descobertas acessíveis aos que não são cientistas – é o passo que se segue natural e imediatamente, não explicar a ciência me parece perverso.

Carl Sagan

RESUMO

A presente tese tem como um de seus objetivos precípuos o de prover meios e subsídios para uma prática pedagógica que se constitua em um ensino de ciências genuinamente multidisciplinar em um cenário de ensino médio e/ou dos primeiros anos do ensino superior. Ao se eleger como procedimento a adoção do método das conexões conceituais em combinação com o método das reconstruções racionais didáticas, ambos ancorados na confluência Arte-Ciência-Filosofia, são suscitadas questões epistemológicas de variados teores e discutidas as suas repercussões em amplos domínios do pensamento. Como temas geradores para as articulações que redundaram nas conexões conceituais e nas reconstruções racionais, bem como nas suas respectivas produções de significação e de ressignificação, foram escolhidos, respectivamente, o episódio da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria e o processo histórico complexo da formulação da teoria da gravitação universal de Newton. Entre os resultados mais relevantes que aqui podemos elencar, escolheríamos os seguintes: a produção de quatro artigos com potencial para subsidiar a discussão e a produção de significados em nível multidisciplinar e em variados níveis da educação; a não linearidade e alta complexidade do desenvolvimento científico enquanto aspecto central a ser considerado no processo de ensino; e a produção de interpretações e considerações autônomas por parte dos sujeitos da educação. Argumentamos que a presente proposta oferece amplas potencialidades para que a natureza da ciência seja concebida enquanto genuína manifestação da cultura humana, bem como que a própria educação científica seja concebida enquanto prática pedagógica eminentemente dialógica.

Palavras-chave: Conexões Conceituais; Reconstruções Racionais Didáticas; História e Filosofia da Ciência; Eratóstenes; Unificação de Newton.

ABSTRACT

The present thesis has as one of its primary objectives to provide means and support for a pedagogical practice that constitutes a genuinely multidisciplinary science education in the context of high school and/or the early years of higher education. By choosing as a procedure the adoption of the method of conceptual connections in combination with the method of rational didactic reconstructions—both anchored in the confluence of Art, Science, and Philosophy—epistemological questions of various kinds are raised, and their repercussions are discussed across broad domains of thought. As generative themes for the articulations that resulted in conceptual connections and rational reconstructions, as well as in their respective processes of meaning-making and re-signification, were chosen, respectively, the episode of the measurement of the Earth's radius by Eratosthenes of Alexandria and the complex historical process of the formulation of Newton's theory of universal gravitation. Among the most relevant results that can be highlighted here, we would choose the following: the production of four articles with the potential to support discussion and meaning-making at a multidisciplinary level and across various educational stages; the nonlinearity and high complexity of scientific development as a central aspect to be considered in the teaching process; and the production of autonomous interpretations and reflections by the subjects of education. We argue that the present proposal offers broad potential for the nature of science to be understood as a genuine manifestation of human culture, as well as for science education itself to be conceived as an eminently dialogical pedagogical practice.

Keywords: Conceptual Connections; Didactic Rational Reconstructions; History and Philosophy of Science; Eratosthenes; Newtonian Unification.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 APRESENTAÇÃO	11
2 SOBRE O ENSINO DE CIÊNCIAS	15
3 QUESTÃO DE PESQUISA	21
4 OBJETIVOS DO ESTUDO E TESE	24
5 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO	26
6 REFERÊNCIAS	29
CAPÍTULO 1/ ARTIGO 1	35
CONEXÕES PARA UM ENSINO DE CIÊNCIAS MULTIDISCIPLINAR A PARTIR DO SEMINAL FEITO DE ERATÓSTENES	35
1 INTRODUÇÃO	36
2 UMA BREVE AMOSTRA DE EXEMPLOS QUE EXPLORAM A CONFLUÊNCIA ARTE-CIÊNCIA-FILOSOFIA	38
3 O EPISÓDIO EM FOCO	40
4 DE UM PONTO DE VISTA EMINETEMENTE LÓGICO, A MEDIDA DO RAIO DA TERRA POR ERATÓSTENES NÃO É COMPATÍVEL COM A CONCEPÇÃO GEOCÊNTRICA	42
5 A ORDEM LÓGICA NÃO É EQUIVALENTE À ORDEM HISTÓRICA	44
6 COMO O EPISÓDIO ESCOLHIDO INSPIRA A ARTICULAÇÃO ENVOLVENDO A CONFLUÊNCIA ARTE-CIÊNCIA-FILOSOFIA: ALGUMAS CONSIDERAÇÕES DE TEOR EXTERNO	47
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
8 REFERÊNCIAS	50
CAPÍTULO 2/ ARTIGO 2	53
A NATUREZA DO ESPAÇO: ALGUNS PROBLEMAS EPISTEMOLÓGICOS SUSCITADOS PELO SEMINAL EPISÓDIO DE ERATÓSTENES	53
1 INTRODUÇÃO	54
2 DA INCOMPATIBILIDADE ENTRE A TEORIA DOS DOIS MUNDOS DE ARISTÓTELES E O FEITO GRANDIOSO DA MEDIDA DO RAIO DA TERRA POR ERATÓSTENES	56
3 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA, SUA NÃO LINEARIDADE E SUAS INVERSÕES EPISTÊMICAS	58
4 SOBRE A NATUREZA DO ESPAÇO	62
4.1 ESPAÇO EDUCACIONAL POSICIONAL – MODELO (A)	65
4.2 ESPAÇO EDUCACIONAL ABSOLUTO - MODELO (B)	65
4.3 CONFRONTANDO AS CONCEPÇÕES DE ESPAÇO EDUCACIONAL (A) E (B)	66
4.4 O ENSINO DE CIÊNCIAS NUMA PERSPECTIVA DOS CONCEITOS DE ESPAÇO RELATIVÍSTICO E ABSOLUTO	67
4.4.1 <i>Modelo tradicional de ensino de ciências (espaço absoluto)</i>	67

4.4.2	Modelo interativo e investigativo de ensino de ciências (espaço relativístico/correlacional)	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6	REFERÊNCIAS	70
 CAPÍTULO 3/ ARTIGO 3		73
O ENSINO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL À LUZ DOS MÉTODOS COMBINADOS DAS CONEXÕES CONCEITUAIS E DAS RECONSTRUÇÕES RACIONAIS DIDÁTICAS		73
1	INTRODUÇÃO	73
2	ASPECTOS DO PENSAMENTO NEWTONIANO	76
3	COMO CONTORNAR OS OBSTÁCULOS EM SITUAÇÕES DE ENSINO SOBRE O TEMA DA GRAVITAÇÃO?	79
4	UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DIDÁTICA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	83
4.1	PASSOS PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA RRD	83
4.2	UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DIDÁTICA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	84
4.2.1	A física dos movimentos locais de Galileu	85
4.2.2	A teoria da aceleração centrípeta	86
4.2.3	Conectando a teoria gravitacional de Newton com a teoria de Galileu	87
4.2.4	Análise do vínculo entre as teorias de Newton e de Galileu	89
4.2.5	As leis de Kepler	90
4.2.6	Uma hipótese muito ousada aproximando a física terrestre da física celeste	90
4.2.7	Conectando a teoria gravitacional de Newton com a astronomia de Kepler	91
4.2.8	Análise do vínculo entre a teoria de Newton e a teoria de Kepler	92
4.2.9	Caminhando para a unificação	93
4.3	MAPA CONCEITUAL E CATEGORIAS CONCEITUAIS ENVOLVIDAS	94
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
6	REFERÊNCIAS	96
 CAPÍTULO 4/ ARTIGO 4		99
DISCUSSÕES SOBRE O ENSINO DE CIÊNCIAS SUSCITADAS A PARTIR DA TEORIA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL: CATEGORIAS CONCEITUAIS, NATUREZA DA CIÊNCIA E PROCESSOS MENTAIS		99
1	INTRODUÇÃO	99
2	CATEGORIAS CONCEITUAIS ENVOLVIDAS EM UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DIDÁTICA	102
2.1	CATEGORIAS CINEMÁTICAS E DINÂMICAS	102
2.2	TEOREMA SOBRE A ACELERAÇÃO CENTRÍPETA DOS PLANETAS	103
2.2.1	Um obstáculo	105
2.3	UMA APRECIACÃO PANORÂMICA SOBRE O PAPEL DA MATEMÁTICA PARA A FILOSOFIA NATURAL AO LONGO DO SÉCULO XVII EUROPEU	106

3	DISCUSSÕES SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA A PARTIR DO EPISÓDIO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	111
4	PROCESSOS MENTAIS E ENSINO DE CIÊNCIAS	117
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
6	REFERÊNCIAS	125
	CONSIDERAÇÕES	131
	SÍNTESE DOS ESTUDOS QUE COMPÕEM A TESE	132
	CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E A PESQUISA NA ÁREA.....	136
	MODELO EPISTEMOLÓGICO PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS	137
	A TÍTULO DE CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
	REFERÊNCIAS	141
	APÊNDICE	143

INTRODUÇÃO

1 APRESENTAÇÃO

Minha carreira como professor de Física teve início em 1998, após ter sido aprovado em um processo seletivo simplificado para professor temporário da rede estadual de ensino de Alagoas. Na época, ainda cursando a licenciatura em Física, assumir turmas do Ensino Médio contribuiu de forma significativa para a minha formação, sobretudo porque a experiência me mostrou que um modelo de ensino baseado na transmissão de informações da cabeça do professor para a cabeça do aluno, passando pela lousa e pelas folhas do caderno apenas para a realização de exames, configurava uma meta educacional inapropriada (Finkel, 1999 *apud* Moreira, 2018). Quase nenhum estudante entendia ou se empolgava com as belíssimas passagens matemáticas ou com o surgimento de fórmulas que preenchiam todo o espaço da lousa. Tratava-se de um verdadeiro mar de ausência de significados (Matthews, 1995).

Eu tinha então uma questão que parecia bastante interessante para a elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC): como prover sentido aos modelos matemáticos para que os estudantes conseguissem compreender o significado físico presente nas fórmulas e equações? Naquele momento, o aspecto da natureza do conhecimento físico que me parecia mais relevante, tanto para o desenvolvimento da ciência quanto para o seu ensino, era o matemático. A ideia de que, para ensinar conteúdos de Física, o caminho deveria ser a apresentação e a exploração dos modelos matemáticos, fazia total sentido. Assim, a primeira vez que tentei lidar com a ausência de significado no ensino de Física, durante a elaboração do TCC, foi por meio de atividades de modelagem computacional. Araújo, Veit e Moreira (2004) haviam explorado modelos computacionais para o ensino de gráficos de cinemática e constataram que tais atividades auxiliavam os alunos na compreensão dos conceitos, além de permitir que, por não ser necessário realizar as operações matemáticas, estes poderiam ficar mais livres para pensar sobre os fenômenos. Inspirado por essa abordagem, elaborei um conjunto de atividades de cinemática que, ao serem exploradas, auxiliavam os alunos a compreenderem as

relações entre as características físicas dos movimentos e suas respectivas representações matemáticas (tabelas, gráficos e funções).

Durante o mestrado em Educação, realizado entre 2007 e 2009 no Programa de Pós-Graduação em Educação (PPGE) da Universidade Federal de Alagoas, desenvolvi uma dissertação na qual investiguei o uso de atividades de modelagem computacional para o ensino de Física e Matemática em uma perspectiva integradora, aplicada a turmas do 1º ano do Ensino Médio de uma escola pública (Gomes dos Santos, 2009). Nesse trabalho, a visão de ciência racional-dedutiva, baseada na ideia de Galileu Galilei (1564 - 1642) de que “o grande livro da natureza está escrito em caracteres matemáticos”, é substituída por uma perspectiva construtivista, segundo a qual “a ciência é uma construção de modelos explicativos para a realidade e não uma representação da própria realidade” (Chauí, 2002, p. 252). Nessa proposta, a matemática assume o papel de estruturante do conhecimento físico (Pietrocola, 2002), e a estratégia de ensino baseada em modelos computacionais explorava esse aspecto multidisciplinar, no qual os significados são construídos a partir das relações entre os conceitos físicos e matemáticos.

Em 26 de janeiro de 2010, tomei posse como professor do magistério superior na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), lotado no Centro de Educação (CEDU), para atuar nas disciplinas dos cursos de licenciatura em Pedagogia e em Física. No curso de Pedagogia, passei a ministrar a disciplina *Saberes e Didática do Ensino de Ciências* e, na licenciatura em Física, assumi turmas de *Estágio Supervisionado em Ensino de Física*. Embora representassem contextos distintos de formação docente, essa experiência se revelou uma excelente oportunidade (e uma necessidade) para ampliar minha concepção sobre o ensino de ciências, e porque não dizer, também sobre a ciência.

Não fazia qualquer sentido para mim que eu viesse a adotar ideias sobre o ensino de ciências que fossem radicalmente¹ diferentes para o ensino nos Anos Iniciais e para o Ensino Médio, ou até mesmo para o nível superior. A experiência de aprender sobre os fenômenos naturais, sobre a realidade, quando visto sob a perspectiva de um processo de conceitualização, significa que, durante os anos de

¹ O sentido em que aqui emprestamos à palavra **radicalmente** é o de ir à raiz dos conceitos envolvidos e não a algo ligado a extremismos. Em outras palavras, repudiamos a postura extremista, justamente pelo fato desta não ser compatível com a **radicalidade** no sentido mais alvissareiro do termo.

escolaridade e para toda a vida, na medida em que temos novas experiências, os conceitos são recorrentemente ressignificados (Vergnaud, 1993). Assim, ensinar em qualquer nível ou etapa da escolarização significa prover situações de ensino que possibilitem tanto o processo de construção de significados quanto o de ressignificados.

Na prática, passei a explorar com os futuros professores e professoras, em sala de aula, estratégias de ensino que segundo a literatura fossem compatíveis com o ensino nos dois níveis de escolaridade e tivessem sido amplamente investigadas, tanto para o ensino quanto para a formação de professores, tais como: Ensino de Ciências por Investigação (Sasseron; Carvalho, 2011; Brito; Fireman, 2016; Carvalho, 2018; Bahia; Moura; Fireman, 2024) e Ensino baseado em Modelos e Modelagem (Justi; Gilbert, 2002; Matthews, 2007; Baumfalk *et al.*, 2019; Hung; Tsai; 2020; Bachtiar; Meulenbroeks; Van Joolingen, 2021).

Assim, ao longo das aulas, foi possível constatar que essas estratégias de ensino (baseadas em modelagem científica e ensino por investigação), além de favorecerem a construção e a ressignificação de conceitos científicos pelos estudantes, encontram-se em consonância com as orientações da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para as etapas do Ensino Fundamental e do Ensino Médio. Ademais, tais estratégias se configuraram como alternativas didáticas relevantes ao ensino experimental tradicional, que por um longo período ocupou posição central nas práticas de ensino de Ciências. Embora o trabalho experimental seja frequentemente associado à ideia de inovação pedagógica, Amaral (1998) aponta que, quando desenvolvido de forma acrítica e meramente procedural, ele não apresenta resultados superiores aos do ensino tradicional, especialmente no que se refere ao desenvolvimento do pensamento lógico.

Dessa experiência, ficou claro que um modelo de ensino que provesse a construção de significados e/ou ressignificados, e que fosse compatível com os diversos níveis de ensino teria que ser um ensino sobre a ciência. Ou seja, o foco não poderia ser apenas sobre os conteúdos da ciência, como conceitos, modelos, procedimentos e teorias, deveria, também, buscar uma compreensão sobre como funciona a ciência, como o conhecimento científico é produzido, validado e comunicado etc. (Martins, 2015). Na literatura, o ensino sobre a ciência é denominado como ensino sobre a Natureza da Ciência (NdC).

Segundo Moura (2014), a Natureza da Ciência é

entendida como um conjunto de elementos que tratam da construção, estabelecimento e organização do conhecimento científico. Isto pode abranger desde questões internas, tais como método científico e relação entre experimento e teoria, até outras externas, como a influência de elementos sociais, culturais, religiosos e políticos na aceitação ou rejeição de ideias científicas (Moura, 2014, p.32).

O modelo de ensino de Ciências que orientava nossas práticas e discussões em sala de aula, fundamentado nas abordagens de modelagem científica e no ensino de Ciências por investigação, contribuiu de forma significativa para a construção de conceitos e para a desconstrução da ideia de que a ciência é resultado da aplicação de um método científico linear, universal e composto por etapas rígidas. Ao enfatizar práticas epistêmicas como a elaboração, o teste, a revisão e a validação de explicações e modelos, esse modelo didático favoreceu uma compreensão mais ampla e processual da atividade científica. No entanto, ao analisarmos os significados mobilizados nessas práticas, percebíamos que tal abordagem se alinhava predominantemente aos aspectos internos da ciência, privilegiando discussões de natureza epistemológica e metodológica. Questões relacionadas às influências sociais, culturais, políticas e religiosas na produção e evolução do conhecimento científico, não eram contempladas de forma sistemática.

A busca por um referencial teórico-metodológico que acomodasse a ideia sobre as potencialidades providas pela conexão entre disciplinas, como forma de construir significados, e um ensino que contemple discussões autênticas sobre o fazer científico, me motivaram ao ingresso no doutorado, o que ocorreu no segundo semestre de 2021, durante a fase final da Pandemia de SARS-COV 2, no Programa de Pós-Graduação em Ensino da Rede Nordeste de Ensino (RENOEN), no Centro de Educação da Universidade Federal de Alagoas, na linha de pesquisa Práticas Pedagógicas no Ensino de Ciências e Matemática.

2 SOBRE O ENSINO DE CIÊNCIAS

O objetivo da Ciência é apreender a realidade² por meio de sua conceitualização e o objetivo do ensino é possibilitar a aprendizagem desse conhecimento pelos alunos. E esse ensino não deve ser apenas sobre os produtos da ciência, que são os modelos, leis e teorias, mas também deve ser sobre os processos de construção desse conhecimento, algo que está diretamente relacionado ao ensino sobre a Natureza da Ciência (Moura; Guerra, 2016; Costa; Batista; 2017). No entanto, colocados em perspectiva histórica, ciência e ensino de ciências apresentam resultados opostos no que diz respeito ao enfrentamento de crises.

A título de exemplo, podemos citar a pandemia de Covid-19, ocorrida entre os anos de 2020 e 2021. Poucos meses após a identificação do vírus SARS-CoV-2, ao redor do mundo e inclusive no Brasil, vários grupos de pesquisas anunciam descobertas sobre a natureza genética desse vírus, o que contribuiu para aceleração na produção de imunizantes com resultados satisfatórios em testes clínicos.

Resultados que reafirmavam o importante papel da ciência para o enfrentamento de problemas. Por outro lado, as notícias veiculadas na mídia tradicional e o conteúdo das mensagens em redes sociais, apontavam e apontam para o total desconhecimento da maioria da população, independente do grau de instrução, sobre como o conhecimento científico é construído e evolui, tornando-os disseminadores, conscientes ou não, do vírus da falsa informação (*Fake News*), escancarando a necessidade de um ensino de ciências que consiga ir além da mera apresentação de fatos, mas que celebrem uma concepção de ciência e uma concepção de ensino, enquanto ambas, manifestações legítimas e genuínas da cultura humana, na sua inteireza e na sua necessária complexidade (Gomes dos Santos; Bastos Filho, 2025).

² Como a apreensão da realidade, não é um objeto exclusivo da ciência, na medida em que também a arte e a filosofia têm, ambas, como objetivo, e cada uma a seu próprio modo, a apreensão da realidade, então é interessante que aqui indiquemos, ainda que grosso modo, uma concepção acerca do que seja ciência. Segundo Popper, as declarações da ciência devem necessariamente ser passíveis de serem contraditas. A refutabilidade é, pois, uma característica fundamental da ciência, razão pela qual o método da ciência, segundo Popper, os popperianos entre outros, é o das conjecturas e refutações. Deste modo, declarações irrefutáveis não devem pertencer ao universo de discurso da ciência.

O cenário pandêmico, quando observado do ponto de vista da educação científica, em termos de seus objetivos, reforça que professores e pesquisadores da área possuem um grande desafio, que constitui em unir esforços no sentido de contribuir para alfabetizar cientificamente a população brasileira. Ou seja, juntamente com o poder público fomentar “um ensino de Ciências preocupado com a formação cidadã dos alunos para ação e atuação em sociedade” (Sasseron; Carvalho; 2011, p. 59-60).

Porém, para que objetivos perseguidos para a consecução da alfabetização científica sejam alcançados, Reid e Hodson (1993) apresentaram um conjunto de práticas que são citadas no livro *A necessária renovação do ensino das Ciências* por Cachapuz *et al.* (2011):

conhecimentos da ciência – certos fatos, conceitos e teorias; aplicação do conhecimento científico – a utilização de tal conhecimento em situações reais e simuladas; saberes e técnicas da ciência – familiarização com os procedimentos da ciência e utilização de aparelhos e instrumentos; resolução de problemas – aplicação de saberes, técnicas e conhecimentos científicos a investigações reais; interação com a tecnologia – resolução de problemas práticos, enfatização científica, econômica e social e aspectos utilitários das soluções possíveis; questões sócio-econômico-políticos e ético-morais na ciência e na tecnologia; história e desenvolvimento da ciência e tecnologia e; estudo da natureza da ciência e a prática científica – considerações filosóficas e sociológicas centradas nos métodos científicos, o papel e estatuto da teoria científica e as atividades da comunidade científica (Cachapuz *et al.*, 2011, p. 20).

A visão da Física como um conjunto de fórmulas prontas e acabadas, que exigem habilidades matemáticas para serem resolvidas, com pouca ou nenhuma utilidade para descrever e explicar os problemas cotidianos é predominante entre os estudantes do ensino médio e superior. Essa visão, que também é compartilhada pelos professores, ao mesmo tempo que impacta negativamente o ensino de Física também é retroalimentada por eles. Isso porque os professores, quase sempre, ensinam como aprenderam. O ensino excessivamente formal com o qual os professores abordam os conteúdos e a resolução de situações-problemas idealizadas, reforçam a ideia de que o conhecimento físico não se aplica a problemas reais (Brandão, 2012).

O conhecimento científico é de dois tipos: i) factual, que consiste em teorias, leis, modelos e resultados de análises de dados empíricos e ii) processual, que consiste em estratégias, técnicas e táticas para desenvolver, validar e utilizar o

conhecimento factual (Hestenes, 1987). Ao tratar apenas da operacionalização e memorização dos fatos científicos, como teorias e modelos matemáticos, o ensino de ciências não permite a possibilidade de discussões autênticas sobre a Natureza da Ciência, pois esta tem relação com os conhecimentos de tipo processuais. Halloun e Hestenes (1987), chamam a abordagem de aprendizagem de Física convencional, de abordagem “centrada na Fórmula”. A aprendizagem dos conteúdos ocorre por repetição. Quanto maior o número e a variedade de exercícios forem respondidos pelo estudante, maiores são as chances de notas altas nos exames, que usam questões semelhantes às encontradas em livros didáticos e amplamente usadas pelos alunos. Em outras palavras, aprender física se resumiria a decorar uma grande quantidade de fórmulas matemáticas, sendo estas escolhidas em função das variáveis cujos valores são apresentados nas questões e aquelas que são pedidas para que sejam encontradas³.

Um ensino restrito à resolução de exercícios fechados, com foco nas fórmulas e sem qualquer relação com problemas reais do cotidiano contribui para que os estudantes tenham uma percepção de que a Física ensinada na escola não se aplica à realidade (objetos concretos), mas apenas às situações teóricas. Ou seja, o ensino de física, amplamente apresentado aos estudantes de nível médio e superior, além de não promover efetivamente a aprendizagem dos conteúdos, deixa a impressão de que o conhecimento estudado em sala não pode ser empregado na resolução de problemas do cotidiano, aumentando a distância entre a realidade vivenciada pelos alunos e o conteúdo teórico.

Para promover um ensino que possibilite um aprendizado integral dos conteúdos científicos, se faz necessário uma teoria para fundamentar as mudanças de abordagem de ensino centrado nas fórmulas, para abordagem centrada em modelos (Hestenes, 1987; Halloun; Hestenes, 1987). Essa mudança é fortemente orientada pela Teoria de Modelagem, que é uma teoria geral do conhecimento

³ Para darmos um exemplo bastante simples de como a abordagem centrada em modelos matemáticos é do ponto de vista da compreensão dos fenômenos bastante superior à abordagem meramente centrada e restrita à fórmula, é a que consiste, em se tratando do ensino da cinemática, em se constatar que se o estudante vier a adotar a compreensão do significado precípua da geometria analítica, da compreensão dos movimentos à luz da representação no plano cartesiano e do conceito de área, tal estudante dispensará para sempre o ônus de decorar fórmulas sem conhecimento de causa de seus respectivos significados.

processual na ciência. Modelagem é um processo cognitivo de aplicação dos princípios de *design* de uma teoria para produzir um modelo de um objeto ou processo físico (Hestenes, 1987). Modelagem é uma competência cujo desenvolvimento também facilita o aprendizado dos conceitos científicos, processos metodológicos e o desenvolvimento e uma consciência sobre a Natureza da Ciência (Nicolaou; Constantinou, 2014). Nas últimas três décadas, desde a publicação do trabalho de David Hestenes (Hestenes, 1987), os resultados de diversas pesquisas têm corroborado as contribuições de abordagens de ensino baseadas em modelagem para a aprendizagem de conceitos científicos, resolução de problemas, construção de concepções e competências sobre a natureza do conhecimento científico (Justi; Gilbert, 2002; Brandão, 2012; Heidemann, 2015; Oliveira, 2018).

No entanto, as estratégias de ensino baseadas em modelagem científica, por se constituírem na construção e validação de modelos, exploram com mais frequência os aspectos internos⁴ da Natureza da Ciência.

Os trabalhos de pesquisa que investigam o uso de estratégias de modelagem no ensino de Física costumam adotar as ideias de modelagem científica oriundas do realismo científico do físico e epistemólogo argentino Mario Bunge (Brandão, 2012; Heidemann, 2015; Oliveira, 2018) com o objetivo de possibilitar maior compreensão dos alunos sobre a relação entre teoria e realidade. Nessa perspectiva, os alunos se envolvem na construção de modelos, sendo estes a interface entre a teoria científica e os elementos da realidade. Para o realismo científico, a realidade independe na nossa percepção sensorial, que para ser apreendida necessita de teorias. O processo de apreensão da realidade começa pela esquematização dos elementos sensíveis (percebido pelos sentidos) de um objeto ou situação assumida como tal. O produto da esquematização são os objetos-modelo (ou modelos conceituais). O comportamento deste modelo deve ser explicado a partir de elementos de uma teoria, resultando em

⁴ Rigorosamente, em qualquer atividade humana há necessariamente a intervenção tanto de aspectos internos quanto de aspectos externos. Quando falamos de aspectos internos, devemos nos referir mais precisamente a aspectos que podem ser considerados em algum grau de aproximação com aquilo que diz respeito, por decisão dos estudiosos que nem sempre estão em acordo entre si, aos desenvolvimentos mais preponderantemente conceituais das teorias intervenientes. Os aspectos de desenvolvimento científico que são preponderantemente inscritos nas dimensões histórica, cultural e socioeconômica devem necessariamente ser contrapostos a uma abordagem preponderantemente interna, pois esse confronto é enriquecedor, além de necessário. O ensino de ciências por conter ambas as dimensões, interna e externa, deve contemplá-las e este é mais uma característica da inerente complexidade dos estudos sobre a Natureza da Ciência.

modelos teóricos (ou teorias específicas) (Bunge, 1974). Em sala de aula, os professores podem usar situações de ensino nas quais os alunos exploram ou constroem modelos.

Na discussão precedente, optamos por focalizar o ensino de Física, por se tratar, historicamente, de uma das disciplinas que apresenta maiores desafios no âmbito das ciências naturais. Contudo, sustentamos que as questões e problematizações levantadas não se restringem a esse campo específico, sendo igualmente pertinentes ao ensino de Biologia e de Química.

Em seu artigo seminal, história, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação, publicado no Brasil em 1995 pelo Caderno Catarinense de Ensino de Física (Matthews, 1995)⁵, Matthews apresentou argumentos a favor da inserção de aspectos da história e filosofia da ciência no ensino de ciências e em cursos de formação de professores. Para o autor, os usos da história e da filosofia da ciência,

[...] podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral da matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do “mar de falta de significação” que se diz ter inundado as salas de aulas de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam (Matthews, 1995, p. 165).

Segundo Martins (2007), a aproximação entre História e Filosofia da Ciência que foram identificadas por Matthews (1995), tornou-se uma tendência.

Ao longo das últimas décadas, a pesquisa em ensino de ciências tem evidenciado a relevância do papel desempenhado pela HFC no ensino e aprendizagem das ciências. Há um número grande de artigos publicados em revistas especializadas da área que, nos eventos e congressos, destina espaços específicos para essa temática (Martins, 2007, p. 114).

As informações apresentadas até aqui nos permitem destacar dois pressupostos que devem ser considerados neste trabalho de tese e em qualquer atividade de elaboração de propostas e de prática de ensino de ciências, em geral, e para o ensino de Física, em particular, que tenham como objetivos de aprendizagem

⁵ Originalmente, o artigo foi publicado em inglês (MATTHEWS, M. R. History, philosophy, and science teaching: the present rapprochement. **Science & Education**, v. 1, n. 1, p. 11-47, 1992. DOI: 10.1007/BF00430208.)

ampliar as concepções dos estudantes sobre a Natureza da Ciência: i) considerar ideias da filosofia e epistemologia da ciência sobre a realidade e o processo de apreensão dessa realidade por meio da construção de modelos; e, ii) considerar informações obtidas da história e da filosofia da ciência, com o propósito de compreender o progresso científico (Matthews, 1995).

Silva, Teixeira e Penido (2018) realizaram uma revisão da literatura com o objetivo de analisar propostas didáticas para o ensino de Física orientadas por abordagens históricas em dissertações e teses. Os resultados identificaram que em 70% dos trabalhos, os textos históricos tinham sido elaborados pelos próprios autores; em 25% dos trabalhos, autores utilizaram textos escritos por especialistas, historiadores da ciência ou publicados por especialistas em ensino de ciências que trabalham com história da ciência no ensino de Física. Em 5% dos trabalhos, os textos que acompanharam as sequências de ensino não foram especificados. Quanto ao processo de elaboração dos textos usados nas estratégias de ensino, Silva, Teixeira e Penido (2018) não informaram se estes foram construídos segundo uma estrutura que poderia ser aplicada por professores para a construção de seus próprios textos de história da ciência, por exemplo; apenas esclarecem que no processo foram usadas fontes primárias e secundárias.

A partir da análise do *corpus* da pesquisa de Silva, Teixeira e Penido (2018) e uma busca mais ampla na base de dados *Scielo Brasil*, localizamos os trabalhos de Silva (2008), Silva; Nardi e Laburu (2008, 2010) e Silva; Laburú e Nardi (2012). Estes autores investigaram as contribuições de Reconstruções Racionais Didáticas inspiradas em Lakatos sobre episódios relacionados às controvérsias entre as teorias do calórico e cinético molecular para o desenvolvimento do conceito de calor e de concepções mais aceitáveis sobre Natureza da Ciência pelos alunos. As Reconstruções Racionais Didáticas são textos não-históricos produzidos pelos autores para finalidades didáticas, mas que são constituídos a partir de informações históricas (Silva, 2008).

Além de apresentar os motivos pelos quais as reconstruções racionais didáticas podem contribuir para o ensino de conceitos científicos e sobre a Natureza da Ciência, Silva (2008) dedica uma subseção do seu trabalho de tese para apresentar o processo de elaboração de uma Reconstrução Racional Didática sobre o episódio da história da ciência que envolveu a evolução das teorias do calórico e cinético molecular. Seu

trabalho teve como objetivo investigar quais seriam as contribuições da reconstrução para auxiliar os alunos em debates racionais sobre teorias controversas. Tais considerações funcionam como um conjunto de pressupostos que devem ser adotados pelo professor ou pesquisador da área de ensino de ciências que pretende elaborar textos de história da ciência. Estes textos não têm como ambição a reconstrução da história real, por isso, podem ser considerados como uma história distorcida da ciência.

Silva; Nardi e Laburú (2008) denominam Reconstrução Racional Didática, como sendo,

uma estrutura pedagógica embasada no uso da História e Filosofia da Ciência como um ponto de partida para desenvolver e projetar soluções didáticas satisfatórias (Mäntylä e Koponen, 2007) que podem ser entendidas como reconstruções didáticas para auxiliar o ensino de conceitos científicos (Izquierdo-Aymerich e Adúriz-Bravo, 2003). Nesse sentido, embora essa RRD possa ser orientada pela HFC ao ser elaborada, é preciso dizer que essas bases são usadas como recursos, pois a intenção não é obter reconstruções históricas completamente autênticas (Silva; Nardi; Laburú, 2008, p. 205).

Para Silva (2008), construções como as reconstruções racionais fazem parte de textos não-históricos, sendo sua preocupação primária com o produto da história da ciência, não com o processo.

No entanto, a RRD pode vir a explorar, em determinado nível, alguns aspectos desse processo como: a geração de hipótese; a busca para a informação relevante; o projeto e a crítica das experiências; a elaboração de explicações alternativas; o esforço frente anomalias experimentais; a superação de uma teoria por uma rival. Tudo isso pelo reconhecimento de que há mais aspectos na ciência do que apenas o da justificação do resultado final ou na suposição do que está correto (Silva, 2008, p. 41).

3 QUESTÃO DE PESQUISA

No geral, toda e qualquer situação de ensino de ciências ou de qualquer outra disciplina visa a compreensão dos conteúdos. Espera-se que a informação apresentada passe a fazer parte da estrutura cognitiva dos alunos de maneira substantiva e não arbitrária⁶. No caso particular do ensino de física que aqui

⁶ Aprendizagem substantiva e não arbitrária, no âmbito da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, refere-se ao processo pelo qual novos conhecimentos são incorporados à estrutura cognitiva

discutimos mais especificamente, ao apresentar os modelos matemáticos e a partir deles buscar descrever e interpretar fenômenos da natureza; mesmo que apenas poucos alunos consigam compreender os conteúdos, alguns significados estão sendo construídos. Nesse caso, a matemática passa a ser um obstáculo, pois é como considerar que para compreender o conceito o aluno deve raciocinar exclusivamente a partir das relações matemáticas, o que faz deslocar o seu aprendizado dos conceitos científicos para o aprendizado matemático.

Em abordagens de ensino baseadas em modelagem também não há total garantia que todos os estudantes que se envolvem em tal prática, logrem um aprendizado rico de significados. Inclusive, uma crítica comum que se assemelha ao ensino focado em fórmulas, é que o aluno termina tendo que aprender um conjunto de conhecimentos para poder aprender outro conjunto de conhecimentos. Nesse caso, como a modelagem não é uma competência que todos os professores de física dominam, fica a dúvida se o tempo empregado em seu aprendizado e ensino, não seria melhor se empregado no ensino de matemática? No entanto, é importante destacar que tanto as competências matemáticas quanto as de modelagem científica, enquanto aspectos do conhecimento científico, perpassam todos os conteúdos e podem ser aplicados em outras disciplinas, o que justifica sobremaneira o tempo investido no planejamento e desenvolvimentos de atividades que visem o aprendizado de modelagem científica.

No entanto, abordagens de ensino que exploram as práticas ou as formas de fazer ciência, como as baseada em modelagem, permitem que mais elementos do processo de construção do conhecimento sejam apresentados e discutidos explicitamente durante as aulas, o que, naturalmente, enriquece o processo. São importantes para discussões sobre aspectos internos da história do conhecimento, que são associados aos métodos da ciência. A aprendizagem baseada em modelos e em modelagem têm sido amplamente empregada no ensino de ciências por possibilitar que os estudantes tenham contato com práticas autênticas do fazer científico Justi e Gilbert (2002).

do aprendiz por meio de relações conceituais claras, estáveis e logicamente fundamentadas com conhecimentos prévios relevantes (subsunções). (Moreira, 2006).

Na linha da abordagem histórica e filosófica de ensino de ciências citamos nas discussões acima as Reconstruções Racionais Didáticas, que consistem basicamente, na reconstrução da história de um episódio da ciência, porém, sob uma perspectiva epistemológica contemporânea. Estas se diferenciam das reconstruções históricas porque mesmo partindo de fatos históricos, não têm como objetivo o ensino da história, mas o ensino do conteúdo científico (Mäntylä e Koponen, 2007; Silva, 2008). Se analisadas segundo a lógica de que quanto mais contexto for inserido nas situações de ensino, maiores são as possibilidades de construção de significados; como estas abordagens permitem explorar os aspectos epistemológicos, históricos e sociais da produção de conhecimento; elas seriam uma excelente escolha para um ensino de ciências que possibilite a construção de significados e ressignificados.

De maneira geral, podemos derivar duas características comuns a partir das abordagens aqui apresentadas: i) apresentam uma visão de ciência; e ii) esta visão de ciência é tomada de forma análoga ao processo de aprendizagem. Expliquemos. No ensino focado em fórmulas, a ideia de ciência é que para ser científico, o conhecimento precisa ser expresso por meio de modelos matemáticos e, consequentemente, seu aprendizado implica em desenvolver habilidades relacionadas à operacionalização matemática. Na visão de ciência como modelos, muito associada ao filósofo da ciência Ronald Giere (Giere, 1992), os modelos são centrais na ciência e o desenvolvimento científico significa o desenvolvimento dos modelos. O papel do ensino seria então prover condições para que os alunos desenvolvam seus modelos mentais de forma que se aproximem cada vez mais dos modelos científicos aceitos (Izquiero-Aymerich; Aduriz-Bravo, 2003). Nas estratégias de ensino baseadas em reconstruções racionais didáticas, as situações de ensino são planejadas a partir da racionalização adotada. Silva (2008), por exemplo, construiu e avaliou uma estratégia de ensino inspirada na Metodologia dos Programas de Pesquisa de Imre Lakatos, na qual, os conhecimentos prévios dos alunos foram tomados como um programa alternativo ao programa de pesquisa da teoria cinética. Os conflitos cognitivos produzidos em sala foram tomados como análogos ao processo de competição entre teorias rivais.

No ensino de ciências, é recorrente a predominância de abordagens que reduzem a aprendizagem à memorização de conceitos e à aplicação de fórmulas. Esse modelo, centrado na transmissão de conteúdos prontos, tende a limitar a

compreensão da ciência como uma prática em constante construção, restringindo-a a um conjunto de resultados consolidados. Em contrapartida, diferentes propostas pedagógicas têm buscado aproximar o ensino escolar das formas de produção do conhecimento científico, destacando dimensões epistemológicas, históricas e sociais. Entre elas, ganha relevância o uso de episódios da história da ciência, que permitem revelar impasses, controvérsias e transformações pelas quais passaram as ideias científicas, oferecendo aos estudantes uma visão mais dinâmica e humana da atividade científica.

Ao serem trabalhados por meio de conexões conceituais multidisciplinares, esses episódios podem extrapolar os limites das disciplinas escolares, criando oportunidades para que os alunos construam significados que articulam diferentes áreas do conhecimento. Essa perspectiva favorece não apenas a aprendizagem de conceitos específicos, mas também a compreensão da ciência como prática cultural e intelectual, vinculada a métodos, valores e contextos sociais. Nesse cenário, emerge a necessidade de investigar em que medida a exploração de episódios históricos da ciência, apoiada em conexões conceituais multidisciplinares, pode enriquecer as concepções sobre a natureza do conhecimento científico e contribuir para a qualificação das práticas de ensino.

Diante do exposto, elaboramos a questão de pesquisa teórica que irá orientar este estudo:

De que modo a exploração de episódios da história da ciência, por meio do estabelecimento de conexões conceituais multidisciplinares, pode contribuir para a construção de compreensões sobre a natureza do conhecimento científico, que culmine em um ensino de ciências pleno de significados?

4 OBJETIVOS DO ESTUDO E TESE

Geral

Investigar como a integração entre os métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas, aplicada a episódios significativos da história da ciência, pode favorecer a construção de significados sobre a ciência, suas práticas e

seus modos de produção do conhecimento, contribuindo para um ensino de ciências mais crítico, interdisciplinar e culturalmente situado.

Específicos

- Analisar o potencial das conexões conceituais para prover um ensino de ciências multidisciplinar, capaz de articular diferentes áreas do conhecimento na confluência arte-ciência-filosofia, de modo a prover riqueza conceitual durante as aulas.
- Examinar os problemas epistemológicos relacionados à noção de espaço, suscitados pelo episódio de Eratóstenes, discutindo suas implicações para o ensino de ciências e para a formação do pensamento crítico e interdisciplinar.
- Investigar como a combinação dos métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas pode contribuir para o ensino da gravitação universal, superando a fragmentação cognitiva e promovendo a produção de significados.
- Discutir as contribuições das reconstruções racionais didáticas para o ensino de ciências voltado à compreensão da natureza da ciência, de suas categorias conceituais e processos mentais, evitando concepções distorcidas e favorecendo uma aprendizagem reflexiva e contextualizada.

Tese

Defende-se que a integração entre os métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas constitui um caminho fecundo para o ensino de Ciências, na medida em que possibilita articular, de forma sistemática, dimensões históricas, epistemológicas e cognitivas envolvidas na construção do conhecimento científico. Em consonância com os argumentos apresentados por Matthews (1995, 2007), essa articulação contribui para superar abordagens reducionistas e descontextualizadas do ensino, frequentemente marcadas pela apresentação acrítica de conceitos, fórmulas e teorias. Ao incorporar episódios históricos rationalmente reconstruídos e conectá-los a redes conceituais interdisciplinares, essa abordagem favorece a produção de significados, o desenvolvimento do pensamento crítico e a

explicitação da ciência como uma prática humana, histórica, social e culturalmente situada. Dessa forma, promove-se uma compreensão mais integral da atividade científica, alinhada a uma perspectiva reflexiva de formação científica, com potencial para qualificar o ensino de ciências nos diversos níveis de escolaridade.

5 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

Segundo a perspectiva metodológica, esse estudo é classificado como uma estudo teórico, distinguindo-se, principalmente, por não estarem diretamente vinculados à coleta de dados empíricos, mas por se dedicarem à análise, sistematização e integração de conceitos, modelos e referenciais já existentes. Segundo Demo (2000), sua principal contribuição consiste em “construir quadros de inteligibilidade” que permitam organizar e aprofundar a compreensão sobre determinado fenômeno. Nesse sentido, como destacam Gil (2017) e Severino (2016), trata-se de uma investigação de caráter analítico e reflexivo, que busca fundamentar novas perspectivas a partir da crítica e do diálogo com a literatura consolidada. Além disso, para Lüdke e André (2013), a pesquisa teórica não deve ser confundida com mera revisão bibliográfica, uma vez que seu objetivo não é apenas reunir informações, mas produzir novos olhares e categorias explicativas. Assim, ao operar na fronteira entre a sistematização conceitual e a proposição de modelos interpretativos, esse tipo de estudo contribui para o avanço do campo científico ao propor sínteses originais sobre problemas de investigação.

Como o objetivo deste trabalho é explorar as conexões conceituais na confluência de múltiplas disciplinas como método para prover um ensino de ciências rico de significados a partir da análise de episódios da história da ciência, o que se configurou na aplicação do método das conexões conceituais e do método das reconstruções racionais didáticas em situações variadas, resultando em estudos diversos e independentes, optamos por organizar o texto no formato *Multipaper* e não numa estrutura monográfica.

Um formato monográfico ou tradicional é o texto acadêmico predominante para a apresentação de dissertações e teses. Ele caracteriza-se por um texto extenso, por capítulos estruturados segundo uma organização hierárquica das informações: introdução, revisão da literatura, referenciais teóricos, metodologia, resultados e

discussões e considerações finais. O formato *Multipaper*, é conhecido por tese em formato de artigos ou por compêndio de artigos (Lima *et al.*, 2024). Para Mutti e Klüber (2018, p. 3), “o formato *Multipaper*, por sua vez, refere-se à apresentação de uma dissertação ou tese como uma coletânea de artigos publicáveis, acompanhados, ou não, de um capítulo introdutório e de considerações finais”.

Barbosa (2015) destaca que o aumento na adoção do formato *Multipaper* é por possibilitar uma maneira mais rápida para que os pós-graduandos compartilhem suas investigações à comunidade científica antes mesmo do processo de finalização de sua tese ou dissertação.

Além disso, do ponto de vista do acadêmico (discente de mestrado ou doutorado), essa modalidade pode auxiliar em uma sistematização do seu trabalho de pesquisa e trajetória acadêmica, assim como cumprir requisitos dos programas de pós-graduação das universidades, que tradicionalmente cobram certo número de publicações para que esse aluno possa defender sua dissertação ou tese (Horta; Santos, 2016 *apud* Paz *et al.*, 2025, p. 114).

Tendo como referência o formato *Multipaper*, esta tese está organizada em quatro capítulos/artigos independentes entre si, uma introdução e considerações finais. A introdução contém o contexto da pesquisa, problema, objetivos, sendo gerais para todo o texto e Considerações finais onde será discutido os principais resultados, também sendo geral para todo o texto. Cada capítulo/artigo, foi organizado segundo estudos teóricos independentes, mas sobre o mesmo objeto de estudo. Quanto à estrutura, os capítulos/artigos seguem o padrão de artigos científicos: introdução; desenvolvimento e considerações finais (Mutti; Klüber, 2018).

O capítulo 1/ Artigo 1, intitulado **CONEXÕES PARA UM ENSINO DE CIÊNCIAS MULTIDISCIPLINAR A PARTIR DO SEMINAL FEITO DE ERATÓSTENES**, constitui a primeira aproximação do método das conexões conceituais proposto nesse estudo com o ensino de ciências por meio da exploração de múltiplas pontes de significados com potencial para prover um ensino com riqueza conceitual. Uma versão deste artigo foi publicada na **Revista Ensino em Debate (REDE)** em agosto de 2025.

No capítulo 2/ Artigo 2, intitulado **A NATUREZA DO ESPAÇO: ALGUNS PROBLEMAS EPISTEMOLÓGICOS SUSCITADOS PELO SEMINAL EPISÓDIO DE ERATÓSTENES**, analisamos o episódio da medição do raio da Terra por Eratóstenes como ponto de partida para discutir concepções filosóficas e epistemológicas de espaço, articulando ciência, filosofia e educação. Defendemos que o confronto entre

visões distintas enriquece o ensino de Ciências, promovendo conexões interdisciplinares, pensamento crítico e produção de significados. Uma versão desse artigo foi publicada no **Cadernos Pedagógico** em junho de 2025.

O capítulo 3/ Artigo 3, intitulado **O ENSINO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL À LUZ DOS MÉTODOS COMBINADOS DAS CONEXÕES CONCEITUAIS E DAS RECONSTRUÇÕES RACIONAIS DIDÁTICAS**, argumentamos que o ensino de ciências, especialmente da gravitação universal, deve integrar os métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas para superar a fragmentação cognitiva e favorecer a produção de significados. Defendemos que a compreensão da ciência como processo histórico, complexo e em constante reconstrução permite um ensino mais crítico, criativo e contextualizado. Esse artigo encontra-se em processo de elaboração para ser submetido a um periódico da área.

O capítulo 4/ Artigo 4, intitulado **DISCUSSÕES SOBRE O ENSINO DE CIÊNCIAS SUSCITADAS A PARTIR DA TEORIA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL: CATEGORIAS CONCEITUAIS, NATUREZA DA CIÊNCIA E PROCESSOS MENTAIS**, defendemos que o ensino de ciências deve ir além da simples exposição dos produtos científicos, como fórmulas e leis, e privilegiar a compreensão dos processos históricos, epistemológicos e cognitivos envolvidos na construção do conhecimento. A partir do episódio da gravitação universal de Newton, argumentamos pela importância das reconstruções racionais didáticas, inspiradas em Lakatos, como estratégias que favorecem a reflexão sobre a natureza da ciência, evitando visões distorcidas (como o empirismo ingênuo e o mito do “gênio solitário”). Também propomos que o ensino valorize as categorias conceituais, os processos mentais e o contexto histórico e filosófico que deram origem às teorias científicas, promovendo uma formação mais crítica e significativa dos alunos.

Nas considerações finais, será apresentada uma síntese integradora dos principais resultados teóricos oriundos dos estudos (capítulos/artigos) que compõem esta tese, de modo a evidenciar as convergências, complementaridades e contribuições do conjunto dos trabalhos. A partir dessa síntese, busca-se explicitar de forma articulada a relação entre os resultados obtidos, a questão de pesquisa e os objetivos propostos, bem como destacar as implicações teóricas do estudo e suas contribuições para o campo do Ensino de Ciências.

6 REFERÊNCIAS

- AMARAL, I. A. Currículo de ciências: das tendências clássicas aos movimentos atuais de renovação. In: BARRETO, E. S. S. (org.). **Os currículos do ensino fundamental para as escolas brasileiras**. Campinas: Autores Associados; São Paulo: Fundação Carlos Chagas, 1998. p. 201–232.
- ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. Atividades de modelagem computacional no auxílio à interpretação de gráficos da Cinemática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 179–184, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/YNVq5wp56jykJy4SSwVv75d/?lang=pt>. Acesso em: 14 maio. 2025.
- BACHTIAR, R. W.; MEULENBROEKS, R. F. G.; VAN JOOLINGEN, W. R. Stimulating mechanistic reasoning in physics using student-constructed stop-motion animations. **Journal of Science Education and Technology**, v. 30, p. 777–790, dez. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10956-021-09918-z>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- BAHIA, M. P. R.; MOURA, A. R. M.; FIREMAN, E. C. A alfabetização científica nos anos iniciais do ensino fundamental: um olhar a partir da formação de professores ao desenvolverem o ensino por investigação com um conteúdo de química. **Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista – ENCITEC**, v. 14, n. 2, p. 04-23, 13 maio 2024. Disponível em: <https://san.uri.br/revistas/index.php/encitec/article/view/805>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- BARBOSA, J. C. Formatos insubordinados de dissertações e teses na Educação Matemática. In: D`AMBRÓSIO, B. S.; LOPES, C. E. (org.). **Vertentes da subversão na produção científica em Educação Matemática**. Coleção Insubordinação Criativa. Campinas: Mercado das Letras, 2015. p. 347-367.
- BAUMFALK, B.; BHATTACHARYA, D.; VO, T.; FORBES, C.; ZANGORI, L.; SCHWARZ, C. Impact of model-based science curriculum and instruction on elementary students' explanations for the hydrosphere. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 56, n. 5, p. 570–597, maio 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tea.21514>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- BRANDÃO, R. V. **A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no Ensino de Física**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- BRITO, L. O.; FIREMAN, E. C. Ensino de ciências por investigação: uma estratégia pedagógica para promoção da alfabetização científica nos primeiros anos do Ensino Fundamental. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências – EPEC**, Belo Horizonte, v. 18, n. 1, p. 123–146, jan./abr. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/mhnc5kG5WVLGNZMsBwwVbBJ/?lang=pt>. Acesso em: 23 mar. 2025.

BUNGE, M. **Teoria e Realidade**. Tradução: Gita K. Guinsburg. São Paulo: Editora Perspectiva, 1974.

CACHAPUZ, A.; GIL-PÉREZ, D.; CARVALHO, A. M. P. de; PRAIA, J.; VILCHES, A. **A necessária renovação do ensino das Ciências**. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

CARVALHO, A. M. P. Fundamentos teóricos e metodológicos do ensino por investigação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 18, n. 3, p. 765–794, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4852>. Acesso em: 17 jun. 2023.

CHAUI, M. **Convite à filosofia**. 12. ed. São Paulo: Ática, 2002.

COSTA, M.; BATISTA, I. L. Noções de alunos do Ensino Médio a respeito da estrutura da matéria: investigação de uma abordagem histórico-didática para o ensino de física de partículas. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, Tandil, v. 12, n. 2, p. 1 – 23, dez. 2017. Disponível em: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-66662017000200004&lng=. Acesso em: 26 jun. 2024.

DEMO, P. **Pesquisa e construção do conhecimento**: metodologia científica no caminho de Habermas. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 2000.

FINKEL, D. **Teaching with your mouth shut**. Portsmouth, NH: Boynton/Cook Publishers, 1999.

GIERE, R. Cognitive models of science. In: GIERE, R. (ed.). **Cognitive models of science**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992. p. 1–18.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOMES DOS SANTOS, J. R. **Investigação do uso de atividades de modelagem computacional no ensino de física e de matemática**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado em Educação Brasileira) - Centro de Educação, Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

GOMES DOS SANTOS, J. R.; BASTOS FILHO, J. B. Conexões para um ensino de ciências multidisciplinar a partir do seminal feito de Eratóstenes. **Revista Ensino em Debate**, Fortaleza, v. 5, p. e2025032, 2025. Disponível em: <https://revistarede.ifce.edu.br/ojs/index.php/rede/article/view/149>. Acesso em: 20 ago. 2025.

HALLOUN, I. A.; HESTENES, D. Modeling instruction in mechanics. **American Journal of Physics**, Melville, NY, v. 55, n. 5, p. 455–462, maio 1987. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-abstract/55/5/455/1038681/Modeling-instruction-in-mechanics?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 02 set. 2023.

HEIDEMANN, L. A. **Ressignificação das atividades experimentais no ensino de física por meio do enfoque no processo de modelagem científica.** 2015. 298 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HESTENES, D. Toward a modeling theory of physics instruction. **American Journal of Physics**, Melville, NY, v. 55, n. 5, p. 440–454, maio 1987. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-abstract/55/5/440/1038654/Toward-a-modeling-theory-of-physics-instruction?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 02 set. 2023.

HORTA, H.; SANTOS, J. M. The impact of publishing during PhD studies on career research publication, visibility, and collaborations. **Research in Higher Education**, v. 57, n. 1, p. 28–50, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11162-015-9380-0>. Acesso em: 06 jun. 2025.

HUNG, J.-F.; TSAI, C.-Y. The effects of a virtual laboratory and meta-cognitive scaffolding on students' data modeling competences. **Journal of Baltic Science Education**, Šiauliai, v. 19, n. 6, p. 923–939, dez. 2020. Disponível em: https://www.scientiasocialis.lt/jbse/files/pdf/vol19/923-939.Hung_JBSE_Vol.19_No.6.pdf. Acesso em: 15 ago. 2023.

IZQUIERDO-AYMERICH, M.; ADÚRIZ-BRAVO, A. Epistemological foundations of school science. **Science & Education**, Dordrecht, v. 12, p. 27–43, jan. 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022698205904>. Acesso em: 02 maio 2025.

JUSTI, R. S.; GILBERT, J. K. Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 4, p. 369-387, apr. 2002. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500690110110142>. Acesso em: 15 jan. 2025.

LIMA, P. V. P.; SANTOS, K. V. G.; MOURA, E. M. B.; MOREIRA, G. E. *Multipaper*: um formato insubordinado na perspectiva de pós-graduandos na área da Educação Matemática. **Ensino da Matemática em Debate**, [S. I.], v. 11, n. 3, p. 33–57, apr. 2024. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/emd/article/view/65519>. Acesso em: 24 ago. 2025.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em educação**: abordagens qualitativas. 2. ed. Rio de Janeiro: EPU, 2013.

MÄNTYLÄ, T.; KOPONEN, I. T. Understanding the role of measurements in creating physical quantities: a case study of learning to quantify temperature in physics teacher education. **Science & Education**, v. 16, n. 3, p. 291-311, mar. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227088898_Understanding_the_Role_of_Measurements_in_Creating_Physical_Quantities_A_Case_Study_of_Learning_to_Quantify_Temperature_in_Physics_Teacher_Education. Acesso em: 11 nov. 2023.

MARTINS, A. F. P. História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24, n.1, p.112-131, abr. 2007. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6056>. Acesso em: 14 dez. 2025.

MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 703–737, 12 maio 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2015v32n3p703>. Acesso em: 05 jan. 2024.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, jan. 1995. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7084>. Acesso em: 24 fev. 2023.

MATTHEWS, M. R. Models in science and in science education: an introduction. **Science & Education**, v. 16, p. 647–652, 1 ago. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11191-007-9089-3>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MOREIRA, M. A. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora da UnB, 2006.

MOREIRA, M. A. Ensino de Física no século XXI: desafios e equívocos. **Revista do Professor de Física**, [S. I.], v. 2, n. 3, p. 80–94, dez. 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/19959>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 1, p. 32-46, jan./jun. 2014. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/237>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MOURA, C. B; GUERRA, A. Reflexões sobre o processo de construção da ciência na disciplina de química: um estudo de caso a partir da história dos modelos atômicos. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, v. 11, n. 2, p. 64–78, dez. 2016. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273349183006>. Acesso em: 14 jul. 2025.

MUTTI, G.S.L.; KLÜBER, T.E. Formato *multipaper* nos programas de pós-graduação stricto sensu brasileiros das áreas de educação e ensino: um panorama. In: **SIPEQ – V Seminário Internacional de Pesquisa e Estudos Qualitativos**. 2018, Foz do Iguaçu/PR. Disponível em: <https://sepq.org.br/eventos/vsipeq/documentos/02858929912/11>. Acesso em: 25 ago. 2025.

NICOLAOU, C. T.; CONSTANTINO, C. P. Assessment of the modeling competence: a systematic review and synthesis of empirical research. **Educational Research Review**, v. 12, p. 52-73, dez. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1747938X14000293>. Acesso em: 14 dez. 2023.

OLIVEIRA, V. **Resolução de problemas abertos para aprendizagem de física no Ensino Médio na perspectiva da modelagem didático-científica**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PAZ, G.; LOCATELLI, C.; FLORENTINO, C.; PEREIRA, M.; LOCATELLI, S. O formato *multipaper* nas teses e dissertações em ensino de Ciências e Matemática: limites e possibilidades. **Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista – ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 15, n. 3, p. 113–123, set./dez. 2025. Disponível em: <https://san.uri.br/revistas/index.php/encitec/article/view/1739>. Acesso em: 16 set. 2025.

PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 1, p. 93–114, ago. 2002. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/9297>. Acesso em: 23 dez. 2025.

REID, D. V.; HODSON, D. **Ciência para todos en secundaria**. Madrid: Narcea, 1993.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, [S. I.], v. 16, n. 1, p. 59–77, jul. 2011. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/246>. Acesso em: 13 out. 2024.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2016.

SILVA, O. H. M. **Um estudo sobre a estruturação e aplicação de uma estratégia de ensino de física inspirada em Lakatos com a reconstrução racional didática para auxiliar a preparar os estudantes para debates racionais entre teorias e/ou concepções rivais**. 2008. 280 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2008.

SILVA, O. H. M.; NARDI, R.; LABURÚ, C. E. Uma estratégia de ensino inspirada em Lakatos com instrução de racionalidade por uma reconstrução racional didática. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 10, n.2, p. 09–26, jun. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ensaio/article/view/10402>. Acesso em: 05 maio 2023.

SILVA, O. H. M.; NARDI, R.; LABURÚ, C. E. Um estudo dos avanços conceituais dos estudantes sobre calor e temperatura decorrentes da aplicação de uma

estratégia de ensino inspirada na teoria de Lakatos. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, v. 5, n. 1, p. 1–18, 19 jul. 2010. Disponível em: <https://reiec.unicen.edu.ar/reiec/article/view/50>. Acesso em: 05 maio 2023.

SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E.; NARDI, R. Contribuições da reconstrução racional didática do desenvolvimento de concepções epistemologicamente mais aceitáveis sobre a Natureza da Ciência e do progresso científico. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 14, n.1, p. 65–80, abr. 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ensaio/article/view/34673>. Acesso em: 05 maio 2023.

SILVA, E.; TEIXEIRA, E. S.; PENIDO, M. C. M. Análise de propostas didáticas de física orientadas por abordagens históricas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 766–804, 18 dez. 2018. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6816392>. Acesso em: 22 nov. 2025.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. In: NASSER, L. (org.). **Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1993. p. 1–26.

CAPÍTULO 1/ARTIGO 1

CONEXÕES PARA UM ENSINO DE CIÊNCIAS MULTIDISCIPLINAR A PARTIR DO SEMINAL FEITO DE ERATÓSTENES

Resumo

Em um cenário de um ensino de ciências no qual considerações históricas e epistemológicas se encontram ausentes, a atividade científica não parece ser devidamente ressaltada enquanto importante elemento da cultura humana. Tal circunstância se constitui em sério obstáculo para o aprendizado de ciências e, mais geralmente, para a educação científica. Para mitigar este obstáculo, adotamos uma prática pedagógica que consiste em uma combinação do método das conexões conceituais com o método das reconstruções racionais didáticas de episódios centrais da história da ciência ancorada pela confluência arte-ciência-filosofia ao explorarmos possíveis significados e ressignificados daí potencialmente ensejados. Neste artigo, o episódio em foco é o da medida do raio da Terra protagonizado por Eratóstenes. Como um dos resultados relevantes desta reflexão teórica, aqui ancorada na combinação dos métodos previamente aludidos, e, à luz das categorias conceituais da geometria euclidiana, notadamente da crítica ao infinito na trilha da argumentação copernicana, o geocentrismo já se encontrava insustentável de um ponto de vista lógico, mas não histórico. Isso, evidentemente, não implica que a história seja ilógica e sim que seja sujeita a marchas e contramarchas.

Palavras-chave: confluência arte, ciência e filosofia; conexões conceituais; reconstruções racionais didáticas; medida do raio da Terra por Eratóstenes.

Abstract

In a science teaching scenario in which historical and epistemological considerations are absent, scientific activity does not seem to be properly highlighted as an important element of human culture. This circumstance constitutes a serious obstacle to the learning of science and, more generally, to scientific education. To mitigate this obstacle, we adopted a pedagogical practice that consists of a combination of the method of conceptual connections with the method of rational didactic reconstructions of central episodes in the history of science, anchored by the confluence of art, science, and philosophy, as we explore possible meanings and the re-significations potentially arising from them. In this article, the episode in focus is the measurement of the Earth's radius, carried out by Eratosthenes. As one of the relevant outcomes of this theoretical reflection, anchored here in the combination of the previously mentioned methods and in the light of the conceptual categories of Euclidean geometry—particularly the critique of the infinite along the lines of the Copernican argument—geocentrism was already logically untenable, though not yet historically so. This, of course, does not imply that history is illogical, but rather that it is subject to advances and setbacks.

Keywords: confluence of art, science, and philosophy; conceptual connections; didactic rational reconstructions; measurement of the Earth's radius by Eratosthenes.

Resumen

En un escenario de enseñanza de las ciencias en el que están ausentes las consideraciones históricas y epistemológicas, la actividad científica no parece ser resaltada adecuadamente como un elemento importante de la cultura humana. Esta circunstancia constituye un obstáculo para el aprendizaje de la ciencia y para la educación científica. Para mitigar este obstáculo, adoptamos una práctica pedagógica que consiste en una combinación del método de conexiones conceptuales con el método de reconstrucciones didácticas racionales de episodios centrales en la historia de la ciencia, anclados en la confluencia del arte, la ciencia y la filosofía, a medida que exploramos posibles significados y las ressignificaciones que potencialmente surgen de ellos. El episodio que se centra es el de la medición del radio de la Tierra por Eratóstenes. Como resultado relevante, aquí anclado en la combinación de

los métodos previamente mencionados y a la luz de las categorías conceptuales de la geometría euclidianas —particularmente de la crítica al infinito en la línea de la argumentación copernicana—, el geocentrismo ya resultaba insostenible desde un punto de vista lógico, aunque no desde una perspectiva histórica. Esto, evidentemente, no implica que la historia sea ilógica, sino que está sujeta a avances y retrocesos.

Palabras clave: confluencia entre arte, ciencia y filosofía; conexiones conceptuales; reconstrucciones racionales didácticas; medición del radio de la Tierra por Eratóstenes.

1 INTRODUÇÃO

O cenário que se apresenta diante de nós é o de um ensino de ciências no qual contextualizações históricas e epistemológicas se encontram praticamente ausentes, situação essa que se constitui em sério obstáculo para a compreensão dos teores abordados durante o correspondente processo de aprendizagem e, por conseguinte, constitui-se em severo impeditivo para a elaboração de significações e ressignificações por parte dos estudantes e, mais geralmente, por parte de outros sujeitos da educação, inclusive de professores. Elegendo como objetivo envidar esforços para mitigar alguns obstáculos de compreensão, propomos a adoção de uma prática pedagógica que envolva o método das conexões conceituais entre diversos campos da cultura e das reconstruções racionais didáticas de episódios importantes da história da ciência, quando tal adoção pedagógica inclui a confluência arte-ciência-filosofia. Argumentamos aqui que a adoção desta diretriz contribui significativamente para a emergência crescente de significações e ressignificações dos conceitos e, por conseguinte, contribui para um ensino de ciências mais qualificado.

Mais geralmente, o nosso método aqui proposto consiste em eleger, em primeira instância, um dado episódio importante da história da ciência e, em uma segunda instância, explorá-lo segundo possibilidades que envolvam significações interdisciplinares, multidisciplinares e transversais que sejam potencialmente pensáveis a partir do episódio escolhido, mas não exclusivamente apenas a partir dele. Em outras palavras, o método aqui adotado nos oferece alternativas criativas de propor tanto relações quanto correlações novas, bem como os processos argumentativos correspondentes que provejam a sua justificação.

No contexto da abordagem teórica a ser adotada, julgamos que uma análise do gênero seja inserida numa articulação dos campos da arte, da ciência e da filosofia na medida em que ela se coaduna, antes de tudo, com a concepção da ciência e com

a concepção de seu ensino enquanto, ambas, manifestações legítimas e genuínas da cultura humana na sua inteireza e na sua necessária complexidade (Zanetic, 1989).

Neste artigo, temos a intenção de explorar múltiplas pontes de ressignificação a partir do seminal feito de Eratóstenes acerca da medida do raio da Terra para um ensino de ciências capaz de prover riqueza conceitual ao trabalharmos as potencialidades ensejadas por desdobramentos e por conexões tanto interdisciplinares quanto multidisciplinares, atitude pedagógica essa que ressalta a abrangência e a importância desse relevante episódio da história da ciência.

Passemos a tecer considerações sobre como o presente artigo se encontra organizado. Na seção 2 intitulada '*Uma breve amostra de exemplos que exploram a confluência arte-ciência-filosofia*' nos referimos a experiências pregressas nesta direção com comentários panorâmicos a respeito; na seção 3 intitulada '*O episódio em foco*' nos debruçamos sobre o conteúdo que constitui a medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria; na seção 4 intitulada '*De um ponto de vista eminentemente lógico, a medida do raio da Terra por Eratóstenes não é compatível com a concepção geocêntrica*' mostramos que se levarmos a sério os pressupostos assumidos por Eratóstenes e o combinarmos com a recusa do infinito, então como conclusão, chegamos ao importante resultado segundo o qual o geocentrismo é logicamente impossível; na seção 5 intitulada '*A ordem lógica não é equivalente à ordem histórica*' argumentamos que embora tenha sido intelectualmente possível recusar o geocentrismo nos tempos de Eratóstenes, a lógica não acarreta necessariamente a história; bem entendido, isso, evidentemente, não é equivalente a se considerar a história como algo ilógico; na seção 6 intitulada '*Como o episódio escolhido inspira a articulação envolvendo a confluência arte-ciência-filosofia*' mostramos que o episódio escolhido transcende em muito uma simplória regra de três como às vezes o ensino de ciências é reduzido e empobrecido; contrapomos a essa atitude uma discussão conectando várias manifestações culturais que podem ser ensejadas a partir do episódio em pauta; finalmente, na seção 7 apresentaremos as nossas conclusões.

2 UMA BREVE AMOSTRA DE EXEMPLOS QUE EXPLORAM A CONFLUÊNCIA ARTE-CIÊNCIA-FILOSOFIA

Trabalhos que exploram o caso abrangente e fascinante das relações da atividade científica enquanto manifestação da cultura, sob diversas perspectivas sejam em âmbitos interno e externo a ela, podem ser encontradas na literatura a um só tempo científica e didático-pedagógica. Como exemplo emblemático podemos citar a tese do Prof. João Zanetic defendida na USP em finais do século XX (Zanetic, 1989), tese essa que teve ampla repercussão na comunidade dos pesquisadores em Ensino de Física a ponto de suscitar uma comemoração quando do vigésimo aniversário de sua defesa em forma de publicação de um livro coletivo organizado pelo Professor André Ferrer P. Martins (Martins, 2009). Também, o livro do Prof. Luis Carlos de Menezes intitulado '*A Matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento científico*' constitui uma abordagem original do pensamento científico enquanto situado como manifestação cultural (Menezes, 2005).

Nesta mesma linha de abordagem, ao explorar significados novos, e por essa razão plenos de potencialidades de aprendizagem criativa, é que também fazemos alusão ao livro de Parrilha da Silva e Danhoni Neves intitulado *O Codex Cigoli-Galileo: Ciência, Arte e Religião num Enigma Copernicano* (Parrilha da Silva; Danhoni Neves, 2015). Como comentário pontual sobre esse livro, diríamos que há uma expressiva passagem do autor do prefácio - o Prof. William R. Shea - acerca de como uma figura central da Revolução Científica do século XVII europeu como Galileu Galilei (1564-1642) está presente no quadro desse entrelaçamento arte-ciência-religião e, se estendermos as nossas conexões para mais além, isso também tem lugar para as complexas relações envolvendo arte-ciência-filosofia-religião. Seja a seguinte passagem: "Ela (Josie Agatha Parrilha da Silva) tem como foco o caso de Galileu Galilei, o homem que queria se tornar um pintor, mas que veio a se tornar o Pai da Revolução Científica, e Ludovico Cardi que foi uma figura monumental nesse

episódio" (Shea, prefácio, 2015, p. 11, tradução nossa⁷),⁸. Podemos desta passagem de Shea imaginar as possibilidades de uma vocação para a pintura se relacionar tão enfaticamente com uma vocação para a ciência e tudo isso tendo lugar no caso de uma figura tão importante para a história da ciência como Galileu Galilei.

Reiteramos que ao longo da história cultural as relações entre esses campos são notáveis e de amplas possibilidades pedagógicas. De modo análogo, podemos também nos referir ao número especial da revista *Valore* no qual se comemorou em 2019 os 50 anos da importante efeméride da chegada do homem à Lua em 1969 com artigos escritos sob diversas óticas muitos dos quais elegendo as relações entre ciência, arte e filosofia como por exemplo (Leopardi Gonçalves; Bastos Filho, 2019).

Em outro livro coletivo, composto por contribuições de autores de diversas lavras culturais e de múltiplas formações intelectuais, e organizado por Parrilha da Silva e Danhoni Neves, intitulado *Imagens: Diálogos e Interfaces Interdisciplinares* (Parrilha da Silva; Danhoni Neves, 2021), autores diversos argumentam cada um dos quais segundo as suas próprias concepções acerca da polissemia ensejada pelo conceito de *Imagem* à luz precípua mente de suas origens culturais e práticas profissionais. No prefácio do livro, (Bastos Filho, 2021) podemos ler uma discussão sobre a reivindicação do grande teórico dos quanta Paul Dirac que consiste no abandono dos recursos imagéticos no campo da física microscópica, reivindicação essa que é antitética às contribuições dos capítulos que ressaltam valores, quer sejam eles estéticos, cognitivos, simbólicos e epistemológicos das imagens tanto no contexto do ensino de ciências quanto em outros contextos. Inspirados nessa ideia, Damasceno; Monteiro e Bastos Filho (2023) procederam a uma confrontação entre as ideias de Dirac, por um lado, com as ideias de duas botânicas brilhantes Graziela

⁷ She (Josie Agatha Parrilha da Silva) focuses on the case of Galileo Galilei, the man who wanted to become a painter but became the Father of Scientific Revolution instead, and of Ludovico Cardi, who is a towering figure in this story. (Shea In: Parrilha da Silva; Danhoni Neves, prefácio, 2015, p. 11).

⁸ Para termos uma ideia mais precisa acerca desta sutil inferência de Shea, torna-se necessário levar em conta que Ludovico Cardi (1559-1613), também chamado de Cigoli, e Galileu Galilei (1564-1642), desfrutaram de fértil amizade durante os tempos da *Accademia del Disegno* em Florença; a partir dessa e de outras circunstâncias; pode-se inferir acerca da proximidade, por um lado, da representação pictórica de Cigoli da *Assunção da Virgem Maria* encontrada na Igreja de Santa Maria Maggiore em Roma na qual a Virgem repousa seus pés sobre uma lua craterada, e por outro lado, com os desenhos da lua de Galileu encontrados em seu livro *O Mensageiro das Estrelas*. É também relevante que nos atenhamos à desconstrução que Galileu realiza da lua lisa e perfeita, composta da quinta essência (éter) de lavra aristotélica. Um exemplo emblemático da confluência arte-ciência no âmbito da história cultural.

Barroso e Maria Merian ao analisar as potencialidades dos recursos imagético verbais para o ensino de ciências.

Ainda podemos nos referir ao livro de Francisco Caruso e Roberto Moreira Xavier de Araújo (Caruso; Xavier de Araújo, 2017; 2020) intitulado *O Livro, o Espaço e a Natureza: Ensaio sobre a Leitura do Mundo, as Mutações da Cultura e do Sujeito* que constitui um ensaio sobre o *Livro* e sua relação com o conceito de *Espaço* e de *Natureza*. Ainda outro exemplo, é o do livro de Wilmo Ernesto Francisco Junior intitulado *Ciência em Verso e Prosa: Acepipes para quem ousa gostar (ou ensinar)* desta feita na confluência Química-Literatura (Francisco Jr., 2018).

As possibilidades de um ensino criativo envolvendo as mais variadas formas de articulação nos campos da arte, ciência e filosofia certamente contribuem para o envolvimento e o despertar de múltiplos interesses e especial entusiasmo dos sujeitos da educação, notadamente de estudantes e professores, mas não apenas desses dois grupos de pessoas. Podemos notar também que recentemente na revista REDE foram publicadas pesquisas educacionais nessa direção o que pode ser notado dos artigos de Caruso (2024), Tsutsui; Toledo e Martins (2024) e Francisco Jr. (2024).

Em vista desta amostra que constitui tão somente um recorte de muitas outras contribuições segundo vieses diversos, concluímos esta seção.

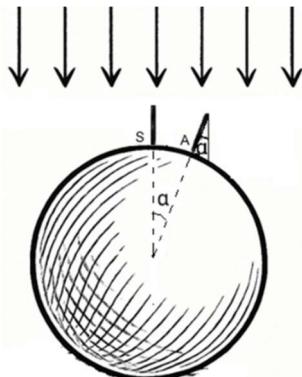
3 O EPISÓDIO EM FOCO

Nesta seção colocaremos de maneira breve para discussão o famoso episódio da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria no século III a. C. Quanto ao seu teor, no sentido estrito do termo, e tendo em vista objetivos precipuamente de ensino, constatamos que ele pode ser encontrado em muitos livros, como por exemplo (Kemble, 1966; Selleri, 1989); pode ainda ser encontrado, inclusive em um conhecido livro de astronomia geocêntrica de Johannes de Sacrobosco (1991) utilizado pelos antigos navegadores e mesmo em vídeos como os daquela famosa série de divulgação científica de Carl Sagan (Documentários Carl Sagan, 2019). Ademais, o episódio em foco foi explorado em um viés cognitivo/epistemológico também ligado ao ensino de Física (Barbosa Freire; Bastos Filho, 1995) e em um contexto relacionado, sobre a benfazeja eficácia da matemática no contexto das ciências físicas (Bastos Filho; Pereira; Barros, 2017).

Da constatação de que em um dia especial do ano (ao meio-dia do solstício de verão), uma estaca fincada na posição perpendicular ao solo na cidade de Siena não exibe sombra enquanto nesse mesmo dia e nessa mesma hora uma análoga estaca fincada em uma posição perpendicular ao solo na cidade de Alexandria a exibe (Figura 1), então Eratóstenes passa a lançar mão da geometria de Euclides (Euclides, 2009), enquanto referencial teórico, cujos pressupostos adotados são:

- (i) É a luz do Sol que produz sombras na estaca;
- (ii) Os raios solares se propagam em linha reta do Sol para a Terra;
- (iii) Se os raios solares incidem paralelamente à estaca fincada na posição perpendicular ao solo em Siena, isso significa, em vista da geometria euclidiana, que a fonte de luz se encontra no infinito (isso é, muito, muito longe para quaisquer propósitos práticos);
- (iv) a superfície da Terra não é plana, pois se assim fosse as situações de Siena e Alexandria seriam exatamente as mesmas.

Figura 1 – Medida do raio da Terra por Eratóstenes



Fonte: Elaborado pelos autores

Tendo em vista os pressupostos acima e ademais, conhecendo a distância entre Siena e Alexandria concebidas como alinhadas ao longo de um mesmo meridiano de nosso globo terrestre e ainda sabendo o ângulo que devemos “rodar” a estaca de Alexandria para eliminar a sombra produzida quando da posição inicial perpendicular ao solo, então Eratóstenes foi capaz de explicitar o valor numérico do raio da Terra com uma grande precisão, principalmente se nos ativermos à época.

Como, especificamente aqui, todo o raciocínio estritamente geométrico se reduz à comparação entre dois comprimentos, quais sejam, o comprimento da

circunferência máxima da Terra e o comprimento do arco de circunferência que corresponde à distância entre as cidades de Siena e Alexandria, então vale a simples e linear regra de três segundo a qual: o comprimento da circunferência está para o ângulo de 360 graus assim como a distância entre Siena e Alexandria está para o ângulo formado no centro da Terra pelos prolongamentos das estacas a partir de suas respectivas posições perpendiculares ao solo em Siena e em Alexandria.

Enquanto teor *stricto sensu*, o episódio constitui um exercício que pode ser veiculado em um exame do ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio). Não obstante, isso não nos basta, pois ele oferece imensas potencialidades de exploração nos três níveis aqui vislumbrados de integração curricular, a saber, no nível interdisciplinar, no nível da integração intradisciplinar e ainda no nível da exploração transdisciplinar, ver (Bittencourt, 2006). Lembremo-nos de que o episódio constitui um feito histórico de mais de dois mil anos de afirmação de um relevante feito cognitivo/epistemológico que refuta enfaticamente o obscurantismo que hoje constitui a concepção equivocada da forma da Terra concebida como um plano, que no fundo representa a metáfora de um retrocesso civilizatório.

4 DE UM PONTO DE VISTA EMINENTEMENTE LÓGICO, A MEDIDA DO RAIO DA TERRA POR ERATÓSTENES NÃO É COMPATÍVEL COM A CONCEPÇÃO GEOCÊNTRICA

De um ponto de vista eminentemente lógico, a medida do raio da Terra por Eratóstenes pressupõe que a luz seja representada por raios solares que se propagam em linha reta e são provenientes de uma fonte que se encontra no infinito^{9,10}. A simples constatação de que em um dia especial e numa hora especial uma estaca fincada na cidade de Siena na posição perpendicular ao solo não exibe

⁹ O referencial teórico que sustenta esta afirmação é a geometria de Euclides; se os raios solares incidem em um certo dia paralelamente a uma estaca em posição perpendicular ao solo em Siena e não produzem sombra, então isso significa que a fonte de luz (o Sol) se encontra no infinito; em termos menos sóbrios se pode dizer que as paralelas se encontram no infinito. A própria categoria conceitual acerca do que significa *infinito* é central nessa discussão.

¹⁰ A discussão desenvolvida nesta seção do presente artigo segue a trilha argumentativa de Euclides (2009), Copérnico (1984; originalmente publicado em latim em 1543) e Galileu (2004; originalmente publicado em italiano em 1632) diretamente de seus textos originais.

sombra, necessariamente pressupõe, à luz da geometria de Euclides, que a fonte de luz que produz a sombra esteja no infinito. Este infinito, no entanto, é o equivalente a dizer que a fonte luminosa -no caso, o Sol- se encontra muito distante de Siena para quaisquer que sejam os propósitos práticos de uma medida do gênero.

Por outro lado, a concepção geocêntrica, a fim de explicar o porquê de, em cada período de 24h, dia e noite se alternam, necessariamente pressupõe a Terra parada e o Sol perfazendo uma rotação completa em torno da Terra ao cabo dessas mesmas 24 horas. Essa velocidade é para todos os propósitos práticos algo infinito; no entanto, se quisermos representá-la com um valor finito, em que pese enorme, então ao lançar mão da fórmula que expressa essa velocidade

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

obtemos, se r for a distância da Terra ao Sol e $T = 24$ horas, uma velocidade com a qual o Sol giraria em torno da Terra (concepção geocêntrica) como algo da ordem de 11 milhões de metros por segundo.

Lembremos que até mesmo Aristóteles já havia recusado o infinito pois o infinito contradiz o seu conceito de ordem cosmológica. Somos chegados à conclusão segundo a qual, se concebermos o argumento de um ponto de vista estritamente lógico, então os pressupostos teóricos assumidos para a medida do raio da Terra por Eratóstenes não se coadunam com o geocentrismo pois isso seria equivalente a introduzir uma velocidade infinita. Em outras palavras, seria muitíssimo mais razoável, de um ponto de vista lógico, admitir uma velocidade de rotação da Terra em algum ponto da linha do equador da ordem de 465 metros por segundo e não de uma velocidade do Sol em torno de nós de absurdos 11 milhões de metros por segundo, ou seja, aproximadamente, 3,63% do que hoje em dia conhecemos acerca do valor da velocidade da luz no vácuo. Aliás, Copérnico, no Capítulo VIII do Livro 1 de *As Revoluções dos Orbes Celestes* argumentou brilhantemente nesta exata direção contra a opinião de Ptolomeu. Vejamos uma expressiva passagem deste argumento:

Mas porque não se levanta a mesma questão ainda com mais intensidade acerca do Universo cujo movimento tem que ser tanto mais rápido quanto o Céu é maior do que a Terra? Ou tornou-se o Céu imenso porque foi desviado do centro por um movimento de força indescritível e acabará por se precipitar

também, se parar? Certamente se este raciocínio fosse razoável também a grandeza do Céu subiria até o infinito. Com efeito, quanto mais alto ele for elevado pela força de seu movimento, tanto mais rápido esse movimento será devido ao aumento contínuo da circunferência que ele tem de percorrer no período de 24 horas. Por outro lado, crescendo o movimento cresceria também a imensidão do Céu. **Assim a velocidade aumentaria o movimento e o movimento aumentaria a velocidade até o infinito. Mas segundo aquele axioma da Física - o infinito não pode ser percorrido nem movido de forma alguma- o Céu terá necessariamente de permanecer imóvel** (Copérnico, Livro 1, Cap. VIII, p. 39-40, 1984; ênfases em negrito são acréscimos nossos [originalmente publicado em latim em 1543]).

Prestemos atenção ao texto precedentemente disposto em caracteres em negrito. Ênfase especial deverá ser enfocada na parte em que Copérnico se refere “*àquele axioma da Física*” segundo o qual “*o infinito não pode ser percorrido de forma alguma*” e consequentemente, “*o Céu terá necessariamente que permanecer imóvel*” (inclusive evidentemente o Sol). Ora, Copérnico escreve em 1543 e assim a tal Física a qual Copérnico se refere é definitivamente a Física de Aristóteles pois a Física Galileana sequer existia, até mesmo porque Galileu ainda não tinha nascido.

5 A ORDEM LÓGICA NÃO É EQUIVALENTE À ORDEM HISTÓRICA

Surge então uma questão muito importante para ser trazida à baila. Ora, se de um ponto de vista estritamente lógico, a medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria está em contradição com a concepção geocêntrica que implicaria numa velocidade de translação infinita do Sol em torno da Terra, então por quais razões a concepção geocêntrica permaneceu como dominante (*mainstream conception*) durante vários séculos?

Uma resposta imediata a essa pergunta, é que a ordem histórica é diferente da ordem lógica. Além da intuição mais imediata da *experiência primeira*¹¹, havia outros elementos muito influentes que os partidários do geocentrismo alegavam como “corroboração” de que a Terra “não” poderia girar em torno de si própria ao longo de 24 horas. Talvez o argumento mais importante tenha sido o assim chamado argumento

¹¹ Lançarmos mão, aqui no curso de nossos argumentos, de uma concepção bachelardiana de obstáculos epistemológicos, ver (Bachelard, 1967; Bachelard, 1996, publicado originalmente em francês em 1934).

da torre. Para dar uma ideia desse argumento, diziam os adeptos do geocentrismo, que um objeto que cai de uma torre, na medida em que leva um certo tempo para cair, então, devido ao movimento de rotação da Terra tal objeto deveria cair a alguns metros a oeste do pé da torre e não no pé da torre tal como é o que de fato ocorre. Vemos, portanto, que Galileu teve que desenvolver ainda uma teoria inteira dos movimentos locais para mostrar que o objeto cadente e a torre compartilham tal movimento de rotação e que, portanto, o argumento da torre dos partidários do geocentrismo estava equivocado. Além de argumentos internos à própria argumentação, também havia aqueles de teor externo: para a Igreja somente teria sentido um conhecimento compatível com uma Terra parada tal como o relato das Sagradas Escrituras.

A história não é linear e está sujeita a marchas e contramarchas. Em uma abordagem para o ensino de ciências que adote uma metodologia baseada em reconstruções racionais didáticas sob o viés epistemológico essa circunstância é por demais importante. Lembremo-nos de Lakatos quando assevera:

Ao redigir o estudo de um caso histórico, deve-se, creio eu, adotar o seguinte procedimento: (1) faz-se uma reconstrução racional; (2) tenta-se cotejar essa reconstrução racional com a história real e criticar tanto a reconstrução racional pela falta de historicidade quanto a história real por falta de racionalidade. Dessa maneira, todo estudo histórico deve ser precedido de um estudo heurístico: a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega (Lakatos, 1979, p. 169).

Parafraseando Lakatos, diríamos que a Reconstrução Racional consiste na interpretação de episódios da história da ciência por meio da aplicação de metodologias normativas, provenientes da filosofia da ciência. Nesse processo, o historiador busca reconstruir a história interna do conhecimento científico, oferecendo uma explicação racional para o seu desenvolvimento (Lakatos, 1989). Pela metodologia dos programas de pesquisa científica proposta por Lakatos, o historiador da ciência procura identificar programas (teorias científicas) que possam ser analisados quanto à sua dinâmica de desenvolvimento, marcada por mudanças progressivas ou degenerativas de problemas (Silva, 2008). Um programa de pesquisa é considerado progressivo quando gera novos problemas teóricos e avanços empíricos; por outro lado, é visto como degenerativo quando suas respostas deixam de explicar fatos novos. Nesse contexto, as revoluções científicas ocorrem quando um programa progressivo substitui um rival que entrou em degeneração. Assim, cada

reconstrução racional delineia um modelo característico de desenvolvimento racional do conhecimento científico, destacando os critérios que justificam a permanência, superação ou abandono dos programas em disputa (Lakatos, 1989).

Vejamos que um empirismo ingênuo e sensualista, ou seja, um tal meramente apoiado nos sentidos, pode nos levar a erros. Como se diz habitualmente, *as aparências nos enganam* e a Revolução Científica do século XVII nos ensina precipuamente que temos necessariamente de transcender o nível das impressões sensoriais imediatas, ainda que sem elas sequer viveríamos. Deste modo, vejamos uma citação primorosa de Galileu a respeito:

Que as razões contra a revolução diurna da Terra, já examinadas por vós, tenham grandíssima aparência, já ouvimos, e terem sido consideradas como concludentíssimas pelos ptolomaicos, aristotélicos e todos os seus seguidores, é um argumento muito forte de sua eficácia; mas aquelas experiências, que contrariam abertamente o movimento anual, são de uma aversão tanto mais aparente, que (volto a dizer) **não posso encontrar limite para minha admiração de como tenha podido, em Aristarco e em Copérnico, a razão fazer tanta violência aos sentidos que contra estes ela se tenha tornado soberana de sua credulidade** (Galilei, 2004, p. 413; os grifos em negrito são acréscimos nossos).

A interpretação do excerto precedente é um enfático manifesto de preferência da **razão** em detrimento dos **sentidos**. Efetivamente, aquilo que vemos, ou seja, o Sol se movendo perante nós, constitui-se em mera aparência pois a razão nos ensina que essa aparência nos conduz ao infinito e, portanto, nos conduz a um resultado inaceitável pelos critérios da razão.

Neste presente estágio de argumentação, é interessante que comparemos a época de Eratóstenes (aproximadamente 250 anos antes de Cristo) com a época de Galileu ao escrever *Os Diálogos* em 1632. Ora, como vimos, de um ponto de vista estritamente lógico, a medida do raio da Terra por Eratóstenes somente é compatível com a adoção do movimento diurno da Terra com o Sol parado, pois do contrário se incorporaria uma velocidade infinita. Isso significa que de um ponto de vista meramente intelectual, enquanto uma solução *stricto sensu* racional, uma adoção heliocêntrica era perfeitamente possível. O fato dela não ter se constituído em corrente dominante (*mainstream*) durante vários séculos é devido a um conjunto de fatores de lavras tanto internas quanto externas. Se nos ativermos aos aspectos sensoriais, eles podem ser pensados como obstáculos em nível interno; uma análise comprehensiva requererá a consideração também de aspectos externos.

No contexto do ensino, os professores estão constantemente realizando reconstruções dos conteúdos científicos, a partir de diferentes abordagens didáticas. Um professor de Física, por exemplo, ao introduzir um tema, costuma organizar sua reconstrução didática com base nos modelos matemáticos que estruturam o conhecimento físico. Esse é, de fato, um aspecto fundamental na construção e no desenvolvimento da Física. No entanto, acaba se tornando, muitas vezes, a única dimensão enfatizada nessas reconstruções. Essa limitação é perceptível quando os alunos afirmam que Física e Matemática são áreas idênticas, revelando uma visão restrita do conhecimento físico.

As Reconstruções Racionais Didáticas (Silva, 2008; Montýla; Koponen, 2007, Izquierdo-Aymerich; Adúriz-Bravo, 2003) de episódios da história da ciência, são reconstruções conduzidas a partir de epistemologias modernas, isto é, são de viés epistemológico (Bastos Filho, 2017), mas que diferentemente das reconstruções racionais, que possuem objetivos historiográficos, as didáticas não visam ensinar história, mas o conteúdo científico. Em outras palavras, em uma reconstrução racional com fins didáticos, além das escolhas epistemológicas e cognitivas, escolhas sobre como o aluno aprende, por exemplo, também guiam a elaboração desse texto. E neste ponto, enfatizamos que as reconstruções racionais didáticas estão em acordo com o espírito das discussões aqui apresentadas, de buscar conexões na confluência Arte-Ciência- Filosofia a partir do feito de Eratóstenes para auxiliar o ensino e aprendizagem de ciências, o que permite outras possibilidades de racionalização do conhecimento e, consequentemente, facilitando a compreensão de conceitos e de processos científicos.

6 COMO O EPISÓDIO ESCOLHIDO INSPIRA A ARTICULAÇÃO ENVOLVENDO A CONFLUÊNCIA ARTE-CIÊNCIA-FILOSOFIA: ALGUMAS CONSIDERAÇÕES DE TEOR EXTERNO

Embora se diga *urbi et orbi* que o episódio da história da ciência aqui considerado no presente ensaio seja emblemático quanto ao combate ao mito da “terra plana”, o que por si só já seria relevantíssimo, é também necessário afirmar que as potencialidades de exploração de suas conexões transcendem em muito tal aspecto. Mostramos que o episódio - de um ponto de vista lógico- favorece o

heliocentrismo na medida em que requer a rotação diurna da Terra em torno de seu próprio eixo e que, portanto, desfavorece o geocentrismo, pois esta última opção levaria ao movimento infinito. Como a história da ciência não é linear, na medida em que sujeita a marchas e contramarchas, em largos períodos da Idade Média europeia houve retrocessos.

Para, de uma maneira breve, darmos ideia do esforço de lavra externa que seria necessário empreender para vencer obstáculos, vejamos alguns exemplos: Galileu argumentou na sua famosa Carta a Cristina de Lorena, inspirado em parecer de importante autoridade eclesiástica (tratava-se do cardeal Cesare Barônio (1538-1608)) que o céu da astronomia não é o mesmo céu da religião. “Eu direi aqui o que ouvi de uma pessoa eclesiástica constituída em grau eminentíssimo, isto é, que a intenção do Espírito Santo é ensinar-nos como se vai para o céu e não como vai o céu” (Galilei, 1988, p. 52 [escrita originalmente em italiano em 1615])¹². Uma interpretação simples e direta para a passagem precedente é a de simplesmente dizer que o céu do qual se refere a astronomia é algo qualitativamente diverso do Céu da religião. O céu da astronomia é aquele do mundo natural enquanto o Céu da religião é aquele do mundo sobrenatural. Tal ponto fazia parte da argumentação enfática de Galilei a Cristina de Lorena em prol do movimento diurno da Terra em torno de seu eixo.

Vejamos um outro obstáculo a ser superado: para dar uma ideia da sacralidade do céu, os pintores que precederam o Renascimento o pintavam de dourado como na tradição da arte bizantina como nos mostra muito bem um quadro emblemático de Duccio di Buoninsegna pintado entre 1308 e 1311 intitulado *O Chamado dos Apóstolos Pedro e André*, ver (Caruso, 2024). Para comparar o contraste, Caruso ilustra no seu artigo o quadro de Giotto intitulado *A Lamentação* no qual o Céu é pintado de azul, o que pode ser interpretado, a nosso ver, como um episódio importante de dessacralização do céu pois, como disse o Prof. Roberto Moreira Xavier de Araújo, “uma sociedade que pinta o céu de dourado, não pode apontar uma luneta para o céu”. O céu azul não é mais objeto de contemplação enquanto morada de Deus; ele é sujeito à investigação humana e é por esta e entre outras razões que o ano de 1609,

¹² Io qui direi quello che intesi da persona ecclesiastica costituita in eminentissimo grado, cioè l'intenzione dello Spirito Santo essere d'insegnarci come si vadia al cielo, e non come vadia il Cielo. (GALILEI, 1993, p. 22).

quando Galileu apontou a luneta para os céus, se reveste de grande e decisiva importância.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Somos chegados, a título de conclusão, aos nossos comentários finais. O que pode o estudo de um episódio bastante central da história da ciência -hoje diríamos um episódio que quando concebido *stricto sensu* é de fácil compreensão- oferecer tantas possibilidades de contextualização a ponto de ensejar significativas conexões com vários ramos envolvendo ciência, arte e filosofia? De fácil compreensão, na medida em que se pode depreender de conceitos auto evidentes de geometria euclidiana em associação ao caráter linear de uma regra de três igualmente elementar. No entanto, quando explorados os seus aspectos históricos e epistemológicos, nada disso é tão *prima facie* quanto parece. Lembremos o vídeo de Carl Sagan na parte em que ele sugere acerca do que poderia interessar a simples curiosos, entidades tomadas no seu conjunto como Sol, varetas, sombras, poços e coisas do gênero. Assim, para o curioso Eratóstenes, mais um ingrediente foi despertado: as possibilidades de seu próprio cérebro.

Além disso, o episódio, ainda que considerado em seu contexto geométrico *stricto sensu*, não se reduz apenas ao enaltecimento do caráter esférico da forma da Terra, enquanto importante conquista cognitiva da humanidade, o que por si só já seria um elemento educador importante contra o retrocesso de uma concepção metafórica de uma “terra plana” *lato sensu*. Quando analisado mais pormenorizadamente, a medida do raio da Terra por Eratóstenes já contém um embrião importante do heliocentrismo uma vez que a opção geocêntrica, enquanto opção explicativa da alternância de dia e noite ao cabo de cada 24h, implicaria na existência do infinito.

Julgamos que a nossa abordagem que consiste em articular conexões ensejadas pelo episódio histórico da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria se aproxima da abordagem das reconstruções racionais didáticas. Concluímos aqui o nosso artigo.

8 REFERÊNCIAS

BACHELARD, G. **La formation de l'esprit scientifique** : contribuition à une psychanalyse de la connaissance objective. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 5a edition, Collection: Bibliothèque des textes philosophiques, 1967 [originalmente publicado em francês em 1934]. Disponível em: <https://gastonbachelard.org/wp-content/uploads/2015/07/formationesprit.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2025.

BACHELARD, G. **A Formação do Espírito Científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto Editora Ltda., tradução de Estela dos Santos Abreu, 1996, 5ª reimpressão, 2005. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fis2008/Bachelard1996.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2025.

BARBOSA FREIRE, M. I.; BASTOS FILHO, J. B. É possível pensar sem teoria? O que veria um suposto *tabula rasa teórico*? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 12, n. 2, p. 79-94, 1995. [antigo Cad. Cat. Ens. Fis.]. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7089/6560>. Acesso em: 01 maio 2025.

BASTOS FILHO, J. B. Reconstruções racionais de episódios da história da ciência sob um viés epistemológico: Fundamentação. In: CARUSO, F. **Roberto, o amigo**: Roberto Moreira e a história e filosofia da ciência. São Paulo: Livraria da Física, 2017. p. 75 – 115.

BASTOS FILHO, J. B.; PEREIRA, A.; BARROS, A. S. Por que a Matemática é tão eficaz nas Ciências Físicas? **Psicologia & Saberes**, v. 6, n. 7, p. 44-69, 2017. Disponível em: <https://revistas.cesmac.edu.br/psicologia/article/view/750/619>. Acesso em: 01 maio 2025.

BASTOS FILHO, J. B. In: PARRILHA DA SILVA, J. A.; DANHONI NEVES, M. C. (org.). **Imagen**: Diálogos e Interfaces Interdisciplinares. Maringá: EDUEM, 2021. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/dy7z7/pdf/silva-9786587626079.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2025.

CARUSO, F.; XAVIER DE ARAÚJO, R. M. **O Livro, o Espaço e a Natureza**: Ensaio sobre a Leitura do Mudo, as Mutações da Cultura e do Sujeito. São Paulo: Livraria da Física; 1a. ed. 2017; 2a ed. 2020.

CARUSO, F. Arte e Ciência: Convergências Renascentistas a partir de Giotto. **Revista Ensino em Debate (REDE)**, v. 3, e2024018, p. 1-16, 2024. Disponível em: <https://revistarede.ifce.edu.br/ojs/index.php/rede/article/view/52/39>. Acesso em: 01 maio 2025.

COPÉRNICO, N. **As Revoluções dos Orbes Celestes**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, tradução de A. Dias Gomes e Gabriel Domingues, introdução e notas de Luís Albuquerque, 1984 [originalmente publicado em latim em 1543].

DAMASCENO, D. M.; MONTEIRO, M. A.; BASTOS FILHO, J. B. O imagético-verbal como expediente pedagógico para as abordagens dos legados de Graziela Barroso

e Maria Merian. **Ensino & Multidisciplinaridade**, São Luis, v.9, n. 2, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/ens-multidisciplinaridade/article/view/22077/12677>. Acesso em: 02 mar. 2025.

DOCUMENTÁRIOS CARL SAGAN. Cosmos - episódio 1 - os limites do oceano cósmico. [S.I.]: YouTube, 23 jul. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=N1CQQLSJfwQ&list=PLWTsw1mh-VO-MONi88PiY6Kstvlxw0Hcj>. Acesso em: 17 abr. 2025.

EUCLIDES, **Os Elementos**. Tradução e introdução de Irineu Bicudo, São Paulo: Editora Unesp, 2009.

FRANCISCO JUNIOR, W. E. **Ciência em Verso e Prosa**: Aceipipes para quem ousa gostar (ou ensinar). São Carlos -SP: Pedro & João Editores, 2018.

FRANCISCO JUNIOR, W. E. Por uma Ciência com mais Poesia: Possibilidades de uma Dualidade? **Revista Ensino em Debate (REDE)**, Fortaleza-CE, v.2, e2024003, jan./dez., 2024. Disponível em: <https://revistarede.ifce.edu.br/ojs/index.php/rede/article/view/15/11>. Acesso em: 01 maio 2025.

GALILEI, G. Carta à senhora Cristina de Lorena, Grã-Duquesa Mãe de Toscana (1616). In: **Ciência e Fé**. Tradução de Carlos Arthur R. do Nascimento, Rio de Janeiro: Museu de Astronomia, Istituto Italiano di Cultura, Nova Stella, 1988, 1a. ed. p. 41-81.

GALILEI, G. **Diálogo Sobre os dos máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano**. Tradução: Introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. 2ª Ed. São Paulo: Discurso editorial/Imprensa Oficial, 2004.

IZQUIERIDO-AYMERICH, M.; ADÚRIZ-BRAVO, A. Epistemological Foundations of School Science. **Science & Education**, 12, p. 27-43, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022698205904>. Acesso em: 02 maio 2025.

KEMBLE, E.C. **physical science, its structure and development**. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Cap. 2, pp. 29-60, 1966.

LEOPARDI GONÇALVES, M. G.; BASTOS FILHO, J. B. A Lua: o etéreo, o sagrado, o poético e o científico em construção/desconstrução. **Valore**, Volta Redonda, 4 (Edição Especial), p. 121-132, 2019. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/533/390>. Acesso em: 01 maio 2025.

MÄNTYLÄ, T.; KOPONEN, I. T. Understanding the Role of Measurements in Creating Physical Quantities: A Case Study of Learning to Quantify Temperature in Physics Teacher Education. **Science & Education**, 16, p. 291-311, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227088898_Understanding_the_Role_of_M

measurements in Creating Physical Quantities A Case Study of Learning to Quantify Temperature in Physics Teacher Education. Acesso em: 02 maio 2025.

MARTINS, A. F. P. (Org), **Física ainda é Cultura?** São Paulo: Livraria da Física, 2009.

MENEZES, L. C. **A Matéria uma aventura do espírito:** fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PARRILHA DA SILVA, J. A.; DANHONI NEVES, M. C. **O Codex Cigoli-Galileo:** ciência, arte e religião num enigma copernicano. Maringá: EDUEM, p. 11-13, 2015.

PARRILHA DA SILVA, J. A.; DANHONI NEVES, M. C. (Org.). **Imagen: Diálogos e Interfaces Interdisciplinares.** Maringá: EDUEM, 2021. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/dy7z7>. Acesso em: 02 maio 2025.

SACROBOSCO, J. **Tratado da Esfera.** São Paulo: Unesp; Rio de Janeiro: Nova Stella; Rio de Janeiro: MAST, 1991, nas margens das páginas 35 a 37.

SELLERI, F. **Fisica senza Dogma:** la conoscenza scientifica tra sviluppo e regressione. Itália: Edizioni Dedalo Bari, cap. 2, pp. 43-66, 1989.

SHEA, W. R., Galileo the Painter. In: PARRILHA DA SILVA, J. A.; DANHONI NEVES, M. C. **O Codex Cigoli-Galileo:** ciência, arte e religião num enigma copernicano. Maringá: EDUEM, p. 11-13, 2015.

SILVA, O. H. M. **Um Estudo sobre a Estruturação e Aplicação de uma Estratégia de Ensino de Física Inspirada em Lakatos com a Reconstrução Racional Didática para Auxiliar a Preparar os Estudantes para Debates Racionais entre Teorias e/ou Concepções Rivais.** 2008. 280 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2008.

TSUTSUI, T. T.; TOLEDO, T.; MARTINS, M. R. “Céu: da Arte e da Ciência”, uma proposta interdisciplinar à luz da BNCC. **Revista Ensino em Debate (REDE),** Fortaleza-CE, v. 3, e2024019, jan./dez., 2024. Disponível em: <https://revistarede.ifce.edu.br/ojs/index.php/rede/article/view/53/40>. Acesso em: 02 maio 2025

ZANETIC, J. **Física também é Cultura.** 1989. 252f. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, São Paulo-SP, 1989.

CAPÍTULO 2/ ARTIGO 2

A NATUREZA DO ESPAÇO: ALGUNS PROBLEMAS EPISTEMOLÓGICOS SUSCITADOS PELO SEMINAL EPISÓDIO DE ERATÓSTENES

Resumo

Neste artigo exploramos o famoso episódio da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria à luz de concepções dispares sobre a natureza do espaço. Argumentamos que uma confrontação do gênero ressalta os valores, respectivamente, histórico e epistemológico, do episódio em consideração permitindo, a partir de então, articulações entre diversos campos do saber. Inversões epistêmicas envolvendo conceitos de lavra filosófica como Ser e Devir são incorporados à discussão que além do mais suscita questões importantes como a do “estranhamento do mundo” e a do “desencantamento do mundo”. Argumentamos que um ensino que busca conexões vai na direção de um enriquecimento cultural que provê produção de significados. As concepções einsteinianas de espaço possibilitaram introduzir, por meio de recursos analógicos, os conceitos de espaço educacional, respectivamente, positional e absoluto, e posterior emprego dessas ideias nas propostas de modelos de ensino de ciências que visem um ensino contextualizado e autêntico. Essas propostas favorecem abordagens interdisciplinares, promovem o pensamento crítico e contribuem para uma compreensão ampla das relações entre ciência, filosofia e educação.

Palavras-chave: Ser e Devir. Modelos de ensino. História da ciência. Filosofia da ciência.

Abstract

In this article we explore the famous episode of the measurement of the Earth's radius by Eratosthenes of Alexandria in the light of disparate conceptions about the nature of space. We argue that a confrontation of this kind highlights the historical and epistemological values, respectively, of the episode under consideration, thus allowing for articulations between different fields of knowledge. Epistemic inversions involving philosophical concepts such as Being and Becoming are incorporated into the discussion, which also raises important questions such as the “strangeness of the world” and the “disenchantment of the world”. We argue that a teaching that seeks connections moves towards cultural enrichment that provides the production of meanings. Einstein's conceptions of space made it possible to introduce, through analogical resources, the concepts of educational space, respectively, positional and absolute, and the subsequent use of these ideas in proposals for science teaching models that aim at contextualized and authentic teaching. These proposals favor interdisciplinar approaches, promote critical thinking and contribute to a broad understanding of the relationships between science, philosophy and education.

Keywords: Being and Becoming. Teaching models. History of science. Philosophy of science.

Resumen

En este artículo exploramos el famoso episodio de la medición del radio de la Tierra por Eratóstenes de Alejandría a la luz de concepciones dispares sobre la naturaleza del espacio. Argumentamos que una confrontación de este tipo resalta los valores históricos y epistemológicos, respectivamente, del episodio en consideración, permitiendo así articulaciones entre diferentes campos de conocimiento. Se incorporan a la discusión inversiones epistémicas que involucran conceptos filosóficos como Ser y Devenir, lo que también plantea cuestiones importantes como la “extrañeza del mundo” y el “desencanto del mundo”. Argumentamos que la enseñanza que busca conexiones avanza hacia un enriquecimiento cultural que proporciona la producción de significados. Las concepciones del espacio de Einstein

permitionaron introducir, a través de recursos analógicos, los conceptos de espacio educativo, respectivamente, posicional y absoluto, y la posterior utilización de estas ideas en propuestas de modelos de enseñanza de las ciencias que apuntan a una enseñanza contextualizada y auténtica. Estas propuestas favorecen enfoques interdisciplinarios, promueven el pensamiento crítico y contribuyen a una comprensión amplia de las relaciones entre ciencia, filosofía y educación.

Palabras clave: Ser y Devenir. Modelos didácticos. Historia de la ciencia. Filosofía de la ciencia.

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas mais graves de um ensino de ciências fragmentado em disciplinas concebidas enquanto campos díspares que não se comunicam entre si e para o qual não sejam exploradas conexões, relações e correlações envolvendo domínios mais amplos do saber é aquele ensino no qual os teores veiculados são vistos pelos estudantes como destituídos de significação, situação que leva a esses uma grave percepção de falta de sentido. Associado a este problema há um outro que consiste em interpretar o teor daquilo que é ensinado em uma forma enormemente empobrecida e apenas no sentido o mais estrito possível de uma cultura que deveria ser apresentada e protagonizada por estudantes e professores de uma maneira bem mais ampla.

Como exemplo emblemático, o episódio da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria, em que pese se constituir em um feito cognitivo grandioso da humanidade, não é devidamente percebido como tal por grande parte dos estudantes pelo fato de ser concebido, ante os olhos de alguém já familiarizado com a geometria euclidiana, como algo trivial e/ou sem importância para que venha a merecer ser levado em conta, ou ainda pelo fato dessa pessoa não ter sido estimulada, no curso de seu processo educacional, a conectar e explorar possíveis relações que sejam porventura passíveis de serem articuladas.

Explorar a *natureza do espaço* implicada pelo grande feito de Eratóstenes e confrontá-la com outras concepções de espaço quer sejam religiosas, quer sejam metafísicas, quer sejam aquelas dotadas do *encantamento do mundo* providas pela imaginação livre no campo das artes constituem-se em possibilidades que ressaltam o próprio ensino de ciências tornando-o mais significativo enquanto poder de ensejar conexões. Perseguindo este objetivo neste artigo, confrontaremos os pensamentos respectivamente de Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.) e de Eratóstenes (276 a.C. – 194

a.C.) tirando daí consequências relevantes acerca do que cada um desses pensadores concebe sobre a *natureza do espaço*, enfatizando a radical incompatibilidade entre as duas concepções. Ao aprofundar os argumentos, mostramos que Galileu, ao proceder a uma desconstrução do conceito aristotélico de éter –ou quinta essência- substância perene, eterna e essencial, e assim se encaminhando na direção oposta do aristotelismo ao valorizar o mundo da mudança, ou seja, da alterabilidade, também procede a uma *inversão epistêmica*¹³ ao atribuir ao mundo da vida e da alterabilidade um estatuto mais nobre que o mundo da inalterabilidade. Galileu, na realidade, procede a uma dupla *inversão epistêmica*: a primeira decorre de sua crítica ao mundo etéreo de Aristóteles elogiando o mundo da mudança e da vida. No entanto, a própria ciência galileana dos movimentos locais, para os quais não existem dissipações, atritos e calores, também vai exigir uma segunda *inversão epistêmica* ao eleger invariantes matemáticos que podem ser considerados como novos “éteres”. Na trilha de Galileu e de seu póstero ilustre Isaac Newton, a ciência da mecânica, cujas dissipações, atritos e calores são programaticamente excluídos de suas considerações teóricas, constituem uma ciência do **Ser**. Prigogine e Stengers (Prigogine; Stengers, 1984) argumentam que, diferentemente de uma ciência do **Ser** de lavra galileana-newtoniana, a termodinâmica, principalmente a partir do século XIX com o conceito de entropia, que contempla a irreversibilidade dos sistemas reais, e que portanto contempla a mudança, constitui-se uma ciência do **Devir** (Prigogine, 1980). Prigogine e Stengers vão além disso ao considerarem também, no curso do século XX, a termodinâmica para situações fora do equilíbrio termodinâmico como aquela mais propícia para o advento evolutivo de qualidades novas.

Outros dois aspectos que serão tratados neste artigo dizem respeito ao “*estranhamento do mundo*” diante de uma descrição mecânica que nos faz distantes e alheios ao que realmente somos, enquanto seres humanos, e ao “*desencantamento do mundo*” tão bem descrito por uma estupenda passagem de Burtt perante um mundo

¹³ A Física constitui uma ciência que, à luz da concepção de Lakatos, pode ser considerada como incorporando vários Programas de Pesquisa Científica tais como o atomista, o do contínuo, o parmenidiano (o do Ser), o heraclitiano (o do Devir) entre outros. Aqui no presente artigo o nosso foco é o de mostrar que autores seminais como Galileu argumentaram em situações que podemos caracterizá-las como realizando transições argumentativas de um Programa para outro o que em primeira instância podemos denotar por *inversões epistêmicas*.

frio de qualidades puramente matemáticas e destituídas de cores, sabores e das possibilidades imensas da imaginação livre.

Ao trazer para a nossa discussão autores de diferentes épocas, quais sejam aqueles da Antiguidade Grega, do Renascimento e de pensadores do século XX, a nossa intenção é articular conexões que possam servir ao mister das *Reconstruções Racionais Didáticas* que estejam atentas e evitem, de antemão, anacronismos definidos aqui como a atitude de conceber um conhecimento de épocas pregressas à luz de conhecimentos que somente foram desenvolvidos em épocas sucessivas. O nosso mister não é o mesmo do historiador da ciência e sim o de explorar um discurso conectivo de interesse pedagógico respeitando rigorosamente possibilidades de cada época, o que, inclusive, nos permitiu a partir das concepções de espaço de Einstein estabelecer conexões instigantes entre os campos da física e educação.

O nosso artigo se encontra organizado como segue: na seção 2 intitulada 'Da incompatibilidade entre a teoria dos dois mundos de Aristóteles e o feito grandioso da medida do raio da Terra por Eratóstenes' argumentamos acerca de como as duas teorias, a de Aristóteles e a de Eratóstenes, se baseiam em pressupostos díspares e incompatíveis acerca da natureza do espaço; na seção 3 intitulada 'A História da Ciência, sua não linearidade e suas inversões epistêmicas' trazemos à baila uma discussão sobre as centrais categorias conceituais filosóficas de **Ser** e de **Devir** aproveitando previamente intuições de Galileu e mais recentemente de Prigogine e Stengers; na seção 4 intitulada 'Sobre a natureza do espaço' desenvolvemos algumas considerações relativas aos dois grandes conceitos de espaço, segundo parecer de Einstein, bem como, uma conexão dessa ideia com o conceito de espaço educacional; e na seção 5 intitulada 'Considerações Finais' apresentaremos as nossas conclusões.

2 DA INCOMPATIBILIDADE ENTRE A TEORIA DOS DOIS MUNDOS DE ARISTÓTELES E O FEITO GRANDIOSO DA MEDIDA DO RAIO DA TERRA POR ERATÓSTENES

Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.) e Eratóstenes (276 a.C. – 194 a.C.) não foram contemporâneos. Tal como é óbvio, a partir de uma simples e ingênuas observação cronológica, o período em que Aristóteles viveu e morreu precedeu o correspondente período de vida de Eratóstenes. A questão que se coloca aqui é sobre a possível

influência ou não da concepção de espaço do primeiro sobre o pensamento do segundo. Tudo leva a crer que a teoria sobre os dois mundos qualitativamente distintos – o sublunar e o supralunar- tal como está exposta no tratado dos Céus de Aristóteles (Aristóteles, 1964) não tenha tido influência na Escola de Alexandria e, em especial, não tenha tido influência sobre o pensamento de Eratóstenes. Isso pode ser compreendido se nos ativermos ao fato de que a medida do raio da Terra pressupõe necessariamente um espaço geométrico para o qual todos os seus pontos (podemos pensar mais amplamente, todas as suas regiões ou todos os seus subespaços) tenham o mesmo estatuto ontológico, ou seja, todos eles são rigorosamente equivalentes.

Tal não é o caso, contudo, da teoria dos dois mundos qualitativamente distintos de Aristóteles que pressupõe diferentes estatutos ontológicos para os mundos, respectivamente sublunar e supralunar, como se pode depreender do capítulo 2 do Livro Primeiro do Tratado dos Céus: “A substância do Céu constitui um quinto elemento, diverso dos que constituem o mundo sublunar [...]” (Aristóteles, 1964, p.713)¹⁴. O mundo sublunar é composto, segundo Aristóteles, de ar, água, terra e fogo e se refere àquele para o qual todos os organismos vivos, que são alguns de seus componentes, além dos entes não biológicos nele existentes, estão sujeitos à corrupção, ou seja, estão sujeitos à degradação que os leva inevitavelmente à morte e/ou ao perecimento. Em suma, trata-se de um mundo sujeito à corrupção e à geração; os organismos geram descendentes, mas nenhum deles está imune à degradação e à corrupção que são ambas inevitáveis. O mundo supralunar, por outro lado, composto da substância incorruptível – o éter ou quinta essência- no qual todos os seus componentes são supostamente eternos e como tais imunes à degradação, é qualitativamente diferente do mundo sublunar.

Na medida em que o feito seminal de Eratóstenes pressupõe um mundo geométrico que abarca todo o espaço no qual estão Terra, Sol e distâncias astronômicas, ou seja, um mundo que vai muito além da Lua, então as duas teorias, a de Aristóteles e a de Eratóstenes, não se coadunam e dizem respeito a universos

¹⁴ La Sustancia del Cielo constituye un Quinto Elemento, diverso de los que constituyen el Mundo Sublunar. [...] (Aristóteles, **Del Cielo**, Libro I, p. 713).

de discursos que são díspares. A partir de Kuhn (1978), é possível dizer que entre as concepções de mundo de Aristóteles e de Eratóstenes há uma incomensurabilidade de paradigmas, o que sugere que a postura de Eratóstenes, ao assumir um mundo qualitativamente diferente do aristotélico, caracterizou, ao menos nesse contexto, uma revolução científica.

Se nos fosse perguntado se a teoria dos dois mundos qualitativamente distintos de Aristóteles teria constituído um obstáculo epistemológico para o grande feito de Eratóstenes, então a nossa resposta é definitivamente não pois Eratóstenes raciocinou à luz de um referencial teórico estritamente euclidiano. Isso, no entanto, não significa que a teoria de Aristóteles não tenha se constituído em obstáculo epistemológico, no sentido bachelardiano do termo¹⁵, durante grande parte do período medieval europeu a fim de que viesse a emergir uma geometrização do mundo natural. Se isso não fosse verdade, como é amplamente reconhecido, Galileu Galilei não teria necessidade de envidar tantos esforços no sentido da desconstrução de várias concepções aristotélicas. A propósito ver (Bachelard, 1996).

Galileu, com a ironia e gênio que lhe são peculiares, exatamente sobre o tema aqui em tela, promove inclusive uma inversão epistêmica do argumento dos dois mundos qualitativamente distintos de Aristóteles. Na próxima seção teceremos considerações sobre essa inversão epistêmica.

3 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA, SUA NÃO LINEARIDADE E SUAS INVERSÕES EPISTÊMICAS

Em importante ensaio, o influente historiador da ciência Alexandre Koyré (Koyré, 1966) considerou, como características precípuas da atitude intelectual da ciência clássica, a *geometrização do espaço* e a *abolição do Cosmos*. Vejamos a citação:

¹⁵ O conceito de obstáculo epistemológico de Gaston Bachelard é relevante aqui para as nossas considerações. Tomemos aqui o *obstáculo da experiência primeira*; achamos que um exemplo historicamente importante seja o do movimento aparente do Sol. É necessário superar o empirismo sensualista de acreditar no que se vê à luz de um senso simplesmente imediato e aparente. Galileu, em famosa passagem, elogia Aristarco de Samos e Copérnico que preferiram apostar na razão ainda que em detrimento de simples aparências dos sentidos.

Também acreditamos, que a atitude intelectual da ciência clássica poderia ser caracterizada por esses dois momentos intimamente ligados: geometrização do espaço e dissolução do Cosmos, isto é desaparecimento no interior dos raciocínios científicos de todas as considerações a partir do Cosmos; substituição do espaço concreto da física pré galileana pelo espaço abstrato da geometria euclidiana. É esta substituição que permite a invenção da lei de inércia (Koyré, 1966, tradução para o português a partir do original em francês em nota de rodapé)¹⁶.

A passagem precedentemente disposta de Koyré é primorosa para o desenvolvimento de nossa argumentação aqui. Pensemos na teoria dos dois mundos qualitativamente distintos de Aristóteles, profundamente hierarquizados entre o etéreo e o degradável, e o confrontemos com o mundo geométrico no qual Eratóstenes pressupõe um espaço sem regiões hierárquicas e que compreende Terra, Sol e distâncias astronômicas. Poder-se-ia perguntar o porquê dos gregos já detentores de pelo menos um embrião da ideia de geometrização do espaço e a despeito disso não tenham logrado realizar a Revolução Científica que somente veio à luz no século XVII europeu. Uma das possíveis respostas é que apesar do que foi dito, ou seja, da adoção de um espaço geométrico por Eratóstenes, os gregos ainda estavam presos a uma concepção de movimento enquanto *processo* e necessariamente a Revolução Científica requereu a concepção de movimento enquanto *estado de movimento*. Para Aristóteles o movimento é considerado um processo, e como tal, exigiria a presença constante de uma causa, mas a ideia de movimento enquanto estado, concepção que permitiu a criação da lei de Inércia, o estado de movimento ou de repouso de um corpo permanece inalterado se não for perturbado por uma ação externa. Lembremos que a história é não linear e na Idade Média as concepções baseadas em um Cosmos hierarquizado foram bastante influentes; deste modo as contribuições de Galileu, Descartes e Newton ainda demandariam muitos séculos para emergir. Sobre este argumento, ver (Costa de Lucena; Monteiro; Bastos Filho, 2024).

No seu *Diálogo*, Galileu envida muitos esforços para desconstruir o éter de Aristóteles procedendo assim a uma importante e, até certo ponto inusitada, inversão

¹⁶ Aussi croyons-nous, que l'attitude intellectuelle de la science classique pourrait être caractérisée par ces deux moments, étroitement liés d'ailleurs: géométrisation de l'espace et dissolution du Cosmos, c'est-à-dire disparition, à l'intérieur du raisonnement scientifique, de toute considération à partir du Cosmos; substitution à l'espace concret de la physique galiléenne de l'espace abstrait de la géométrie euclidienne. C'est cette substitution qui permet l'invention de la loi d'inertie (Koyré, 1966, p. 15).

epistêmica. É, pois, necessário compreender o sentido profundo dessa inversão que enseja muitos significados.

Vejamos a seguinte passagem do *Diálogo* que constitui uma das falas do personagem *Sagredo*: “E que maior estultícia se pode imaginar que aquela que chama coisas preciosas as joias, a prata e o ouro, e vilíssimas a terra e o barro?” (Galilei, 2004, p. 139 [originalmente publicado em italiano em 1632]). Galileu, por meio de *Sagredo*, vai considerar uma estultícia, ou seja, uma insensatez, atribuir às joias, à prata e ao ouro, pelo fato de resistirem à degradação ao longo do tempo como coisas mais nobres e por isso representando a qualidade de *etéreas*, em detrimento mesmo de coisas como a terra e o barro consideradas como meramente mundanas e de valor vil. Ora, o fenômeno da vida requer necessariamente terra e barro diferentemente das joias chamadas de preciosas as quais, a despeito de seu caráter durável, não são imprescindíveis para os organismos vivos assim como terra e barro o são. Galileu revela-se, -desculpando-nos pelo aparente ou real anacronismo-, como um ecólogo, um ambientalista, um defensor da biodiversidade. Assim, ao desconstruir a qualidade do etéreo de Aristóteles e ressaltar o valor do mundo da vida e proceder a essa inversão epistêmica, Galileu também vai na contramão de sua própria ciência e da ciência de seu pôstero ilustre Isaac Newton. A ciência física na trilha de Galileu e Newton e de seus sucessores que abstraem todas as dissipações e o calor geram um novo “éter” que é o da conservação da energia mecânica. Desta forma Prigogine e Stengers (Prigogine; Stengers, 1984) argumentam que: “Por isso, a natureza concebida sob o modelo do sistema dinâmico nada mais podia ser que uma natureza estranha ao homem que a descreve” (Prigogine; Stengers, 1984, p. 205).

Prigogine e Stengers argumentam que vários ramos da física, como a ciência newtoniana e inclusive a revolucionária mecânica quântica, exceção feita à termodinâmica com o conceito de entropia que expressa a irreversibilidade dos fenômenos reais, se inscrevem no contexto de uma ciência do **Ser** e assim haveria necessidade de se construir uma ciência dos fenômenos irreversíveis, ou seja uma ciência do **Devir**. Em outras palavras, uma ciência do Ser, considera leis determinísticas, reversibilidade, sistemas isolados e estáveis, enquanto uma ciência do Devir, melhor se caracteriza pela reversibilidade, a instabilidade dos sistemas e a emergência.

Retornando ao argumento de Galileu mediante a fala de *Sagredo* podemos ter uma visão precursora dessa luminosa ideia já há dois séculos antes da formulação do conceito de entropia; vejamos a passagem:

Os que exaltam tanto a incorruptibilidade, a inalterabilidade etc. acreditam que se limitam a dizer essas coisas pelo imenso desejo de viver muito e pelo terror que têm da morte; e não consideram que se os homens fossem imortais, não caberia a eles vir ao mundo. Bem que eles mereceriam encontrar-se com a cabeça de Medusa, que os transformasse em estátuas de calcário ou diamante, para se tornarem mais perfeitos do que são (Galilei, 2004, p. 139-140 [originalmente publicado em italiano em 1632]).

A frase ‘*se os homens fossem imortais, não caberia vir ao mundo*’ é a expressão da impossibilidade de que se fôssemos constituídos de uma substância inalterável ou, em outras palavras, se fossemos como as estátuas, então isso não nos permitiria nem viver nem pensar pois a vida necessariamente requer a irreversibilidade pois é a irreversibilidade, ou seja o *Devir*, é o que nos provê tanto a vida quanto o pensamento. É precisamente nesse ponto que Prigogine e Stengers argumentaram em prol do papel crucial desempenhado pela irreversibilidade e como essa desempenha, além de uma natureza em desenvolvimento de qualidades novas, também um papel criativo propiciado pela entropia. Prigogine (1980) vai além ao reivindicar um papel construtivo dos sistemas dissipativos representados pelos fenômenos fora do equilíbrio termodinâmico. Voltando a Galileu, é interessante também notar que no *Diálogo* a fala do personagem *Sagredo*, representando o homem culto do Renascimento, será complementada com a veia irônica do personagem *Salviati*, que representa o próprio mestre florentino; nessa fala complementar *Salviati* diz com toda a ironia fina galileana: “E quem sabe se uma tal metamorfose não lhes traria uma vantagem; porque acredito que seja melhor não falar, que falar às avessas” (Galilei, 2004, p. 140 [originalmente publicado em italiano em 1632]). A passagem precedente tem o significado de admitir uma concessão plena de ironia como a que pode ser expressa assim: se eles querem virar estátuas para serem perfeitos e etéreos a fim de escapar da morte, pelo menos isso lhes daria a vantagem de não falar, isto é, de não viver nem pensar- o que lhes pouparia o desgosto e a decepção de expressar tantas ideias tolas.

Evidentemente, Galileu morreu no século XVII no ano de 1642 e não é o autor, nem poderia sê-lo, do conceito de entropia que emergiu como conceito da Física com Clausius e outros no século XIX no contexto da construção da termodinâmica

(Cavagnoli, 2025), mas Galileu pode ser considerado, em que pese ter construído uma ciência do **Ser**, também como um visionário/precursor de uma ciência do **Devir**.

Mas a ciência construída por Galileu e por Newton - uma ciência do **Ser** - gerou um certo desencantamento o que pode ser depreendido de uma passagem estupenda de Burtt (Burtt, 1983):

A versão gloriosamente romântica do universo de Dante e Milton, que não estabelecia limites para a imaginação do homem, enquanto brincava com o espaço e o tempo, tinha agora sido abandonada. O espaço identificava-se com o domínio da geometria, o tempo com a continuidade do número. O mundo em que as pessoas imaginavam-se vivendo -um mundo rico de cores e som, impregnado de fragrâncias, cheio de prazer, amor e beleza, mostrando por toda a parte harmonia de objetivos e ideais criativos- era agora comprimido em cantos diminutos dos cérebros dos seres orgânicos. O mundo exterior realmente importante era um mundo duro, frio, sem cor, quieto e morto; um mundo de quantidade, um mundo de movimentos matemáticos computáveis, com regularidade mecânica. O mundo de qualidades, percebido imediatamente pelo homem, tornou-se só um efeito curioso e menor da máquina infinita e superior. Em Newton, a metafísica cartesiana, interpretada ambigamente, e destituída de sua clara pretensão a considerações filosóficas sérias, finalmente derrubou o aristotelismo e tornou-se a visão do mundo predominantemente nos tempos modernos (Burtt, 1983, p. 188 [originalmente publicado em inglês em 1931]).

Este parecer de Burtt, ao mesmo tempo espetacular e arrasador, teve grande influência em correntes filosóficas não científicas e em outros círculos de opinião que representavam um certo sentimento de revolta contra a ciência baseado em reações neorromânticas, algumas das quais até mesmo negacionistas, mas nem todas, ver (Alves de Araújo, 2013; Alves de Araujo; Bastos Filho, 2013a; 2018). Quando transposta para o ambiente escolar, essa análise torna-se particularmente relevante; pois é comum que estudantes e mesmo alguns professores sintam-se alheios ao mundo descrito nas aulas de ciências, como se este lhes fosse estranho e/ou inacessível. Nesse contexto, é fundamental pensarmos em formas de reencantar o mundo, integrando ao ensino científico as dimensões estética, ética e cultural da ciência como parte da experiência humana.

4 SOBRE A NATUREZA DO ESPAÇO

Como pudemos notar ao longo dessa discussão, o confronto entre as concepções de espaço em autores como Aristóteles e Eratóstenes é especialmente

instrutivo e epistemologicamente fértil para nos mostrar que ao nos debruçarmos sobre o tema da *natureza do espaço* estamos no caminho justo que consiste na adoção de um expediente pedagógico de valor, se aquilo que quisermos é propiciar abrangência discursiva em prol de ressaltar o ensino de ciências enquanto atividade cultural relevante para os nossos estudantes e o mesmo se dá para a atividade *stricto sensu* da própria ciência. No caso de Aristóteles, o espaço, dividido entre sublunar e supralunar, é um espaço hierárquico, no qual cada um possui propriedades e valores ontológicos distintos, enquanto o espaço concebido por Eratóstenes é geométrico, isto é, um espaço para o qual não existem pontos privilegiados, é homogêneo e contínuo.

Uma discussão abrangente sobre a natureza do espaço perpassa os campos da ciência, da arte e da filosofia e até mesmo da religião. Galileu^{17 18}, por exemplo, em sua famosa carta escrita para a Cristina de Lorena envida esforços para desconstruir uma leitura literal da Bíblia e argumenta, seguindo ideias precedentes de um famoso cardeal, Cesare Baronio, que a Bíblia nos ensina a ir para o Céu (salvação) enquanto a astronomia nos ensina como é o Céu (estrutura do cosmos). Podemos interpretar essa famosa passagem da seguinte maneira: a natureza do céu de que trata a astronomia pertence ao mundo natural enquanto a natureza do Céu da religião pertence ao mundo sobrenatural e a Bíblia diz respeito a esse Céu sobrenatural e não a respeito do céu da astronomia.

Se nos ativermos ao mundo da ciência, ou seja, ao mundo natural, a questão da natureza do espaço se complexificou sobremaneira com o advento das geometrias não euclidianas¹⁹. A teoria da gravitação universal de Newton, por exemplo, se assenta nos pressupostos para os quais subjazem um tipo de espaço, enquanto a teoria da gravitação universal de Einstein, que no fundo constitui a sua teoria da

¹⁷ “Eu direi aqui o que ouvi de uma pessoa eclesiástica constituída em grau eminentíssimo, isto é, que a intenção do Espírito Santo é ensinar-nos como se vai para o céu e não como vai o céu” (Galilei, 1988, p. 52 [escrita originalmente em 1615]).

¹⁸ “Io qui direi quello che intesi da persona ecclesiastica costituita in eminentissimo grado, cioè l'intenzione dello Spirito Santo essere d'insegnarci come si vada al cielo, e non come vadia il Cielo” (Galilei, 1993, p. 22).

¹⁹ Na medida em que caracterizamos a geometria euclidiana como aquela para a qual a soma dos ângulos internos de um triângulo qualquer seja igual a 180 graus, também podemos caracterizar as geometrias não euclidianas como aquelas para as quais a soma de seus correspondentes ângulos internos seja diferente de 180 graus. No caso das geometrias não euclidianas que tratam de espaços de curvatura positiva essa soma é maior que 180 graus e no caso de espaços de curvatura negativa é menor que 180 graus.

relatividade geral, se assenta em pressupostos para os quais subjazem um outro tipo de espaço. Einstein considerou a ambos os tipos como livres criações do espírito humano na sua tentativa de descrever e investigar a realidade física. A propósito, seja a seguinte citação primorosa de Einstein no livro de Max Jammer que se dedica à história complexa do conceito de espaço:

Esse dois tipos de espaço podem ser contrastados como segue: (a) espaço enquanto qualidade posicional dos objetos materiais no mundo; (b) espaço enquanto recipiente de todos os objetos materiais. No caso (a), espaço sem objeto material é inconcebível. No caso (b), um objeto material pode apenas ser concebido enquanto existente no espaço; espaço então aparece enquanto uma realidade que em certo sentido é superior ao mundo material. Ambos os conceitos de espaço são livres criações da imaginação humana, enquanto meios concebidos para facilitar a compreensão da nossa experiência dos sentidos (Einstein, prefácio, In: Jammer, 1970)²⁰.

Interpretar o primoroso excerto deste prefácio que Einstein escreveu para o livro de Jammer é sobremaneira esclarecedor. Vejamos como: segundo o conceito (a) que se refere a um tipo de espaço correlacional, não há qualquer sentido se considerar um espaço no qual não haja qualquer objeto material. De acordo com essa concepção, somente há razão para a constituição de espaço se necessariamente admitirmos a natureza correlacional implicada pelos objetos materiais; em outras palavras, desaparecendo os objetos materiais, também desaparece o espaço. Segundo a conceito (b), e diferentemente do conceito (a), é perfeitamente possível se conceber um espaço no qual os objetos materiais foram retirados deste, mas não é possível conceber os objetos materiais independentemente do espaço; o espaço, na concepção (b), portanto, adquire uma primazia em relação aos objetos materiais; na concepção (a) não existe essa primazia.

A partir desse importante excerto do prefácio de Einstein no livro de Jammer (Jammer, 1970), no qual é proposto um contraste entre espaço relativístico e o espaço absoluto, sendo ao último conferido um estatuto de primazia em relação aos objetos, buscaremos refletir sobre o espaço educacional, compreendido aqui como um ambiente onde ocorrem os processos de ensino e aprendizagem. Nessa proposta,

²⁰ These two concepts of space may be contrasted as follows: (a) space as positional quality of the world of material objects; (b) space as container of all material objects. In case (a), space without a material object is inconceivable. In case (b), a material object can only be conceived as existing in space; space then appears as a reality which in a certain sense is superior to the material world. Both space concepts are free creations of the human imagination, means devised for easier comprehension of our sense experience (Einstein, foreword, In: Jammer, 1970).

buscamos apresentar uma analogia entre os dois campos, respectivamente, da física e da educação, a partir dos dois grandes conceitos de espaço em cima dos quais Einstein se debruçou.

4.1 ESPAÇO EDUCACIONAL POSICIONAL – MODELO (A)

Nesta concepção, o espaço só faz sentido em relação aos objetos que nele estão; ou seja, não há primazia entre espaço e objetos materiais, ou ainda, um deles somente se constitui enquanto tal quando necessariamente está relacionado ao outro. Transposto para o campo educacional, esse conceito remete a uma ideia de espaço escolar que seja correlacional e dinâmico, que só adquire sentido a partir das interações humanas e pedagógicas que nele ocorrem. O espaço educacional, nesse caso, é criado em sinergia tanto por professores quanto por estudantes e por meio de saberes e práticas pedagógicas. Ele é fluido, mutável e depende da presença e da ação dos sujeitos – como uma sala de aula que se transforma na medida em que os processos se desenvolvem. Uma biblioteca escolar que só se torna um verdadeiro espaço de aprendizagem quando os estudantes a frequentam, usam seus recursos, interagem com os livros e entre si. Sem essas interações, o espaço existe fisicamente, mas não como *espaço educacional* pleno.

4.2 ESPAÇO EDUCACIONAL ABSOLUTO - MODELO (B)

Num espaço independente dos objetos, ele existe como uma estrutura fixa, um tipo de palco onde os eventos acontecem. Remetendo ao contexto educacional, essa analogia corresponde a uma concepção estrutural e institucionalizada do espaço escolar – a escola enquanto prédio, com salas, corredores, horários rígidos, normas e disciplinas. Enquanto espaço absoluto, ele precede e contém os sujeitos, moldando e determinando suas ações e experiências. Como exemplo ilustrativo, podemos pensar na organização física e normativa de uma escola tradicional; nela cada aluno tem um lugar pré-determinado para sentar-se, o conteúdo é transmitido, e esse espaço é pensado para impor certa lógica de comportamento e de aprendizagem.

4.3 CONFRONTANDO AS CONCEPÇÕES DE ESPAÇO EDUCACIONAL (A) E (B)

Recorrendo mais uma vez ao excerto de Einstein, quando afirma que ambos os conceitos de espaço são criações da imaginação humana, o espaço educacional também pode ser visto como uma construção histórica, social e cultural e, como tal, é algo além de uma estrutura física ou institucional; em outras palavras, esse espaço educacional é mais adequada e coerentemente pensado como uma criação simbólica e correlacional cujo objetivo é de facilitar a compreensão e a mediação da experiência educativa, portanto, mais afeito à concepção (a). Nesse sentido, podemos dizer que um espaço educacional correlacional é uma estrutura com mais condições de valorizar o contexto, a experiência individual e coletiva e as interações discursivas²¹; portanto, é um espaço que emerge da prática pedagógica. Por outro lado, o espaço educacional absoluto melhor descreve uma estrutura formal da escola, em seus aspectos físicos e normativos, que são anteriores à ação dos sujeitos. E assim, nesse contexto (b), é esperado que os sujeitos se comportem de acordo com as normas rígidas institucionalizadas.

O espaço educacional absoluto, como aqui definido, representa a estrutura educacional que Paulo Freire (Freire, 1987) nomeava como educação bancária, como um espaço onde os sujeitos, independentemente da sua história, da sua cultura e experiência, eram alocados como recipientes de conhecimentos sobre os quais não havia qualquer traço de sua realidade. Em oposição, o educador, defendia a educação como uma ação de diálogo, onde ensinar e aprender são processos nos quais os alunos e os professores aprendem juntos, por meio da problematização da realidade e da transformação mútua dos sujeitos, como na concepção de um espaço educacional correlacional.

²¹ “E é por meio da linguagem e das interações discursivas que professores e alunos constroem as bases para um ensino cuja proposta privilegie a Ciência como uma cultura e vise à Alfabetização Científica” (Souza; Sasseron, 2012).

4.4 O ENSINO DE CIÊNCIAS NUMA PERSPECTIVA DOS CONCEITOS DE ESPAÇO RELATIVÍSTICO E ABSOLUTO

Os conceitos de espaço enquanto qualidade posicional dos objetos materiais no mundo e espaço enquanto recipiente de todos os objetos materiais, que Einstein considerou como livres criações do espírito humano, foram até então apresentados como metáforas para discussões sobre os espaços educacionais. Agora eles serão empregados para procedermos análises sobre os modelos de ensino de ciências. Como o ensino de ciências possui especificidades didáticas e metodológicas que permitem um amplo espectro de possibilidades para os arranjos das estratégias didáticas, consideraremos, a título de organização de nossas discussões, dois extremos, que a título de discussão, serão por nós nomeados por: modelo tradicional de ensino de ciências (espaço absoluto) e modelo interativo e investigativo de ciências (espaço relativístico/correlacional).

4.4.1 Modelo tradicional de ensino de ciências (espaço absoluto)

Neste modelo, o ensino é estruturado a partir de um espaço educacional rígido, pré-definido e hierárquico, na medida em que esse espaço tem primazia sobre o que ele pode conter ou não. A aula de Ciências acontece em um "lugar" onde o conhecimento científico é considerado pronto, absoluto, objetivo e neutro, e o professor é o detentor do saber, transmitindo-o aos alunos.

Um modelo tradicional de ensino de ciências é estruturado a partir de três preceitos: i) o professor é detentor do conhecimento; funciona como uma autoridade no assunto que será transmitido aos alunos; ii) os conteúdos já estão prontos, foram produzidos por gênios e estão organizados em currículos e iii) os alunos devem assumir uma postura passiva durante as aulas. Ao observarmos estes aspectos e outros comuns nesse modelo de ensino é possível acentuarmos semelhanças ao espaço de ensino absoluto, que é: independente dos sujeitos (professor/aluno); pré-existente e indiferente às interações; os alunos são posicionados como receptores passivos; e o conteúdo é considerado desvinculado das experiências dos estudantes.

Nesse modelo, o ensino se torna conteudista, fragmentado, e os estudantes têm pouca ou nenhuma discussão sobre a construção do conhecimento. O espaço de

ensino e aprendizagem é um recipiente neutro no qual os sujeitos "entram", passam a fazer parte, para receber instruções. Um ensino desta forma, além de não contribuir para o aprendizado dos conteúdos conceituais de ciências, também não possibilitam discussões que favoreçam a melhoria das concepções dos estudantes sobre como o conhecimento científico se desenvolve (Adúriz-Bravo et al., 2023, Mendoça; Justi, 2013).

4.4.2 Modelo interativo e investigativo de ensino de ciências (espaço relativístico/correlacional)

Por outro lado, quando o ensino de Ciências se baseia em abordagens investigativas, dialógicas e contextualizadas com episódios da história da ciência (Carvalho, 2018), o espaço educacional se transforma em algo dinâmico e construído de maneira compartilhada pelos sujeitos da educação. A aula passa a ser um evento relacional, em que ensinar e aprender são processos que se complementam mutuamente.

Numa aproximação ao espaço relativístico de Einstein, podemos destacar que a situação de ensino passa a fazer sentido a partir das relações entre os sujeitos e o objeto da aprendizagem. A aprendizagem dos alunos emerge das interações discursivas entre os alunos, destes e seus conhecimentos prévios e o material disponibilizado (Sasseron, 2013). O professor tem como papel central o de manter em alto nível as interações discursivas, permitindo que o espaço da aula se transforme a partir das práticas, interesses e experiências dos alunos. Ou seja, o espaço da aula de Ciências se torna um local de experimentação, de escuta ativa e de construção coletiva do conhecimento. É um espaço vivo, no qual se aprende fazendo perguntas, propondo hipóteses, debatendo e refletindo sobre a realidade.

Acreditamos que quando empregamos os conceitos que estruturam o pensamento físico para fomentar discussões sobre o espaço educacional, podemos ampliar o debate e mostrar como as condições epistemológicas e espaciais influenciam diretamente a maneira como o conhecimento se desenvolve e pode ser compreendido pelo aluno. Essa reflexão pode inclusive fundamentar propostas de formação docente, revisão curricular ou reorganização do espaço escolar físico e simbólico, especialmente se articulado a temas como a Natureza da Ciência,

alfabetização científica, ou práticas investigativas no ensino de ciências. E, principalmente, é coerente com a nossa defesa de um ensino de ciências como prática cultural, que promova, além do aprendizado dos conceitos, a contribuição para o encantamento do mundo e para que os alunos se sintam tanto pertencentes a ele quanto cocriadores de suas representações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O que poderíamos concluir a partir da reflexão teórica expressa ao longo do presente artigo? Em primeiro lugar deveremos dizer, com a devida ênfase, que se ficarmos restritos ao cálculo simples, até mesmo simplório, de lavra estritamente geométrica, implicado pela medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria no século III a. C., então o episódio não passaria de um exercício simples para o ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio). Alguns estudantes poderiam até mesmo rir de sua enorme facilidade como ironizar aqueles que ainda professariam o retrocesso da concepção de “terra plana”. Subjaz a uma tal postura, uma concepção de anacronismo, tão combatida por várias correntes de historiadores, na medida em que estaríamos cometendo um disparate ao julgar um grandioso feito cognitivo da humanidade à luz de um conhecimento e de uma percepção bastante limitada dos dias de hoje, o que seria uma atitude ingênua e, mais do que isso, uma atitude equivocada. Tal não se passa quando o episódio em pauta constitui ponto de partida para suscitar uma questão importantíssima como a da *natureza do espaço*.

Pensamos que quando a partir de um episódio importante da história da ciência o contextualizamos de maneira ampla ao trazer à baila a questão epistemológica da natureza do espaço estamos articulando também o método de conexões que produzem significação com o método das Reconstruções Racionais Didáticas, reconstruções essas que estejam atentas a evitar anacronismos e, tudo isso visando favorecer um ensino de ciências rico em conceitos, significações e ressignificações. Argumentamos que tudo isso favorece a autonomia intelectual dos sujeitos da educação em sinergia uns com os outros.

Explorar o episódio no contexto da discussão sobre a natureza do espaço, permite, além disso, discutir questões como as inversões epistêmicas tais como as de Galileu, os conceitos de Ser e de Devir, as questões relacionadas com o

“estranhamento do mundo” e do “desencantamento do mundo” entre outras o que torna o ensino de ciências mais interessante e entusiasta.

Uma abordagem do gênero suscita, na linha dos argumentos de Galileu em seu famoso *Diálogo* e na linha dos argumentos de Prigogine e Stengers, sobre a questão da Irreversibilidade dos fenômenos naturais, uma discussão sobre o que caracterizaria uma Física do **Ser** em comparação com uma Física do **Devir**.

Ainda como possibilidades de exploração envolvendo as categorias de **Ser** e de **Devir** e de suas inversões epistêmicas, diríamos que elas podem ensejar teores discursivos tanto de caráter interno quanto de caráter externo como o estranhamento e o desencantamento que os conceitos frios e puramente matemáticos causaram em um mundo cheio de cores e sabores tal como Burtt tão bem argumentou. Paralelamente a isso, nós enquanto professores devemos evitar que os nossos estudantes não sejam capazes de contextualizar o material que veiculamos durante os nossos cursos. O oceano de falta de significado tão criticado como aqueles presentes em ensinos estritamente operacionais e descontextualizados deve ser enfaticamente evitado e para tal deveremos envidar coletivamente esforços para que tanto os nossos professores e os nossos estudantes não se sintam como estranhos em um mundo que descrevem, ou ainda pior, em um mundo em que supostamente descrevem. Acreditamos que o exercício de ensejar conexões a partir da conquista cognitiva da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria seja uma possibilidade concreta para que o ensino, e ainda mais geralmente a educação científica, sejam plenamente significativas. E aqui concluímos o presente ensaio.

6 REFERÊNCIAS

ADÚRIZ-BRAVO, A.; ALZATE QUINTERO, G. C.; PUJALTE, A. P.; ALZATE, O. E. T. Concepções de ensino sobre a natureza da ciência: obstáculos epistemológicos que aparecem entre os professores de ciências. *Revista Internacional de Pesquisa em Didática das Ciências e Matemática*, [S. l.], p. e023004, 2023. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/revin/article/view/872>. Acesso em: 18 maio 2025.

ALVES DE ARAÚJO, E. S. **O desencantamento do mundo:** uma reflexão necessária para o ensino de ciências e matemática. 2013. 75f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Educação, Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática - PPGECIM/UFAL, Maceió, 2013.

ALVES DE ARAÚJO, E. S.; BASTOS FILHO, J. B. Mundo da magia e dos mitos foi desencantado pelo império da matemática? **Revista Eletrônica de Educação de Alagoas**, v. 01, n. 02, p. 44-58, 2013. Disponível em: <https://www.educacao.al.gov.br/documentos?task=download.send&id=566&catid=337&m=0>. Acesso em: 01 maio 2025.

ALVES DE ARAÚJO, E. S.; BASTOS FILHO, J. B. Desencantamento do Mundo e a Educação Científica: Desafios para o Ensino de Ciências. In: FOLENA ARAÚJO, M. L.; NUNES MOREIRA, C. (org.). **Ensino de ciências e biologia: reflexões em torno da formação de professores, da prática docente e da educação ambiental**. Recife: EDUFRPE, p. 13-44, 2018.

ARISTOTELES. **Obras**. Traducción del griego, estudio preliminar, preámbulos y notas por Francisco de P. Samarach, Madrid: Aguilar, 1964.

ARISTOTELES. **Del Cielo**. Traducción del griego, estudio preliminar, preámbulos y notas por Francisco de P. Samarach, Madrid: Aguilar, p.707-778, 1964.

BACHELARD, G. **A Formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto Editora Ltda, tradução de Estela dos Santos Abreu, 1a. edição, maio de 1996, 5a. reimpressão, janeiro de 2005. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fis2008/Bachelard1996.pdf>. Acesso em: 01 maio 2025.

BURTT, E. A. **As bases metafísicas da ciência moderna**. Tradução de José Viegas Filho e Orlando Araújo Henriques; revisão técnica de Paulo César de Moraes. Brasília: Editora da Universidade de Brasília UnB, 1983.

CARVALHO, A. M. P. Fundamentos teóricos e metodológicos do ensino por investigação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 18, n. 03, p. 765-794, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2018183765>. Acesso em: 18 maio 2025.

CAVAGNOLI, R. Breve história da termodinâmica (i): máquinas térmicas e a revolução industrial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 47, e20240367-12, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0367>. Acesso em: 21 maio 2025.

COSTA DE LUCENA, M. P.; MONTEIRO, M. A.; BASTOS FILHO, J. B. Lei de Inércia como divisor de águas na história da ciência ocidental: uma possível argumentação. In: BARROS, M. A.; BASTOS FILHO, J. B.; CAMPOS, A. (org.). **Pesquisas em ensino de física: múltiplos olhares**. Campina Grande: EDUEPB, 2024. cap. 3. Disponível em: <https://eduepb.uepb.edu.br/publicacoes-2024/>. Acesso em: 02 maio 2025.

EINSTEIN, A. Foreword. In: **Concepts of Space**: the history of theories of space in physics. 2. ed. Cambridge Massachusetts: Harvard University Press, 1970.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido**. 17^a ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983.

GALILEI, G. **Duas novas ciências**. Tradução e notas de Letízio Mariconda e Pablo R. Mariconda. São Paulo: Nova Stella Editorial; São Paulo: Ched Editorial; São Paulo: Istituto Italiano di Cultura, 1984.

GALILEI, G. Carta à senhora Cristina de Lorena, Grã-Duquesa Mãe de Toscana (1616). In: **Ciência e fé**. Tradução de Carlos Arthur R. do Nascimento, Rio de Janeiro: Museu de Astronomia, Istituto Italiano di Cultura, Nova Stella, 1988, p. 41-81.

GALILEI, G. **Lettere a Cristina di Lorena**. 1a. edizione. Roma: Carlo Mancosu Editore, 1993.

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dos máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano**. Tradução: Introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. 2. ed. São Paulo: Discurso editorial/Imprensa Oficial, 2004.

JAMMER, M., **Concepts of space**: the history of theories of space in physics. 2. ed. Cambridge Massachusetts: Harvard University Press, 1970.

KOYRÉ, A. **Études galiléennes**. Paris: Hermann, 1966.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. Tradução de Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva, 1978.

MENDONÇA, P. C. C.; JUSTI, R. S. Ensino-aprendizagem de ciências e argumentação: discussões e questões atuais. **Revista Brasileira em Educação em Ciências**, v. 13, n. 01, p. 187 – 216, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4257/2822>. Acesso em: 18 maio 2025.

PRIGOGINE, I. **From being to becoming**. S. Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança**: metamorfose da ciência. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trincheira e revisão de João Pedro Mendes. Brasília: editora da UnB, 1984.

SASSERON, L. H. Interações discursivas e investigação em sala de aula: o papel do professor. In: CARVALHO, A. M. P. (org.) **Ensino de Ciências por investigação**: condições para implementação em sala de aula. São Paulo: Cengage Learning, p. 41 – 61, 2013.

SOUZA, V. F. M.; SASSERON, L. H. As interações discursivas no ensino de física: a promoção da discussão pelo professor e a alfabetização científica dos alunos. **Ciência & Educação**, v. 18, n. 13, p. 593 – 611, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ciedu/a/mgrcsn7H6687QB9y6w8qvHz/?format=pdf&utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 19 maio 2025.

CAPÍTULO 3/ ARTIGO 3

O ENSINO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL À LUZ DOS MÉTODOS COMBINADOS

DAS CONEXÕES CONCEITUAIS E DAS RECONSTRUÇÕES RACIONAIS

DIDÁTICAS

1 INTRODUÇÃO

Em janeiro de 1970 na cidade de São Paulo, no campus da Universidade de São Paulo (USP), foi realizado sob o patrocínio da Sociedade Brasileira de Física (SBF), aquele que é considerado o 1º congresso daquela entidade científica, e que se caracterizou por se constituir um congresso histórico e importante, entre essas e outras razões, pelo seu pioneirismo. Tratava-se do *Simpósio Nacional de Ensino de Física*. Em uma passagem da intervenção da Professora Beatriz Alvarenga (1923-2023) que rememorou uma opinião do Prof. Feynman, ela assim se manifestou:

[...] o Prof. Feynman, em 1963, abrindo a 1ª Conferência Interamericana sobre Ensino de Física, dava a sua opinião: “o problema de ensinar Física na América Latina é apenas parte de um problema maior, que é o de ensinar Física em qualquer lugar que, aliás, está incluído num problema mais amplo, que é o de ensinar qualquer coisa em qualquer lugar e para o qual não é conhecida uma solução satisfatória” (Simpósio Nacional de Ensino de Física, 1970, p. 15-16).

Infere-se daí a constatação da complexidade do processo de ensino de qualquer coisa e, no que se refere ao ensino de ciências, podemos aduzir mais alguns ingredientes dessa complexidade, pois eles são por demais evidentes. Hoje em dia, passadas várias décadas de constatação do empreendimento complexo que é o ensino de Física, bem como do ensino de qualquer outra área do conhecimento, seja ela científica ou não, e a despeito das novas tecnologias digitais, Inteligência Artificial etc., advindas de desenvolvimentos ocorridos durante todas essas décadas subsequentes, diríamos que tal complexidade não parece ter diminuído e até mesmo, podemos dizer, a despeito dos progressos alcançados, que os desafios se tornaram ainda mais intensos.

Partindo da constatação de que para problemas complexos não existem soluções simples, então podemos asseverar que em amplos setores da atividade pedagógica ainda persiste um certo grau de fragmentação cognitiva que pode

obstaculizar, ainda que parcialmente, por parte dos estudantes e inclusive dos professores, a análise judiciosa e aprofundada de algum episódio da história da ciência, no que se refere às possibilidades de empreender conexões conceituais com outras áreas do conhecimento ensejando, a partir de então, significados e ressignificados. É precisamente aí que argumentamos que um ensino de ciências que incorpore uma combinação dos métodos das conexões conceituais com o método das reconstruções racionais didáticas desempenha um papel muito importante para ensejar a produção de significados e ressignificados o que contribui sobremaneira para a formação do educando tanto intelectualmente quanto de sua vida enquanto cidadão.

Se o ensino de algo em algum dado lugar é parte de um problema ainda mais geral de se ensinar qualquer que seja esse algo em qualquer que seja o lugar e, acrescentemos, sob quaisquer que sejam as circunstâncias em que nos deparamos, então a própria complexidade de **como ensinar** se manifesta de maneira nua e crua. O mínimo que podemos dizer quanto a esse respeito é que não há uma solução geral que possa vir a se constituir uma panaceia para algo tão difícil, senão impossível, de se controlar como o ensino, crítico, penetrante, criativo e eficaz de qualquer assunto.

E para ressaltar o caráter eternamente controverso dessa constatação seja a epígrafe que foi escolhida para o livro de Elkana (Elkana, 1977): “No reino do pensamento humano em geral, e na ciência física em particular, os conceitos mais fecundos são aqueles para os quais é impossível associar um **significado** bem definido” (Kramers, 1977, epígrafe a Elkana, 1977; os grifos em negrito foram acrescentados por nós).

Aqui, atenção especial deve ser dirigida à palavra **significado** e não é por outra razão que em artigos recentes alguns autores têm se debruçado no foco da produção de significados a partir de episódios singulares e importantes da história da ciência ao combinar o *método das conexões cognitivas entre campos do saber* e o *método das reconstruções racionais didáticas*, sendo que ambas as abordagens contemplam inevitavelmente um viés epistemológico (Gomes dos Santos; Bastos Filho, 2025a; 2025b).

Cada contexto, seja ele marcado por condições materiais precárias, pela diversidade cultural dos estudantes ou pelo impacto das tecnologias, exige respostas singulares e não repetíveis. A crença em receitas universais, longe de resolver, pode

obscurecer os reais desafios. O ensino que se pretende crítico, penetrante, criativo e eficaz só pode se constituir no entrecruzamento entre conhecimento, contexto e intencionalidade pedagógica. Crítico, quando conduz à reflexão sobre o mundo; penetrante, quando ultrapassa a superfície dos fatos e busca compreensões mais profundas; criativo, quando abre espaço para novas formas de pensar; e eficaz, quando realmente contribui para a formação de sujeitos autônomos e cidadãos plenos. Reconhecer que não há fórmulas acabadas para o ensino não significa resignação, mas sim abertura para práticas inventivas, contextualizadas e permanentemente em construção.

Uma vez isso posto, podemos ampliar tal abordagem metodológica não mais elegendo como foco meramente um episódio singular da história da ciência envolvendo potenciais conexões, e sim, generalizando para um conjunto complexo de episódios que constitui um processo histórico que perpassa pelo menos dois séculos – notadamente os séculos XVI e XVII – como a **Revolução Científica** protagonizada por grandes pensadores entre os quais, mais emblematicamente, Copérnico (1473 - 1543), Galileu (1564 - 1642), Kepler (1571 - 1630) e Newton (1642 - 1726). Nesse percurso, as ideias do heliocentrismo copernicano se entrelaçam com a mecânica de Galileu, que por sua vez dialogam com as leis do movimento dos planetas formuladas por Kepler e encontram síntese na unificação newtoniana. Assim, o ensino deixa de se restringir a um recorte episódico e se abre para um horizonte mais complexo, que, embora mais desafiador, revela-se também mais fértil enquanto potencial gerador de significados e ressignificados, permitindo aos estudantes compreenderem a ciência como processo em construção, permeado de controvérsias, rupturas e reelaborações.

Dito isto, apresentamos a seguinte questão orientadora:

Como a integração entre conexões conceituais e reconstruções racionais didáticas, aplicadas a episódios históricos da ciência, pode contribuir para superar a fragmentação cognitiva e promover a produção de significados no ensino de ciências?

Objetivo geral

Investigar de que maneira a combinação dos métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas, aplicada ao estudo de episódios

históricos da ciência, em especial àqueles da Revolução Científica dos séculos XVI e XVII, pode favorecer a superação da fragmentação cognitiva e potencializar a produção de significados e ressignificados, contribuindo para uma formação científica crítica, criativa e cidadã.

A fim de alcançarmos o objetivo proposto e apresentarmos uma resposta à questão levantada, este estudo encontra-se organizado nas seguintes seções: na seção 2 intitulada *Aspectos do pensamento newtoniano*, buscamos apresentar a originalidade do pensamento de Newton o que resultou numa nova forma de fazer ciência; na seção 3 intitulada *Como contornar os obstáculos em situações de ensino sobre o tema gravitação?* argumentamos que uma abordagem de ensino a partir de conexões conceituais e da reconstrução racional didática favorecem a superação de obstáculos que podem surgir durante o ensino de gravitação; na seção 4 intitulada *Uma reconstrução racional didática da gravitação universal*, mostramos, passo a passo, como a reconstrução racional didática favorece a compreensão da unificação newtoniana da física terrestre (Galileu) com a física celeste (Kepler) à luz da lei universal da gravitação, fundamentada na constante G; na mesma seção, propomos uma mapa conceitual que ajuda a representar e compreender as relações matemáticas e conceituais envolvidas na reconstrução racional didática da unificação newtoniana e por último, apresentamos na seção 5, as considerações finais.

2 ASPECTOS DO PENSAMENTO NEWTONIANO

No ensino de gravitação é importante que alguns aspectos do pensamento de Newton sejam explorados, mesmo que pontualmente, principalmente, quando se deseja desenvolver um ensino que promova a construção de significados e de ressignificados. Como quaisquer análises penetrantes debruçadas sobre aspectos significativos de quaisquer um dos personagens que participaram da Revolução Científica dos séculos XVI e XVII requerem um tempo considerável de trabalho e reflexão, então centremos a nossa atenção para a complexidade de apenas alguns aspectos do pensamento newtoniano levantando argumentos que julgamos consistentes sem, contudo, ceder à tentação de uma análise aligeirada.

Comecemos pelo Prefácio de Newton escrito para a primeira edição dos *Principia*:

Já que os antigos (como nos diz *Pappus*²²) consideravam a ciência da mecânica da maior importância na investigação das coisas naturais, e os modernos, rejeitando formas substanciais e qualidades ocultas, têm-se esforçado para sujeitar os fenômenos da natureza às leis da matemática, cultivei a matemática, neste tratado, no que ela se relaciona à filosofia (Newton, 2023, p. 13, Prefácio à 1^a ed. dos *Principia*, 1990, originalmente escrito em 8 de maio de 1686).

Newton, já nesta primeira frase, delimita o teor de seu tratado, tanto ao se inspirar nos antigos, os quais, a exemplo de Pappus, reputavam a ciência da mecânica como “*da maior importância na investigação das coisas naturais*”, quanto no que concerne à rejeição dos modernos às considerações que envolvessem “*formas substanciais e qualidades ocultas*”; em suma, o teor de seu tratado é o dos princípios matemáticos da filosofia, isto é, o da filosofia natural, no caso específico, tal como é concebida hoje em dia, o da filosofia natural enquanto física. Dito em outras palavras, a adoção consiste em **não** incorporar categorias conceituais como *substâncias* nem como *qualidades ocultas* e sim como *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* como expressa o título deste que é um dos livros mais importantes até então escritos.

Ao se debruçar sobre os fenômenos naturais, a aderência de Newton aos Princípios Matemáticos parece unir seu pensamento tanto ao de Galileu do Grande Livro da Natureza, quanto ao de Descartes do Deus Geômetra, quanto ainda ao pensamento de Leibniz. Inclusive, como constatação deste fato, Hestenes (1992) destaca que as concepções que levaram às “leis de Newton” só foram possíveis graças a um conjunto de invenções conceituais anteriores, a saber: (1) a geometria euclidiana, que define o conceito de espaço; (2) o conceito de aceleração, empregado pela primeira vez por Galileu na análise do movimento; (3) a geometria analítica, inventada por Descartes para representar curvas geométricas por equações algébricas; e (4) o cálculo diferencial, a invenção matemática de Newton e Leibniz que provou ser essencial não apenas para formular as leis de Newton, mas também para aplicá-las.

Diríamos que, em que pese haver convergências, há também diferenças importantes. Para nos restringirmos somente à crítica de Leibniz a Newton, diríamos

²² Pappus de Alexandria (290 - 350) foi um dos últimos grandes matemáticos da Antiguidade, autor da *Coleção Matemática (Synagoge)*, obra em oito livros que reuniu, preservou e comentou importantes resultados de Euclides, Arquimedes e Apolônio (Eves, 2004).

que este autor criticou a redução da Filosofia Natural (leia-se Física) aos Princípios Matemáticos adicionando a necessidade de, além de contemplá-los, também de contemplar os Princípios Metafísicos como o Princípio da Razão Suficiente segundo o qual *nada acontece sem que haja uma razão para isso ser assim e não de qualquer outro modo*. Ora, o Princípio da Razão Suficiente é um Princípio Causal, mas, pelo que podemos conceber, a Causa adotada por Newton é enfocada na sua **Força**, causa eficiente de todos os movimentos naturais, diferentemente de Leibniz que enfoca muita mais na Causa enquanto intimamente conectada com a conservação da sua **vis viva**. Para dar uma ideia mais ampla, no Escólio Geral dos *Principia*, Newton não apela para Causas Finais quando se refere aos seus Princípios Matemáticos de Filosofia Natural, o que pode ser inferido da seguinte passagem:

[...] muito menos, temos qualquer ideia da substância de Deus. Nós o conhecemos somente por suas invenções mais sábias e excelentes das coisas e pelas causas finais; o admiramos por suas perfeições; mas o reverenciamos e adoramos por causa de seu domínio: pois nós o adoramos como seus serventes; e um deus sem domínio, providência e causas finais não é nada além de Destino e Natureza. (Newton, 1987, p. 169, Escólio Geral dos *Principia*).

Concluímos daí que a sua exclusão de quaisquer causas finais de suas considerações na abordagem dos princípios matemáticos se atém meramente à causa eficiente centrada em sua força.

Para finalizar a presente seção, vamos reproduzir uma famosa citação de Newton ao longo de seu Escólio Geral dos *Principia* na qual o seu método é delineado:

Mas até aqui não fui capaz de descobrir a causa dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e não construo nenhuma hipótese; pois tudo que não é deduzido dos fenômenos deve ser chamado uma hipótese; e as hipóteses, quer metafísicas ou físicas, quer de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental. Nessa filosofia as proposições particulares são inferidas dos fenômenos, e depois tornadas gerais por indução (Newton, 1987, p. 170, Escólio Geral dos *Principia*).

No excerto precedente, Newton se refere ao seu famoso “não faço hipóteses” e também que todo o seu empreendimento em filosofia natural (para nós, física) é tal que parte diretamente dos fenômenos e, a partir de então, por meio da indução, ele obtém os seus resultados inclusive no que se refere à gravidade.

A partir da breve análise, realizada nesta seção, sobre o teor do tratado de Newton, consideramos que o aspecto mais evidente é em relação ao emprego da matemática para representar os fenômenos naturais. No entanto, a postura de adotar os princípios matemáticos, o que configura um importante passo para configurar a ciência que conhecemos atualmente, quando analisado sob o ponto de vista dos processos de ensino e aprendizagem de física, apresenta-se como um obstáculo ao aprendizado, haja vista, que o ensino fragmentado, com foco apenas em modelos matemáticos, notoriamente, não motiva os estudantes nem proporciona o aprendizado rico conceitualmente.

3 COMO CONTORNAR OS OBSTÁCULOS EM SITUAÇÕES DE ENSINO SOBRE O TEMA DA GRAVITAÇÃO?

Muitos comentadores teceram muitas considerações no que concerne à ênfase newtoniana segundo a qual ao longo dos *Principia* ele se ateve aos princípios matemáticos e que sua **força** é uma categoria conceitual central na estrutura de seu pensamento. Muitas considerações foram também tecidas sobre significados de seu famoso "*Hypotheses non fingo*" (não faço hipóteses).

Tais aspectos, frequentemente discutidos no campo da História e Filosofia da Ciência, quando consideramos os obstáculos que emergem no ensino da gravitação trazem implicações diretas para a forma como professores e estudantes compreendem o fenômeno gravitacional. Nesta subseção, portanto, buscamos analisar como essas considerações podem ser mobilizadas em situações de ensino, de modo a favorecer a superação de concepções espontâneas e a construção de significados mais robustos acerca da teoria da gravitação.

Sobre o suposto caráter indutivo de sua Física houve críticos entre os quais Popper (1974a; 1974b; 1982).

Em relação à crítica popperiana a uma suposta inferência indutiva da teoria de Kepler para a teoria de Newton, Popper assim se expressou:

Para qualquer sistema de *dois* corpos dos quais um muito pesado, e o outro de peso desprezível, podemos derivar as três leis de Kepler da teoria de Newton e consequentemente explicá-las. Mas, desde que Kepler formulou suas leis para um sistema de muitos corpos consistindo do somatório de vários planetas, elas são, do ponto de vista da teoria de Newton, inválidas. Assim,

essas leis não poderiam constituir um sistema seja parcial seja total de premissas (indutivas ou dedutivas) da teoria de Newton (Popper, 1982, p. 24, Prefácio à edição brasileira).

Interpretando o excerto popperiano acima, poderíamos concluir que também uma passagem indutiva da teoria de Kepler para a teoria de Newton não seria sustentável logicamente pois seria estranho que a partir da premissa de uma espécie de harmonia de muitos corpos viéssemos a concluir pela ação mútua de dois corpos, tomados dois a dois.

Podemos, muito brevemente, resumir o argumento de Popper contra a indução da seguinte maneira: a inferência newtoniana a fim de obter a lei da gravitação universal não poderia ser do tipo indutivo, pois se concebermos por indução a possibilidade de passar de teorias particulares, válidas dentro de certos domínios, para obter uma teoria geral, válida para qualquer domínio, então isso nos levaria a uma contradição. Essa contradição se manifesta da seguinte maneira: a lei de Galileu da queda livre assevera que a pequenas alturas comparativamente ao raio da Terra, os corpos caem com aceleração constante; no entanto, se lançarmos mão da lei da gravitação universal de Newton para estudar a queda livre, então a aceleração aumenta durante a queda na medida em que a lei do inverso do quadrado da distância nos mostra que o denominador correspondente diminui. Ora, não podemos logicamente partir da premissa de que a aceleração seja constante durante a queda para concluir que ela aumenta durante a queda; logo a inferência indutiva (passagem do particular ao geral) não se sustenta. No entanto, o caminho inverso se sustenta, pois, a partir do resultado segundo o qual a aceleração aumenta durante a queda, podemos verificar que esse aumento é tão pequeno que, em ótima aproximação, podemos considerá-lo, para todos os propósitos práticos, como constante. Situação análoga acontece quando se passa da astronomia de Kepler para a teoria da gravitação universal de Newton (Bastos Filho, 1995; 2012; 2018).

Sobre os processos mentais de Newton para a obtenção de sua lei da gravitação universal, se indutivo, dedutivo, abdutivo, ou de quaisquer outras formas ou de combinação complexa de formas, trata-se de assunto controverso se pertencente ao campo da psicologia, ao campo da educação científica ou a condicionantes externos de lavra socioeconômico-cultural. Atribuir a inspiração newtoniana a um *insight* abdutivo devido a uma suposta queda de uma maçã tem sido

criticada por educadores e filósofos como elemento que distorce a característica social da natureza da ciência além de implantar mitos nas cabeças dos estudantes.

A questão sobre se Newton foi ou não indutivo não deve ser encarada apenas como uma disputa historiográfica ou filosófica; ela tem implicações diretas para o ensino da teoria da gravitação universal. Quando o ensino apresenta Newton como um cientista que, a partir de observações particulares, como a queda de uma maçã ou as leis de Kepler, chegou indutivamente à lei da gravitação universal, corre-se o risco de reforçar visões simplificadas e até míticas sobre a produção do conhecimento científico. Por outro lado, ao problematizar essa interpretação, pode-se abrir espaço para que os estudantes compreendam a ciência como uma atividade criativa, que envolve idealizações matemáticas, construções teóricas e constantes revisões conceituais (Winkelmann, 2023). Inclusive, segundo Cohen (1981), o método usado por Newton, em essência, consiste em comparar repetidamente o mundo real com uma representação matemática dele.

Nesse sentido, a crítica de Popper à indução pode ser mobilizada pedagogicamente para mostrar que a teoria da gravitação não emerge de uma mera acumulação de dados, mas de um processo complexo de modelagem (Hestenes, 1992) e de diálogo entre hipóteses e evidências, o que contribui para o desenvolvimento de uma visão mais crítica e sofisticada da natureza da ciência em sala de aula.

A noção de obstáculo epistemológico, proposta por Bachelard (1996), oferece um referencial fecundo para refletir sobre os desafios do ensino de ciências em geral e da gravitação em particular. Assim como os contemporâneos de Newton enfrentaram dificuldades em aceitar a teoria da gravitação universal devido às concepções prévias que possuíam sobre o movimento e a ação das forças, os estudantes, em sala de aula, também se deparam com barreiras semelhantes. Suas ideias, construídas, na maioria das vezes, a partir da experiência cotidiana, podem tanto favorecer a aprendizagem ao servir como ponto de partida para a construção do novo conhecimento, quanto atuar como entraves, ao cristalizar concepções que dificultam a assimilação de explicações científicas mais elaboradas.

Segundo Cohen (1981), durante muito tempo, assim como Descartes e Huygens, Newton ao estudar os movimentos circulares, atribuía o movimento à influência de uma força centrífuga; e que apenas com a mudança de perspectiva da

força centrífuga para a centrípeta, veio a compreensão do papel fundamental do corpo central. O professor, deve ficar atento, pois ao apresentar o movimento circular de um corpo, assim como aconteceu com figuras ilustres da história da ciência, as experiências prévias dos estudantes podem levá-los a conceber a ação de força que impele o corpo para fora e não para o centro.

Nessa perspectiva, uma abordagem construtivista reconhece a importância dos conhecimentos prévios no processo de ensino e aprendizagem. Eles se apresentam, simultaneamente, como estruturas de ancoragem para a integração de novas informações e como potenciais obstáculos que precisam ser problematizados e ressignificados. O papel do professor, portanto, é criar condições para que tais concepções possam ser explicitadas, confrontadas e reelaboradas em direção a significados mais próximos do conhecimento científico.

Nesse sentido, estratégias didáticas baseadas no **método das conexões conceituais** e nas **reconstruções racionais didáticas** de episódios da história da ciência oferecem caminhos promissores. Ao mobilizar relações entre filosofia, história e ciência, entre outras áreas, tais estratégias permitem que os estudantes compreendam a gênese e a evolução dos conceitos, identificando também os obstáculos enfrentados pelos próprios cientistas. Esse movimento favorece a superação de concepções alternativas, uma vez que promove um diálogo entre as ideias prévias dos alunos e a racionalidade científica, tornando o processo de aprendizagem mais significativo e historicamente fundamentado (Silva, 2008).

Cohen (1981) e Hestenes (1992) argumentam que Newton foi um grande mestre do jogo da modelagem. Temos a intenção de explorar essas ideias à luz de uma reconstrução racional didática inspirada na modelagem de Mario Bunge (Bunge, 1974), como já foi dito, combinada com o método das conexões conceituais.

Mäntylä e Koponen (2007), definem Reconstruções Racionais Didáticas como sendo o uso da história da ciência como um ponto de partida para desenvolver e projetar soluções didáticas. Imaginem, por exemplo, que o professor de física deseje construir uma sequência didática para trabalhar com os estudantes a teoria da Gravitação Universal de Newton. Assim, ele poderá apresentar as Leis de Kepler, situando os trabalhos do cientista na história e até, apresentando nomes e um contexto social, cultural, econômico e político do período, mas seu interesse, é no produto, nas Leis de Kepler. No entanto, suas interpretações da história serão a partir

de concepções modernas, até porque, segundo Mäntylä e Koponen (2007), o objetivo é ensinar física, não a história da física. O professor usará informações que não estavam disponíveis para Kepler, principalmente, as modernas técnicas matemáticas e concepções epistemológicas. Johannes Kepler, desenvolveu suas leis no século XVI, mas, podemos interpretar e reconstruir suas ideias usando a epistemologia dos modelos científicos de Mario Bunge (Bunge, 1960, 1974), por exemplo, ou qualquer outra epistemologia que for julgada mais adequada didaticamente e até mesmo, de maior compreensão por parte dos professores.

4. UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DIDÁTICA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Nesta seção, usaremos as considerações apresentadas nas seções anteriores sobre os aspectos do pensamento newtoniano e considerações sobre a potencialidade presente em reconstruções racionais didáticas para explicitar e promover a superação de obstáculos cognitivos, além dos aspectos históricos sobre o desenvolvimento da gravitação para propormos uma reconstrução racional didática deste que é um dos episódios mais importantes da história da ciência.

De modo geral, também estamos considerando as etapas propostas por Bunge (1960, 1974, 1985) quanto da elaboração de modelos representativos de aspectos da realidade. As escolhermos propor uma reconstrução racional da gravitação universal à luz da epistemologia de Bunge (1960, 1974, 1985), fazemos, também, sobre duas considerações, sendo uma epistemológica, segundo a qual Newton fez modelagem ao elaborar a síntese da gravitação universal (Cohen, 1981; Hestenes, 1992); e outra, didática, apoiada nos resultados de Brandão (2012), Heidemann (2015) e Oliveira (2018), sobre as contribuições de atividades de modelagem para a aprendizagem de conceitos científicos e sobre a natureza do conhecimento científico.

4.1 PASSOS PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA RRD

Passo 1 (Pressuposto newtoniano): O pressuposto central e necessário da presente modelização que constitui uma reconstrução racional didática da teoria da gravitação universal de Newton é que devemos partir da lei geral segundo a qual quaisquer duas massas do universo M_1 e M_2 interagem entre si com forças mútuas

que são proporcionais ao produto das duas massas interagentes e inversamente proporcionais ao quadrado da distância $R_{1,2}$, entre os centros de massas dessas massas. Necessariamente teremos que pressupor que esta lei contenha uma constante de proporcionalidade G que é **universal**.

A lei geral e, também universal é:

$$F = G(M_1 M_2) / (R_{1,2})^2 \quad (1)$$

Passo 2 (Pressuposto galileano): Os movimentos locais à la Galileu são descritos por cada uma das constantes g que expressam cada uma das acelerações das respectivas quedas livres nos respectivos astros, por exemplo, na Terra, na Lua, em Saturno, em Júpiter, em Io, em Reia, e assim por diante. Essas respectivas acelerações são características particulares de cada astro de per si e **não são universais**

Passo 3 (Pressuposto kepleriano): De maneira análoga, os astros que orbitam em torno de um dado astro central obedecem às leis de Kepler e cada conjunto de tais movimentos são caracterizados por cada constante K correspondente a esse conjunto. Cada um desses K , correspondentes a cada um de tais conjuntos, **não é universal**.

Passo 4: Como consequência lógica da necessária universalidade de G estabelecemos vínculos matemáticos que ligam a teoria da gravitação universal de Newton tanto à teoria dos movimentos locais de Galileu quanto à astronomia de Kepler e enfim propiciando de maneira didática **o significado da unificação newtoniana**.

Passo 5: Apresentamos, enfim, um Mapa Conceitual que pode ser interpretado à luz das categorias conceituais intervenientes no processo de modelização do tipo reconstrução racional didático com viés epistemológico que propicia uma compreensão do teor dessa importante teoria unificadora.

4.2 UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DIDÁTICA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

A reconstrução racional didática aqui apresentada tem como objetivo propor uma racionalidade à luz da construção de modelos; mas também permitir que conexões conceituais sejam criadas entre outras áreas do conhecimento, como

filosofia, história, matemática, por exemplo. Assim, na prática, em sala de aula, o professor tem condições de propor problemas que sejam resolvidos segundo a construção de modelos didáticos que sejam compatíveis com a teoria da gravitação universal, assim como, instigar discussões a partir de conexões conceituais.

Combinar estes métodos, permite que a construção de significados aconteça tanto a partir de conexões conceituais, que necessitam de uma maior base de conhecimento por parte dos estudantes e professores, como a partir do processo de modelagem proposto segundo o qual o desenvolvimento da gravitação universal foi seguido, a partir da resolução de vários problemas de modelagem (Cohen, 1981).

Abaixo, serão apresentadas as etapas por nós organizadas segundo a reconstrução racional didática proposta.

4.2.1 A física dos movimentos locais de Galileu

A física dos movimentos locais de Galileu constitui uma cinemática na qual estão envolvidos os conceitos de espaço, de tempo, bem como de conceitos desses decorrentes que são a velocidade, enquanto variação temporal do espaço, e a aceleração, enquanto variação temporal da velocidade.

A lei da queda livre constitui um resultado importante da física dos movimentos locais de Galileu e pode ser enunciada como segue: o espaço h percorrido por um corpo em queda livre é proporcional ao quadrado do tempo de queda t ; a constante de proporcionalidade $\left(\frac{1}{2}\right)g$ corresponde à metade do valor da aceleração constante com a qual todos os corpos caem nas proximidades da superfície da Terra; em linguagem de geometria analítica, que constitui uma algebrização da geometria dos gregos, a lei da queda livre assume a seguinte forma:

$$h = \left(\frac{1}{2}\right)gt^2 \quad (2)$$

Duas breves observações são ainda pertinentes antes de concluirmos a presente seção: a primeira observação diz respeito ao caráter segundo o qual são abstraídos quaisquer efeitos dissipativos devido à resistência do ar; a lei vale para a queda de uma tonelada de batata tanto quanto vale para a queda de uma pequena

pena de galinha quando ambos os objetos são submetidos à queda livre; este importante fato tem significativo valor epistemológico pois a realidade de que trata a lei é uma realidade pensada segundo a diretriz *contradizer a realidade imediata (realidade meramente sensível) para melhor descrever uma realidade pensada idealmente*. Par ter uma ideia da pertinência dessa adoção epistemológica, mesmo em um contexto empírico sofisticado, há um experimento famoso em uma câmara de altíssimo vácuo no qual esses fatos são comprovados com precisão, o que mostra que o ideal (real pensado) quando bem-feito pode superar as possibilidades intelectuais circunscritas meramente ao real imediato (Leopardi; Bastos Filho, 2014). Na Lua, por exemplo, não há atmosfera e quem foi lá pôde comprovar tudo isso; a segunda observação diz respeito que aqui o domínio se circunscreve meramente ao espaço – temporal – isto é, um domínio da cinemática, e não se fala de categorias conceituais newtonianas dinâmicas como Massa **M** e Força **F**.

4.2.2 A teoria da aceleração centrípeta

Ainda trabalhando no domínio de uma Física dos movimentos para os quais somente relações espaço-temporais puras são envolvidas então passemos ao estudo do conceito de aceleração centrípeta para o caso do movimento circular uniforme. Imaginemos que uma criança acione mediante um fio uma pedra presa na extremidade de uma corda e que o movimento seja circular e uniforme.

Se **R** for o comprimento da corda, então podemos calcular a velocidade com a qual a pedra gira em torno da mão da criança lançando mão da fórmula

$$|V| = (2\pi|R|)/T \quad (3)$$

Na fórmula precedente, a quantidade $2\pi|R|$ corresponde ao espaço percorrido pela pedra ao cabo de uma volta completa e **T** é o tempo demandado para percorrer essa volta.

A velocidade da pedra, se fosse vista meramente como uma grandeza escalar, então ela seria uma constante para o movimento circular uniforme; no entanto, enquanto vetor velocidade, embora mantendo, em módulo, o seu valor constante, ela varia de direção durante o movimento circular uniforme. Deste modo, como

aceleração significa variação temporal de velocidade e como a velocidade vetorial varia constantemente de direção durante a volta, então há uma aceleração mesmo se, em módulo, a velocidade for mantida constante.

A aceleração correspondente é:

$$|\mathbf{a}| = (2\pi|V|)/T \quad (4)$$

Substituindo (3) em (4) então obtemos,

$$|\mathbf{a}| = \left\{ \frac{2\pi \left(\frac{2\pi|R|}{T} \right)}{T} \right\} = \frac{4\pi^2|R|}{T^2} = \frac{|V|^2}{R} \quad (5)$$

4.2.3 Conectando a teoria gravitacional de Newton com a teoria de Galileu

Vamos proceder agora a uma conexão entre as teorias de Newton e de Galileu. Como pudemos constatar a teoria dos movimentos locais de Galileu constitui uma cinemática, enquanto a teoria gravitacional de Newton é uma dinâmica na qual estão presentes os conceitos de Massa \mathbf{M} , e de Força \mathbf{F} , esta última definida como variação temporal do momento linear $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$, sendo $\mathbf{p} = \mathbf{M}\mathbf{V}$, onde \mathbf{p} denota momento linear e \mathbf{V} a velocidade.

Cogitemos de estudar o fenômeno da queda livre à luz da lei de Galileu (2) inserindo os conceitos newtonianos de Massa \mathbf{M} e de Força \mathbf{F} ; para a força teremos:

$$\mathbf{F} = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt} \right) = \frac{d(\mathbf{M}\mathbf{V})}{dt} = \left(\frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \mathbf{V} + \left(\frac{d\mathbf{V}}{dt} \right) \mathbf{M} \quad (6)$$

Como estamos supondo que o corpo cadente não varia a sua massa durante a queda então $\left(\frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) = \mathbf{0}$ ($d\mathbf{M}/dt = \mathbf{0}$); logo, para o nosso caso

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \left(\frac{d\mathbf{V}}{dt} \right) = \mathbf{M}\mathbf{a} \quad (7)$$

Estudando a queda livre à luz da teoria de Galileu acrescentada com dois ingredientes que são os conceitos newtonianos de massa e de força então podemos dizer que a força que age sobre o corpo cadente de massa M é igual a

$$F = Ma = Mg \quad (8)$$

Estudando a queda livre à luz da teoria de Newton então a força que age sobre o corpo cadente é:

$$F = G(MM_{Terra})/(R_{Geométrico\ da\ Terra} + h)^2 \quad (9)$$

Aqui, a distância entre o centro de massa da Terra e centro de massa do objeto cadente aqui suposto, por simplicidade como pontual, é ($R_{Geométrico\ da\ Terra} + h$).

Cogitemos agora de comparar as fórmulas (8) e (9). Ora, a força em (8) é constante enquanto a força em (9) aumenta durante a queda uma vez que a altura h diminui. No entanto se procedermos a uma aproximação segundo a qual o raio geométrico da Terra é muito maior que a altura da qual o objeto cai

$$R_{Geométrico\ da\ Terra} \gg h \quad (10)$$

, então podemos escrever nessa aproximação que

$$F \approx G(MM_{Terra})/(R_{Terra})^2 \quad (11)$$

Desde que (8) e (11) se referem a forças constantes, então podemos compará-las; no entanto, persiste ainda uma questão conceitual de grande importância que é necessário esclarecer: a fórmula (8) diz respeito a uma *massa de natureza inercial* enquanto a fórmula (11) diz respeito a uma *massa de natureza gravitacional*. Deste modo, ao igualarmos (8) a (11) nós estamos asseverando que a *massa de natureza inercial do objeto cadente é rigorosamente igual à massa de natureza gravitacional desse mesmo objeto*, e assim,

$$M_{gravitacional} = M_{inercial} \quad (12)$$

Igualando (8) a (11) em vista da igualdade entre as massas, inercial e gravitacional, obtemos o importante vínculo matemático

$$G = [g_{Terra}(R_{geométrico})^2]/M_{Terra} \quad (13)$$

4.2.4 Análise do vínculo entre as teorias de Newton e de Galileu

Fixemos a nossa atenção no vínculo expresso pela fórmula (13). Ora, G é uma grandeza universal enquanto as três quantidades expressas no segundo membro de (13) são todas elas particulares e características da Terra e somente da Terra. A única maneira de se compatibilizar logicamente os dois membros de (13) e mantendo-se o pressuposto da universalidade de G é concluir que a relação matemática correspondente é universal e ela é expressa por três quantidades não universais quais sejam a aceleração local da Terra, o raio geométrico da Terra e a massa da Terra. Isso necessariamente acarreta que:

$$\begin{aligned} G &= \{[g_{Terra}(R_{geométrico da Terra})^2]/M_{Terra}\} = \\ &= \{[g_{Lua}(R_{geométrico da Lua})^2]/M_{Lua}\} = \\ &= \{[g_{Júpiter}(R_{geométrico de Júpiter})^2]/M_{Júpiter}\} = \\ &= \{[g_{Saturno}(R_{geométrico de Saturno})^2]/M_{Saturno}\} = \\ &= \{[g_{Io}(R_{geométrico de Io})^2]/M_{Io}\} = \\ &= \{[g_{Reia}(R_{geométrico de Reia})^2]/M_{Reia}\} = \dots \quad (14) \end{aligned}$$

A fórmula (14) pode ser convenientemente reescrita como

$$G = [g_a(R_a)^2]/M_a \quad (15)$$

, onde g_a é a aceleração da gravidade local do astro a, R_a é o raio geométrico do astro a e M_a é a massa do astro a.

Debrucemo-nos agora sobre considerações relativas à astronomia de Kepler.

4.2.5 As leis de Kepler

As três leis de Kepler rezam do seguinte teor: a primeira expressa que os planetas giram em torno do Sol em órbitas elípticas, sendo que o Sol está situado em um dos focos; a segunda expressa que o raio vetor ligando planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais; a terceira assevera que a razão entre o cubo do semieixo maior e o quadrado do período da órbita de qualquer planeta é uma constante, independentemente de planeta.

Matematicamente, a terceira lei é expressa como:

$$K = (R_{\text{semieixo maior}})^3/T^2 \quad (16)$$

Trabalhando na aproximação da elipse para a circunferência, uma vez que a circunferência é um caso particular da elipse quando os dois focos coincidem, então o semieixo maior se reduz ao próprio raio da órbita e assim, podemos escrever nessa aproximação

$$K = R^3/T^2 \quad (17)$$

, onde R em (17) é o próprio raio da órbita do planeta em tela.

4.2.6 Uma hipótese muito ousada aproximando a física terrestre da física celeste

Quando nos debruçamos sobre o cálculo da aceleração central (ou centrípeta) que age sobre uma pedra quando essa é acionada por uma criança em um movimento circular uniforme, chegamos à expressão (5)

Cogitemos agora acerca da validade de estender esse cálculo para o caso do planeta que gira em torno do Sol em um movimento, para os nossos propósitos aqui, suposto como sendo circular e uniforme. Em outras palavras os papéis respectivamente desempenhados pela criança e pela pedra são substituídos pelos respectivos papéis desempenhados pelo Sol e pelo planeta. Assim, a aceleração central, ou centrípeta, que age sobre o planeta é

$$a_{\text{Plan}} = 4\pi^2 R_{\text{P,S}}/T^2 \quad (18)$$

, onde $R_{P,S}$ denota o raio da órbita do planeta ao redor do Sol e T o seu período, ou seja, o tempo demandado para realizar uma volta completa em torno do Sol. Substituindo (17) com $R = R_{P,S}$, em (18), então obtemos:

$$a_{Plan} = 4\pi^2 K / (R_{P,S})^2 \quad (19)$$

Este resultado é muito importante e significa que se admitirmos a analogia {criança-pedra} → {Sol-planeta}, ou seja, a partir da validade da teoria da aceleração centrípeta para o movimento da pedra em movimento circular uniforme em torno da criança e o estendermos para o movimento do planeta em torno do Sol, adicionando a isso também a validade da terceira lei de Kepler, então chegamos à conclusão segundo a qual *a aceleração centrípeta que age sobre o planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol*.

Ainda, se quisermos passar da cinemática ensejada pela astronomia kepleriana para a dinâmica newtoniana à luz de (7), então teremos para a força centrípeta que age sobre o planeta

$$F_{Plan} = M_{Plan} 4\pi^2 K / (R_{P,S})^2 \quad (20)$$

Assim, chegamos ao resultado segundo o qual a força centrípeta que age sobre o planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol. Devemos ressaltar com todas as letras que essa lei do inverso do quadrado da distância não é universal e tem validade apenas para o planeta e difere qualitativamente da lei universal de Newton que tem validade universal.

4.2.7 Conectando a teoria gravitacional de Newton com a astronomia de Kepler

Para conectar a teoria de Newton à teoria de Kepler deveremos supor que a força centrípeta que age sobre o planeta seja a própria força gravitacional universal de Newton, logo devemos igualar (20) à fórmula

$$F_{Plan} = GM_{Sol}M_{Plan} / (R_{P,S})^2 \quad (21)$$

Igualando (20) a (21) e admitindo que a força de natureza gravitacional seja igual a força de natureza inercial e, também, que a massa de natureza inercial do planeta seja igual a sua massa de natureza gravitacional, então chegamos ao importante resultado;

$$(G/4\pi^2) = (K/M_{Sol}) \quad (22)$$

Escrevendo de uma maneira mais conveniente a expressão (22), temos

$$(G/4\pi^2) = (K_{Plan}/M_{Sol}) \quad (23)$$

A expressão (23) constitui o vínculo que liga a teoria gravitacional de Newton à astronomia kepleriana e a análise correspondente é de grande importância.

4.2.8 Análise do vínculo entre a teoria de Newton e a teoria de Kepler

De maneira análoga ao que procedemos quando discutimos o vínculo matemático ligando as teorias de Newton e de Galileu, discutamos agora o vínculo matemático entre as teorias de Newton e de Kepler.

De (23) podemos ver que o primeiro membro é universal na medida em que não apenas o G é universal como o são igualmente universais os números 4 e π . Como consequência lógica disso, então obtemos,

$$\left(\frac{K_{Plan}}{M_{Sol}}\right) = \left(\frac{K_{Lua}}{M_{Terra}}\right) = \left(\frac{K_{Io}}{M_{Júpiter}}\right) = \left(\frac{K_{Reia}}{M_{Saturno}}\right) = \dots \quad (24)$$

, e de uma maneira mais concisa podemos escrever

$$G/4\pi^2) = (K_{Satélites}/M_{Corpo\ central}) \quad (25)$$

, onde na expressão (25) o $K_{Satélites}$ se refere ao K de Kepler válido para todos os satélites que giram em torno de um corpo central de massa $M_{Corpo\ central}$. Agora já nos encontramos aptos para discutir a unificação newtoniana.

4.2.9 Caminhando para a unificação

Tendo em vista o que discutimos até então, já nos encontramos aptos para calcular a aceleração da gravidade local em nosso planeta Terra à luz dos vínculos expressos por (15) e (25) e de dados astronômicos. Vejamos como:

Reescrevemos (15) mais convenientemente como

$$g_a = GM_a/(R_a)^2 \quad (26)$$

O nosso astro **a** será aqui na nossa escolha a Terra. Assim, substituindo o valor de G em (25) considerando $K_{Satéletes}$ o K_{Lua} e $M_{Corpo central}$ a massa da Terra M_{Terra} , então obteremos para (26)

$$g_{Terra} = 4\pi^2 \left(\frac{K_{Lua}}{M_{Terra}} \right) \frac{M_{Terra}}{(R_{geom\ Terra})^2}$$

Tendo em vista que pela terceira lei de Kepler teremos

$$K_{Lua} = (R_{orb.\ Lua})^3/(T_{orb.\ Lua})^2$$

, e substituindo esta última na penúltima, teremos,

$$g_{Terra} = 4\pi^2 \{ [(R_{orb.\ Lua})^3/(T_{orb.\ Lua})^2] / (R_{geom.\ Terra})^2 \}$$

Rearrumando a expressão acima ao multiplicar ambos, numerador e denominador, por $R_{geom.\ Terra}$, então obteremos,

$$g_{Terra} = [4\pi^2/(T_{orb.\ Lua})^2] (R_{orb.\ Lua}/R_{geom.\ Terra})^3 R_{geom.\ Terra}$$

Todos as quantidades são conhecidas numericamente. Por exemplo, os astrônomos conhecem há muito que a razão entre o raio orbital da Lua em torno da Terra é 60 vezes maior que o raio geométrico da Terra, logo a quantidade $(R_{orb.\ Lua}/R_{geom.\ Terra})^3$ vale $(60)^3$; $(\pi)^2$ vale $(3,14)^2$; o raio geométrico da Terra pode

ser estimado em $6,4 \times 10^6$ metros; e o quadrado do período orbital da Lua em torno da Terra pode ser estimado como sendo em torno de $(27 \text{ dias})^2 = (27 \times 24 \times 3.600)^2$ segundos. Calculando tudo isso, obtemos,

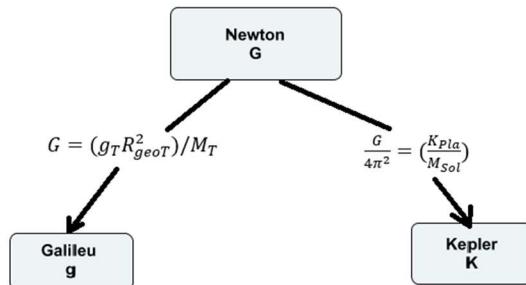
$$g_{\text{Terra}} \approx 9,8 \text{ m/s}^2$$

4.3 MAPA CONCEITUAL E CATEGORIAS CONCEITUAIS ENVOLVIDAS

A estrutura dessa modelagem que ao mesmo tempo também é uma reconstrução racional didática com viés epistemológico pode ser disposta por meio de um mapa conceitual que exibe as relações matemáticas que permitem conectar a teoria de Newton com as teorias, respectivamente de Galileu e de Kepler.

As categorias conceituais podem ser conectadas conceitualmente e várias questões podem ser levantadas para discussão.

Figura 1 - Mapa conceitual da unificação newtoniana



Fonte: autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta apresentada ao longo deste trabalho buscou articular dimensões históricas, epistemológicas e didáticas do ensino de ciências, mais especificamente do ensino sobre a teoria da gravitação universal de Newton, de modo a suscitar discussões sobre a riqueza conceitual, que constitui um complexo campo conceitual.

Partindo do reconhecimento da complexidade inerente ao ensino de qualquer área do conhecimento e, particularmente, ao ensino de Física, argumentou-se que a combinação dos métodos das conexões conceituais com o das reconstruções racionais didáticas (RRD) constitui um caminho promissor para enfrentar a fragmentação cognitiva ainda persistente nos processos de ensino e aprendizagem.

Ao explorar a gênese e o desenvolvimento das ideias que culminaram na unificação newtoniana, procurou-se demonstrar que o ensino da gravitação pode (e deve) ser mais do que a simples transmissão de leis e fórmulas. Trata-se de uma oportunidade privilegiada para reconstruir racionalmente o percurso intelectual que levou da física de Galileu, essencialmente terrestre, e da astronomia de Kepler à dinâmica de Newton, de modo que os estudantes compreendam a ciência como um processo de construção histórica, de elaboração de modelos e diálogo entre conceitos. Essa abordagem, ao colocar em evidência as tensões, as rupturas e as reelaborações próprias do pensamento científico, permite superar visões simplificadas ou míticas da atividade científica e amplia a possibilidade de produção de significados e ressignificados.

A reconstrução racional didática aqui delineada não pretende reproduzir a história da ciência de modo literal, como uma história real que é algo impossível, mas utilizá-la como instrumento epistemológico e pedagógico para promover aprendizagens significativas. Ao reinterpretar episódios históricos à luz de epistemologias contemporâneas, como a teoria da construção de modelos científicos de Mario Bunge (Bunge, 1960, 1974), o professor pode elaborar sequências didáticas que conectem os diferentes níveis conceituais da Física, desde a observação empírica até a formulação teórica, de modo coerente e contextualizado.

Do ponto de vista pedagógico, essa estratégia contribui para que os alunos percebam que a ciência não é uma coleção de verdades prontas, mas uma atividade humana em permanente construção. Ao mesmo tempo, favorece o desenvolvimento de competências cognitivas e críticas fundamentais para a formação científica e cidadã: argumentação, reflexão epistemológica, compreensão de modelos e reconhecimento do papel da abstração e da idealização na construção do conhecimento.

Em síntese, o percurso realizado neste artigo reforça a ideia de que o ensino de ciências requer não apenas domínio conceitual, mas também intencionalidade

epistemológica e sensibilidade histórica. A integração entre conexões conceituais e reconstruções racionais didáticas se mostra, assim, uma via fecunda para promover aprendizagens mais profundas, articuladas e significativas. Mais do que ensinar a “lei da gravitação universal”, trata-se de criar condições para que os estudantes pensem universalmente, compreendendo a unidade do conhecimento científico e a diversidade de caminhos que conduzem à sua construção.

Por fim, cabe destacar que o presente estudo não se encerra em si mesmo. Ele abre perspectivas para investigações futuras voltadas à aplicação empírica dessa proposta em contextos reais de sala de aula, buscando avaliar como a articulação entre história, epistemologia e didática pode efetivamente contribuir para a formação de professores e para o aprimoramento das práticas pedagógicas em ensino de ciências.

6 REFERÊNCIAS

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Tradução de Estela dos Santos Abreu. 1. ed. (5. reimpr.). Rio de Janeiro: Contraponto Editora Ltda, 1996. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fis2008/Bachelard1996.pdf>. Acesso em: 01 maio 2025.

BASTOS FILHO, J. B. A unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler à luz da crítica popperiana à indução. **Rev. Bras. Fís.**, v. 17, n.3, p. 233-242, set. 1995. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a28.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2025.

BASTOS FILHO, J. B. Qual história e qual filosofia da ciência são capazes de melhorar o ensino de física? In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (org.). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EDUFRN), 2012. p. 65-83.

BASTOS FILHO, J. B. Unificação newtoniana à luz de uma reconstrução racional sob viés epistemológico. **Psicologia e Saberes**, Maceió, v. 7, n.8, p. 3 – 19, 2018. Disponível em: <https://revistas.cesmac.edu.br/psicologia/article/view/771/644>. Acesso em: 15 set. 2022.

BRANDÃO, R. V. **A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no Ensino de Física**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BUNGE, M. **La ciencia, su método y su filosofía**. Buenos Aires: Ediciones Siglo Veinte, 1960.

_____. **Teoria e realidade**. Tradução de Gita K. Guinsburg. São Paulo: Editora Perspectiva, 1974.

_____. **Racionalidad y realismo**. Madrid: Alianza Editorial, 1985.

COHEN, I. B. Newton's discovery of gravity. **Scientific American**, v. 244, n. 3, p. 166-179, 1981. Disponível em: https://www.scientificamerican.com/article/newtons-discovery-of-gravity/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 05 jun. 2025.

ELKANA, Y. **La scoperta della conservazione dell'energia**. Milano: Feltrinelli, 1977.

EVES, H. **Introdução à história da matemática**. Tradução de Hygino H. Domingues. 5. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2004.

GOMES DOS SANTOS, J. R.; BASTOS FILHO, J. B. Conexões para um ensino de ciências multidisciplinar a partir do seminal feito de Eratóstenes. **Revista Ensino em Debates**, Fortaleza, v. 5, p. e2025032, 2025a. Disponível em: <http://revistarede.ifce.edu.br/ojs/index.php/rede/article/view/149>. Acesso em: 20 ago. 2025.

GOMES DOS SANTOS, J. R.; BASTOS FILHO, J. B. A natureza do espaço: alguns problemas epistemológicos suscitados pelo seminal episódio de Eratóstenes. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 22, n. 8, p. 01 – 23, 2025b. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/17443/9640> Acesso em: 20 ago. 2025.

HEIDEMANN, L. A. **Ressignificação das atividades experimentais no ensino de física por meio do enfoque no processo de modelagem científica**. 2015. 298 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HESTENES, D. Modeling games in the newtonian world. **American Journal of Physics**, v. 60, n. 8, p. 732–748, 1992. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-abstract/60/8/732/1054114/Modeling-games-in-the-Newtonian-World?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 21 nov. 2023.

LEOPARDI G. B. BASTOS, F; BASTOS FILHO, J. B. Exploração de algumas das possibilidades histórico-epistemológicas para o Ensino de Física a partir de um Vídeo sobre a Queda Livre. In: **III Encontro Alagoano de Ensino de Ciências e Matemática**, PPGECIM/UFAL, de 10 a 12 de dezembro de 2014, Maceió - AL.

MÄNTYLÄ, T.; KOPONEN, I. T. Understanding the role of measurements in creating physical quantities: a case study of learning to quantify temperature in physics teacher education. **Science & Education**, v. 16, p. 291-311, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11191-006-9021-2>. Acesso em: 13 fev. 2023.

NEWTON, I. Escólio geral. In: **GALILEU; NEWTON**. Os pensadores. São Paulo: Nova Cultural, 1987. p. 167–170.

NEWTON, I. Prefácio. In: **NEWTON, I. Princípios matemáticos de filosofia natural**. v. 1. 2. ed. 7. reimpr. Tradução de Trieste Ricci; Leonardo Gregory Brunet; Sônia Terezinha Gehring; Maria Helena Curcio Célia. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2023. p. 13–15.

OLIVEIRA, V. **Resolução de problemas abertos para aprendizagem de física no Ensino Médio na perspectiva da modelagem didático-científica**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

POPPER, K. R. **Conocimiento objetivo**. Madrid: Editorial Technos S. A., 1974a.

POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Editora Cultrix, 1974b.

POPPER, K. R. **Conjecturas e refutações**. 2. ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1982.

SILVA, O. H. M. **Um Estudo sobre a Estruturação e Aplicação de uma Estratégia de Ensino de Física Inspirada em Lakatos com a Reconstrução Racional Didática para Auxiliar a Preparar os Estudantes para Debates Racionais entre Teorias e/ou Concepções Rivais**. 2008. 280 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2008.

SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA (SNEF), 1., 1970, São Paulo. **Atas da 1ª edição** (não publicadas/consultadas). São Paulo: Instituto de Física da Universidade de São Paulo; Sociedade Brasileira de Física; Salvador: Editora Beneditina Ltda., dez. 1970. Disponível em:
https://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos_diversos/SNEF/I/I-SNEF-Boletim.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025,

WINKELMANN, J. On idealizations and models in science education. **Science & Education**, v. 32, n. 1, p. 277–295, fev. 2023. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11191-021-00291-2>. Acesso em: 21 jan. 2022.

CAPÍTULO 4/ ARTIGO 4

DISCUSSÕES SOBRE O ENSINO DE CIÊNCIAS SUSCITADAS A PARTIR DA TEORIA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL: CATEGORIAS CONCEITUAIS, NATUREZA DA CIÊNCIA E PROCESSOS MENTAIS

1 INTRODUÇÃO

Toda e qualquer situação de ensino, formal ou informal, envolve ou subentende-se uma reconstrução didática do conteúdo a ser ensinado. Em outras palavras, durante o ensino o professor faz escolhas didáticas sobre que conteúdo²³ será apresentado aos alunos e como será feito. Sobre o como o conteúdo será entregue aos alunos; estamos nos referindo às estratégias, que podem envolver uma ou mais metodologias de ensino. Neste estudo, que envolve o uso de episódios da história da ciência, seguimos a linha das reconstruções racionais sob viés epistemológico de Bastos Filho (2017, 2018).

Assim como as reconstruções racionais didáticas implementadas por Silva (2008), Silva; Nardi e Laburú (2008, 2010) e Silva; Laburú e Nardi (2012), as reconstruções racionais sob viés epistemológico propostas por Bastos Filho (2017; 2018) se inspiram em fundamentos lakatosianos e, também apresentam caráter didático. Em outras palavras, têm como referencial as ideias de Reconstrução Racional de fins historiográficos propostas por Imre Lakatos (Lakatos, 1987) em seu livro *História da ciência e suas reconstruções racionais*. Contudo, enquanto as primeiras buscam reconstruir a história dos conceitos científicos à luz de uma epistemologia contemporânea, a proposta de Bastos Filho permite uma multiplicidade de perspectivas epistemológicas. Tal característica, a nosso ver, torna-a mais adequada para a abordagem de episódios da história da ciência que envolvem maior complexidade conceitual e metodológica, como a unificação newtoniana, favorecendo, assim, uma compreensão mais rica e plural desses processos históricos.

Ao nos posicionarmos sobre a questão da complexidade, é importante destacar que, a simples queda de um objeto próximo à superfície terrestre, em termos

²³ De forma alternativa à classificação dos conteúdos de maneira disciplinar, passaremos a adotar a tipologia de conteúdos de Zabala (1998): conteúdos factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais.

epistemológicos, é tão complexa quanto o movimento dos planetas em torno do Sol. Ambos os fenômenos podem ser compreendidos a partir das mesmas categorias conceituais e encontram explicação dentro da estrutura teórica da gravitação. No entanto, sob a perspectiva didática, a queda livre se apresenta como um fenômeno mais acessível, uma vez que a queda dos corpos é parte da experiência cotidiana dos alunos, exigindo, portanto, uma estrutura representacional menos elaborada em seu ensino e aprendizagem. Já um episódio como o da unificação newtoniana, considerado o ápice do desenvolvimento da teoria da gravitação universal, pode ser entendido como um exemplo paradigmático de complexidade, pois envolve uma ampla variedade de fenômenos naturais, mobilizando conceitos, fatos e procedimentos de diferentes naturezas em uma única explicação unificada.

O ensino da gravitação universal ao ser realizado por meio de um processo que se resume à explicação ou explicitação dos produtos da ciência, como os modelos matemáticos, se mantém indiferente à importância histórica, epistemológica, conceitual e metodológica representada pelo desenvolvimento da teoria da gravitação universal. A partir do modelo matemático explica-se que a teoria da gravitação universal de Newton estabelece que a força de atração entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto das massas dos corpos interagentes e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre seus centros de massa; em seguida, aplica-se o modelo na resolução de problemas didáticos. Mas como Newton chegou a esse resultado? Que conceitos já tinham sido desenvolvidos e quais foram construídos ou ressignificados por Newton até que fosse possível formular uma teoria UNIVERSAL sobre o movimento dos corpos na terra e no céu? O que significou para aquele momento histórico a unificação da mecânica de Galileu à astronomia de Kepler? Estas e tantas outras questões que têm potencial para subsidiar o aprendizado amplo sobre a gravitação universal e os conceitos correlatos, mas que não serão feitas pelos alunos, simplesmente, porque a reconstrução didática escolhida pelo professor ou pelo livro didático, optou por apresentar aos alunos apenas o produto da ciência, silenciando o processo de construção.

Dar voz aos processos de construção do conhecimento em situações de ensino, significa que ao elaborar uma reconstrução racional didática como um recurso didático ou como a situação de ensino em si, enfatiza-se os processos epistemológicos envolvidos na construção e na evolução do conhecimento. Assim,

temos os processos relacionados à experimentação, que é estratégia amplamente conhecida; estratégias apoiadas na modelagem científica de Mario Bunge (Brandão, 2012; Heidemann, 2015; Oliveira, 2018) e os trabalhos de Silva (2008), Silva; Nardi e Laburú (2008, 2010) e Silva; Laburú e Nardi (2012) que usaram reconstruções racionais didáticas inspirados em Imre Lakatos para o ensino sobre as controvérsias entre as teorias do Calórico e Cinética Molecular e o trabalho Mäntylä e Koponen (2007) que investigaram o uso de estruturas pedagógicas embasadas no uso de história e filosofia da ciência para desenvolver estruturas didáticas para ensino de conteúdos de física e de química. Esse conjunto de trabalhos buscam envolver os alunos em atividades didáticas que exigem o emprego de processos epistemológicos, tais como: formulação de hipóteses, generalização, modelagem, discussões racionais sobre evolução conceitual, inferência indutiva, inferência dedutiva etc.

No contexto de um ensino de ciências que tenha como objetivo promover a compreensão ampla de conceitos científicos, partindo de episódios da história da ciência, como o que acontece em reconstruções racionais, nosso objetivo é apresentar discussões a partir do episódio da gravitação universal de Newton para subsidiar situações de ensino e a construção de reconstruções racionais deste episódio.

O presente artigo encontra-se organizado nas seguintes seções: 2 *Categorias conceituais envolvidas em uma reconstrução racional didática*, na qual apresentaremos e desenvolvemos os principais conceitos que aparecem no desenvolvimento da teoria da gravitação universal e que devem fazer parte do seu ensino; 3 *Discussões sobre a natureza da ciência a partir do episódio da gravitação universal*, ocasião em que analisamos a carta de Euler a uma princesa alemã descrevendo a descoberta da gravitação universal no que concerne à crítica às visões distorcidas da ciência; 4 *Processos mentais e ensino de ciências*, onde especulamos sobre os processos mentais empregados por Newton no desenvolvimento da teoria da gravitação universal; e 5 *Considerações finais*.

2 CATEGORIAS CONCEITUAIS ENVOLVIDAS EM UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DIDÁTICA

2.1 CATEGORIAS CINEMÁTICAS E DINÂMICAS

Tomamos aqui pela expressão *categoriais conceituais*, fundamentalmente os *conceitos físicos* envolvidos para que a reconstrução racional didática se apresente, a nosso ver, de maneira tanto mais compreensível quanto possível.

Poderíamos dizer que um primeiro grupo de conceitos seria: *espaço, tempo, velocidade, aceleração e aceleração centrípeta*.

Um segundo grupo de conceitos seria: *massa newtoniana, força newtoniana, força gravitacional, e força decorrente de considerações acerca de uma física inercial*.

Um terceiro grupo de conceitos seria: *espaço absoluto, tempo absoluto. Interações a distância, massas extensas descritas como pontuais, centro de massa*.

A nossa abordagem ainda privilegia a importância das constantes singulares que caracterizam as diversas acelerações locais g_i em queda livre de Galileu para os i-ésimos astros e os K_i de Kepler relativos aos astros que orbitam em torno de um dado astro central e, além disso, como vinculá-los à constante de gravitação universal G que por ser universal é válida para todos os domínios, tanto o terrestre quanto o celeste.

A física dos movimentos locais de Galileu constitui uma cinemática dedicada aos movimentos na Terra e como tal envolve os conceitos de espaço, tempo, velocidade e aceleração, sendo que especial destaque deve ser atribuído ao conceito de aceleração.

A astronomia de Kepler constitui, por seu turno, uma cinemática dedicada aos movimentos no céu o que se depreende imediatamente das suas três leis.

A física newtoniana é tributária de ambas as físicas, galileana e kepleriana. Além disso ela introduz os seminais conceitos de *massa* e de *força* e desta maneira constitui uma dinâmica.

A dimensão da obra de Newton é gigantesca, mas, por mais estranho e paradoxal que pareça, a monumental grandeza dessa obra bem como desta colossal criatividade não parece referendar a autoridade de Newton como filósofo. Burtt assim

se expressou em ensaio clássico de sua autoria: “Em descoberta científica e formulação, Newton foi um gênio; como filósofo, era desprovido de crítica, impreciso, inconsistente e, até mesmo, secundário” (Burtt, 1991, p. 168).

Prossigamos a nossa análise sobre como alguns autores tanto estranharam quanto discordaram da própria maneira com a qual Newton atribuiu a si próprio as suas escolhas mentais e metodológicas.

Um dos mais famosos exemplos diz respeito à crítica de Popper à própria autoatribuição de Newton de sua inferência criativa enquanto procedimento indutivo o qual nem de longe faria jus à excelência de sua enorme grandeza intelectual (Popper, 1974a; 1974b; 1982).

Já nos referimos ao argumento poperiano segundo o qual não podemos passar da queda livre galileana para a queda livre analisada à luz da fórmula da gravitação universal de Newton, pois a premissa tirada da teoria galileana segundo a qual *‘a aceleração é constante durante a queda’* seria contradita pela conclusão segundo a qual *‘aceleração aumenta durante a queda’*. Vimos também que, diferentemente da inferência indutiva, o sentido inverso, ou seja, o que parte da teoria geral para a teoria particular, constitui-se em inferência racionalmente sustentável enquanto uma situação matematicamente limite a qual, para os nossos propósitos práticos, está em conformidade com uma ótima aproximação da realidade (Bastos Filho, 1995).

Analisemos agora um outro aspecto e para tal vamos expressar, para discussão seguinte, como um teorema. Vamos, no momento, nos circunscrever a uma abordagem cinemática.

2.2 TEOREMA SOBRE A ACELERAÇÃO CENTRÍPETA DOS PLANETAS

A estrutura de um teorema, e aqui estamos tratando de uma **inferência dedutiva e não indutiva**, é grosso modo a seguinte. Formulamos hipóteses e a partir das hipóteses admitidas, e procedendo pelas leis da lógica de Aristóteles, chegamos àquilo que pretendíamos demonstrar. Em outras palavras, trata-se do **Se** tais **hipóteses** são admitidas, **então** chegamos à **tese, como queríamos demonstrar**.

Enunciemos o seguinte teorema:

(H1) **Se** o cálculo da aceleração centrípeta que age sobre a pedra que uma criança gira em torno de si em movimento circular uniforme for também válido para os planetas que giram, supostamente em órbitas circulares em torno do Sol;

(H2) **Se** o movimento dos planetas segundo órbitas elípticas em torno do Sol puder ser tratado em ótima aproximação como se fossem órbitas circulares em torno do Sol;

(H3) **Se** for válida a analogia acerca do papel desempenhado pela **criança** no caso do movimento da pedra ao papel desempenhado pelo **Sol** no caso do planeta;

(H4) **Se** for válida a analogia do papel desempenhado pela **pedra** ao papel desempenhado pelo **planeta**;

(H5) **Se** a terceira lei de Kepler é válida para o movimento do planeta em torno do Sol;

Então, a aceleração centrípeta que age sobre o planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol,

$$a_{\text{Plan.}} = 4\pi^2 K_{\text{Plan.}} / (R_{\text{P,S}})^2$$

, onde $K_{\text{Plan.}}$ diz respeito aos planetas que giram em torno do Sol e $R_{\text{P,S}}$ diz respeito à distância do planeta ao Sol.

Desta maneira, se nos restringirmos ao âmbito de uma física que envolve categorias conceituais meramente cinemáticas, chegamos à conclusão segundo a qual a aceleração centrípeta que age sobre o planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre esse planeta e o Sol.

Se introduzirmos nesta altura os conceitos de **Massa newtoniana** e de **Força newtoniana** e assim, passarmos da cinemática para a dinâmica, então o resultado acima pode ser escrito como

$$F_{\text{Plan.}} = M_{\text{Plan.}} a_{\text{Plan.}} = M_{\text{Plan.}} \cdot 4\pi^2 K / (R_{\text{P,S}})^2$$

Deveremos, neste estágio de nossa argumentação, chamar a atenção a nossos eventuais leitores para o fato de que a lei acima que expressa que a força centrípeta que age sobre o planeta em movimento supostamente circular em torno do Sol é

inversamente proporcional ao quadrado da distância, **não é** a lei universal de Newton. A compreensão dessa circunstância é fundamental.

Efetivamente, quer nos refiramos ao nível cinemático e mesmo que nos refiramos ao nível dinâmico, a lei acima é restrita ao movimento do planeta; não há qualquer sentido de universalidade. O argumento segundo o qual a lei do inverso do quadrado da distância válida para os planetas possa ser generalizada não se sustenta. Isso porque a lei universal

$$F = G(M_1 M_2) / (R_{1,2})^2$$

, se reporta a quaisquer que sejam as massas M_1 e M_2 do universo e não apenas se refere a planetas. Em outras palavras, há um caminho conceitual gigantesco para que se pudesse considerar como aceitável uma mera inferência indutiva.

Para se chegar à universalidade é necessário admitir que se a força centrípeta for identificada com a força gravitacional, isso equivale a considerar a massa inercial como igual à massa gravitacional (GREF, 1999).

2.2.1 Um obstáculo

Um estudante poderia questionar a estranheza da analogia:

(Criança-Pedra) → (Sol-Planeta)

O argumento poderia ser do seguinte teor: ora, no caso da criança que gira uma pedra em torno de si própria mediante uma corda seria diferente do Sol que mediante a sua ação faz girar o planeta em torno de si, pois nesse segundo caso não haveria corda alguma ligando planeta ao Sol. Como uma resposta a uma objeção do gênero diríamos que a realidade não se confunde com um modelo de realidade. Obviamente uma tal corda concreta não existe, mas a ciência física permite que se postule o princípio de modelagem segundo o qual ***tudo se passa como se fosse***.

Há um outro tipo de objeção, desta feita, muita mais influente e provedora de muitas polêmicas. Trata-se da ideia de ação a distância. Como seria possível corpos interagirem a distância? Até então as ações conhecidas eram por contato.

2.3 UMA APRECIAÇÃO PANORÂMICA SOBRE O PAPEL DA MATEMÁTICA PARA A FILOSOFIA NATURAL AO LONGO DO SÉCULO XVII EUROPEU

Burtt em seu famoso ensaio sobre *As Bases Metafísicas da Ciência Moderna* coloca a seguinte questão:

Como foi que os homens começaram a pensar a respeito do universo em termos de átomos de matéria no espaço e no tempo, ao invés de valer-se das categorias escolásticas? Quando foi que as explicações teleológicas, explicações em termos do uso e do bem, foram abandonadas em favor da noção de que as explicações verdadeiras sobre o homem e sua mente, assim como sobre outras coisas, devem ser dadas em termos de seus componentes mais simples? O que é que estava acontecendo entre os anos de 1500 e 1700 e que propiciou essa revolução? E então, que implicações metafísicas definitivas foram incorporadas à filosofia geral no decurso da transformação? (Burtt, 1991, p.21).

No excerto precedente, Burtt enfatiza a enorme mudança qualitativa ocorrida na cultura europeia entre os anos de 1500 a 1700 que corresponde à passagem de uma concepção de mundo baseada em categorias conceituais escolásticas como aquelas ligadas a substâncias, às causas finais, às considerações sobre o bem e o mal etc. para uma concepção do mundo em termos de *átomos de matéria no espaço e no tempo*.

Questões imbuídas de causas finais, tal como é a pergunta acerca de qual seja a finalidade de existirmos, não eram mais o foco e sim o foco havia se deslocado para a pergunta acerca de qual seja a causa eficiente do movimento, que para Newton era a sua força a qual em linguagem de hoje é definida como variação temporal do momento linear (uma grandeza vetorial) de um corpo massivo. Podemos conceber tudo isso como um deslocamento das qualidades assim chamadas de secundárias ligadas aos sentimentos e paixões de um mundo cheio de cores, sabores, e de odores das flores, para as qualidades primárias, ou seja, as qualidades passíveis de descrição matemática dos fenômenos.

Galileu não deixou de elogiar Aristarco de Samos e Copérnico por ambos elegerem a **razão** em detrimento dos **sentidos** refutando flagrantemente um empirismo ingênuo meramente sensorial. Desta forma, o heliocentrismo ganhou protagonismo enquanto adoção racional. Famosa, neste sentido, é a passagem de

Galileu no seu *Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico & Copernicano*:

[...] não posso encontrar limite para a minha admiração de como tenha podido, em Aristarco e em Copérnico, a razão fazer tanta violência aos sentidos, que contra estes ela se tenha tornado soberana de sua credibilidade (Galileu, 2004, p. 413; grifos em negrito por nós acrescentados; originalmente publicada em italiano em 1632).

Embora os sentidos sejam muitíssimo importantes para a vida, Galileu concebia que uma ciência que fosse sólida e sustentável deveria se basear em quantidades matemáticas. Os sentidos nos enganam e uma ciência realmente digna desse nome deveria basear-se em uma razão e esta razão deveria ser uma *razão matemática* assim como nos diz a famosa passagem de seu *O Ensaíador*.

A filosofia encontra-se escrita neste grande livro que continuamente se abre perante nossos olhos (isto é, o universo), que não se pode compreender antes de entender a língua e conhecer os caracteres com os quais está escrito. Ele está escrito em língua matemática, os caracteres são triângulos, circunferências e outras figuras geométricas, sem cujos meios é impossível entender humanamente as palavras; sem eles nós vagamos perdidos dentro de um obscuro labirinto (Galileu, 1987, p. 21; originalmente escrito em 1623).

O papel da matemática para o estudo dos fenômenos é de grande importância para os filósofos naturais do século XVII europeu, hoje diríamos físicos. Para Galileu, o grande livro da natureza está escrito em linguagem matemática e quem não souber lê-lo estará perdido em um obscuro labirinto. O seu método enquanto investigador era o das *experiências sensíveis e demonstrações necessárias*, mas essas experiências sensíveis não se encontravam no nível “baixo” das meras sensações humanas na medida em que tudo tem que passar pelo crivo da razão. E é pelo crivo da razão que Galileu manifesta sua admiração diante da astúcia das inteligências de Aristarco e de Copérnico. Ora, o movimento aparente do Sol é ontologicamente impossível pois isso somente seria compatível com o movimento infinito e o movimento infinito não pode existir e, portanto, como consequência lógica e racional disso, é a Terra que tem necessariamente que girar em torno de seu próprio eixo a fim de que fosse tornado inteligível o porquê de a cada 24 horas dia e noite se alternarem.

Galileu (1564 - 1642) e Newton (1642/3 - 1727) foram grandes matemáticos; Descartes (1596 - 1650), Leibniz (1646 - 1716) e Pascal (1623 - 1662) também o

foram. Desta maneira, é de bom alvitre esquematizar algumas razões de suas respectivas características no que dizem respeito ao que esses importantes pensadores conceberam sobre o papel da matemática para o estudo dos fenômenos naturais.

Debrucemo-nos sobre alguns breves aspectos do pensamento de Descartes.

Descartes adotou como Programa de Pesquisa a construção de uma ciência e de uma filosofia ambas verdadeiras que fossem erigidas sobre fundamentos sólidos em relação aos quais não houvesse a menor dúvida quanto à sua veracidade (Descartes, 1987). Em outras palavras, conforme o seu próprio método, ele não deveria tomar nada como verdadeiro que não se apresentasse ao seu espírito pensante de maneira absolutamente *clara e distinta*. Em outras palavras, deveria afastar definitivamente qualquer dúvida. Tratava-se da *clareza* e da *distinção* cartesianas. Descartes estava descontente com a sua formação intelectual no Colégio jesuíta de 'La Fleche' de orientação escolástica. A partir de então ele considerou que a geometria euclidiana seria um excelente ponto de partida, pois se baseava em princípios auto evidentes em relação aos quais não há qualquer dúvida razoável acerca da solidez de sua veracidade. Assim, a menor distância entre dois dados pontos não coincidentes é o segmento de reta unindo esses dois pontos. Ora, isso é algo irrefutável pois quaisquer outros caminhos pensáveis que pudessem unir um ponto a outro seriam indubitavelmente maiores.

O Deus cartesiano era um Deus Geômetra. Deste modo, ele adotou o Princípio Metafísico constituído por uma Lei de Conservação: a Conservação de sua Quantidade de Movimento. A Quantidade de Movimento cartesiana de um corpo é o produto da extensão do corpo pela sua velocidade e tinha a característica de ser uma grandeza escalar. Lembremos que Descartes não tinha o conceito de massa que foi uma das contribuições notáveis de Newton. Para uma discussão sobre o tema ver (Schönberg, 1985), (Bastos Filho; 1986; 1987) e (Bastos Filho; Xavier Moreira, 1989).

Descartes argumentou que no momento da Criação Deus houvera colocado no Mundo uma dada Quantidade de Movimento. Como Deus é um Ser Perfeíssimo, Imutável e Constante, então essa Quantidade de Movimento necessariamente deveria se conservar pois se não se conservasse então Deus não expressaria a sua Perfeição, a sua Imutabilidade e a sua Constância, o que seria um absurdo; assim, quando em

uma parte do mundo a Quantidade de Movimento diminui, em outra a Quantidade de Movimento tem que aumentar na mesma proporção.

A redução cartesiana da Física à geometria foi criticada por outros grandes pensadores do século XVII como Pascal e Leibniz.

Debrucemo-nos agora sobre Pascal.

Nas anotações 76, 77, 78 e 79 de seus *Pensamentos*, ele assim escreveu:

76-Escrever contra os que aprofundam demais as ciências. Descartes. (Pascal, 1988, p. 57; primeira edição publicada após a morte de Pascal em 1670]).

77-Não posso perdoar Descartes; bem quisera ele, em toda a sua filosofia, passar sem Deus, mas não pôde evitar de fazê-lo dar um piparote para pôr o mundo em movimento; depois do que não precisa mais de Deus. (Pascal, 1988, p. 57-58; primeira edição publicada após a morte de Pascal em 1670]).

78- Descartes: inútil e incerto. (Pascal, 1988, p. 58; primeira edição publicada após a morte de Pascal em 1670]).

79- [Descartes- cumpre dizer, *grosso modo*: “Isso se faz por figura e movimento”, porque isso é verdadeiro; mas dizer quais e montar a máquina é ridículo, pois é inútil e incerto, e penoso. E ainda que fosse verdadeiro, não acreditamos que toda a filosofia valha uma hora de trabalho. (Pascal, 1988, p. 58; primeira edição publicada após a morte de Pascal em 1670]).

Deste modo, Pascal, excelente filósofo, físico e matemático critica a metafísica cartesiana no que se refere ao papel de Deus. É possível interpretar que Pascal não aceita o que ele considera que seja a concepção de Descartes segundo a qual precisaríamos de Deus para dar um piparote criando toda a quantidade de movimento no mundo e depois poderíamos dispensar Deus. Há algo mais do que apenas geometria e movimento. A crítica à insuficiência da metafísica cartesiana é patente no excerto de Pascal disposto precedentemente *ao não acreditar que toda a filosofia valesse apenas uma hora de trabalho*.

Debrucemo-nos sobre Leibniz.

Leibniz (1646-1716) foi um cartesiano, mas depois criticou Descartes acerca do conceito de quantidade de movimento enquanto grandeza responsável pelos fenômenos, como, por exemplo, qual a grandeza física que seria responsável pela elevação de um corpo até uma dada altura. Ele propôs a sua *vis viva*. Remetemos o leitor aos seguintes trabalhos (Austrilino Silva; Bastos Filho, 1995a; Austrilino Silva; Bastos Filho, 1995b; Silva Oliveira; Fireman; Bastos Filho, 2013).

Ressaltemos que ambos, Descartes e Leibniz, tinham Programas de Pesquisa²⁴ compatíveis com Leis de Conservação que constituíam núcleos duros de seus respectivos Programas. Quantidade de movimento para Descartes e *vis viva* para Leibniz.

Leibniz criticou a redução da física aos princípios geométricos como mostra o capítulo 21 de seu *Discurso de Metafísica* cujo título já fala por si: *Se as regras mecânicas dependessem unicamente das geometrias sem a metafísica, os fenômenos seriam outros* (Leibniz, 1947, p. 124). A crítica abrange o conceito de extensão cartesiano.

Passemos a tecer agora algumas muito breves considerações sobre a crítica de Leibniz a Newton no que se refere ao papel dos Princípios Matemáticos a fim de darem conta dos fenômenos. Uma excelente referência constitui o conjunto das cartas trocadas entre Leibniz e Clarke, conhecido na literatura como Correspondência Leibniz-Clarke que foi objeto de análise por Alexander (Alexander, 1956); ver também (Leibniz, 1988, p. 237). Tomemos um excerto bastante instrutivo e pertinente da *segunda carta de Leibniz, ou resposta à primeira réplica de Clarke*:

O grande fundamento dos matemáticos é o princípio da contradição, ou da identidade, isto é, que um enunciado não poderia ser falso e verdadeiro ao mesmo tempo, e que assim A é A, e não poderia ser não- A. E esse único princípio basta para demonstrar toda a aritmética e toda a geometria, ou seja, todos os princípios matemáticos. Mas, se desejamos passar da matemática para a física, precisamos de um outro princípio ainda, como observei em minha *Teodicéia*, quer dizer, o princípio da razão suficiente: que nada acontece sem que haja uma razão por que isso seja assim antes do que de outro modo (Leibniz, 1988, p. 237).

O argumento de Leibniz grosso modo reza do seguinte teor: a matemática requer apenas o princípio lógico que impede a introdução da contradição em seu interior e deste modo garante a consistência lógica de seus resultados. No entanto, embora os princípios matemáticos sejam bem-vindos e até certo ponto necessários para a física, esses princípios não bastam. Faz-se mister pois, que além desses, também façamos contemplar os princípios metafísicos como o princípio da razão suficiente.

²⁴ A concepção de Programa de Pesquisa aqui por nós mencionada é aquela de lavra lakatosina (Lakatos, 1987).

Esperamos ter dado na presente seção alguns tênuos traços característicos acerca do que cada um desses grandes autores concebe acerca do papel da matemática nos contextos dos fenômenos da realidade física.

3 DISCUSSÕES SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA A PARTIR DO EPISÓDIO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

A Revolução Científica dos séculos XVI e XVII representa um dos períodos mais significativos para o desenvolvimento da ciência, especialmente no que se refere à compreensão dos movimentos terrestres e celestes. Nesse processo, diferentes pensadores desempenharam papéis fundamentais: Nicolau Copérnico, ao propor o heliocentrismo; Johannes Kepler, com suas leis do movimento planetário; Galileu Galilei, que aliou observação e experimentação à matemática; e René Descartes, que contribuiu com uma visão mecanicista da natureza. Esse movimento intelectual encontra em Isaac Newton um ponto culminante, pois foi ele quem sistematizou e unificou os conhecimentos anteriores por meio da formulação da teoria da gravitação universal, “unindo céus e terra”.

Desde a publicação dos *Principia* em 1687 que Newton é celebrado pela sua extraordinária contribuição científica. Sendo elevado à condição de gênio em várias ocasiões. O matemático e físico Leonhard Euler (1707 - 1783), por exemplo, em carta enviada a uma princesa alemã (Carta nº. 52, Apêndice), em 1760, descreve Newton e sua contribuição à ciência da seguinte forma:

Se Newton não tivesse se deitado num jardim sob uma macieira, e se por acaso uma maçã não lhe tivesse caído sobre a cabeça, talvez ainda estivéssemos na mesma ignorância sobre o movimento dos corpos celestes e sobre uma infinidade de fenômenos que dele dependem (Euler, 1985, p. 77, tradução nossa).

Nessa mesma linha, também podemos citar um dístico do poeta inglês Alexander Pope (1688-1744), escrito em 1727, ano da morte de Newton, “A natureza e suas leis jaziam ocultas na noite; Deus disse: Que exista Newton! — e tudo se fez luz.” (COMCIÊNCIA, 2005, s/p, tradução nossa), e um excerto da introdução de palestra ministrada por Boris Hessen (1931) na qual ele cita o livro de famoso matemático britânico, o professor Alfred North Whitehead.

Ciência e civilização devem seu desenvolvimento ao fato de Newton ter nascido no mesmo ano da morte de Galileu. Imagine só como teria sido a história do desenvolvimento da humanidade se esses dois homens não tivessem surgido no mundo (Whitehead *apud* Hessen, 1931, p. 1, tradução nossa).

A partir das referências acima, é evidente o impacto que o feito de Newton trouxe para a ciência e para a sociedade, algo que pode ser sintetizado nas palavras do historiador da ciência Arthur Koestler (Koestler, 1989).

Nas primeiras páginas deste livro, 2300 anos antes nesta história, comparei a situação intelectual da Grécia do século seis antes de Cristo a uma orquestra que afina os instrumentos, estando cada um dos executantes absorto no seu próprio instrumento, à espera da entrada do dirigente. No século dezessete depois de Cristo, segunda idade heróica da ciência, a situação repetiu-se. O dirigente que reuniu a orquestra e compôs uma nova harmonia tirada das estridentes discordâncias foi Isaac Newton, nascido no Natal de 1642, onze meses depois da morte de Galileu (Koestler, 1989, p. 347).

Os excertos anteriores nos permitem inferir, mesmo que parcialmente, que entre cientistas e intelectuais pôsteros à Newton a aceitação de que suas ações teriam exercido papel central no desenho da sociedade nos séculos seguintes foi fundamental. Algo que ultrapassaria os limites do trabalho científico, influenciando, inclusive, o desenvolvimento econômico e tecnológico. Mas essa apologia triunfalista é questionada por Hessen (1931), que segundo, Alves de Araújo (2013), ele (Hessen)

[...] enquanto marxista e seguidor do materialismo dialético, jamais poderia concordar com tamanha fatalidade que reduzia toda uma história sociocultural a apenas duas singularidades; a seu modo de ver, essas deveriam ser imersas em um contexto sociocultural e econômico no qual muitos outros homens ilustres teriam desempenhado um papel decisivo (Alves de Araújo, 2013, p. 29-30).

Newton não criou a partir do zero todos os conceitos e ideais necessários para formular e validar a teoria da gravitação universal. Como é possível depreender da citação de Koestler, havia ideias para explicar os movimentos dos corpos próximos à superfície da terra e o movimento dos planetas, entre as quais, respectivamente, a mecânica de Galileu e a astronomia de Kepler, mas eram incompatíveis. Ou seja, com base nas palavras de Hessen, mesmo que se Newton não tivesse existido, as condições sociais, a produção intelectual da época, as demandas tecnológicas e

econômicas, configuravam um cenário propício ao desenvolvimento de uma teoria da gravitação, inevitavelmente.

Mas, nesta seção não buscamos a gênese da teoria da gravitação universal; nosso propósito é discutir e até sugerir meios para que a riqueza conceitual envolvida no episódio da unificação newtoniana possa ser explorada no ensino de ciências e para discussões sobre ele (o ensino de ciências), principalmente, no ensino sobre a natureza do conhecimento científico e do trabalho científico. Na literatura há muitos autores que defendem que o ensino de ciências não deve ser apenas sobre os produtos da ciência, mas também e, principalmente, sobre como esse conhecimento é construído e como evolui, o que se convencionou chamar de Natureza da Ciência (Moura, 2014; Martins, 2015; Massoni; Carvalho, 2022); outro grupo de autores defende a abordagem histórica como estratégia para o ensino sobre a natureza do conhecimento científico e do trabalho científico (Matthews, 1995; Martins, 2007; Forato; Pietrocola; Martins, 2011; Oliveira; Martins; Silva, 2020).

Assim, a partir do episódio da unificação newtoniana, podemos nos questionar: como Newton trabalhou? Tal pergunta tem ocupado os historiadores e filósofos da ciência desde o século XVII. Neste estudo, não temos a ingênua ambição de procedermos um escrutínio amplo e profundo dos processos mentais e metodológicos empregados por Newton; nossas intenções são essencialmente de fins educacionais, ou mais precisamente, dizem respeito ao ensino sobre a Natureza da Ciência. E nesse contexto, discutimos sobre como a análise em sala de aula de episódios da história da ciência podem suscitar discussões sobre como o conhecimento científico é construído e evolui.

Visões deformadas ou equivocadas sobre a construção do conhecimento científico e do trabalho científico são transmitidas, efetivamente, por meio da educação científica formal e informal (Gil-Pérez *et al.*, 2001). Em outras palavras, os professores têm impregnado, implícita ou explicitamente, suas aulas com concepções epistemológicas inadequadas e mesmo incorretas sobre a natureza da ciência.

Podemos dizer, de uma maneira genérica, que os professores, com a intenção meramente de ilustrar a discussão, partem de uma abordagem histórica elegendo um dado episódio da história da ciência que é entregue aos alunos em um suporte físico ou digital (texto impresso ou no formato digital) e a partir de então tem início a

discussão em sala de aula. Nas etapas seguintes, o professor pode sugerir leituras, apoiadas ou não por outros recursos didáticos.

Neste estudo teórico, analisaremos a carta de n.º 52 enviada por Leonhard Euler a uma princesa alemã em 3 de setembro de 1760. Na referida correspondência, ele aborda o descobrimento da gravitação universal por Newton. Assim, temos um documento, por um lado, que para todos os efeitos, transmite as ideias e informações selecionadas pelo autor; por outro lado, em uma situação de ensino, devemos considerar as concepções de ciência e do trabalho científico presentes no documento, principalmente, quanto ao potencial para reforçar visões distorcidas sobre a ciência que podem fazer parte das percepções dos estudantes.

O ensino encontra-se entre as informações fornecidas pelo recurso didático (a carta) e os significados que os alunos podem construir a partir da leitura da carta sobre como Newton trabalhou. Em outras palavras, como trabalho científico foi construído. Como, tanto ensinar quanto aprender, estão envoltos em grande complexidade, em termos didáticos, o que iremos fazer é identificar informações expressas na carta que tenham potencial para cristalizar visões deformadas da ciência. Mas qual a visão adequada da ciência? Como tal questão sobre o que constitui uma visão adequada de Natureza da Ciência é um ponto de dissenso na comunidade científica e acadêmica, haja vista, que até mesmo entre os pesquisadores há visões equivocas sobre como eles produzem conhecimento científico, vamos considerar a visão adequada de Natureza da Ciência, a que foi proposta por Gil-Pérez *et al.* (2001) a partir do que é consenso sobre o que deve ser evitado na concepção de Natureza da Ciência.

No título da carta “*Sobre a descoberta da gravitação universal feita pelo grande Newton*”, Euler emprega o termo “descoberta”, o que pode sugerir que o conceito já existisse na natureza, logo não seria algo construído por nós, humanos, para descrever ou explicar padrões de comportamento dos fenômenos naturais. Segundo Gil-Pérez *et al.* (2001), a ideia de descoberta científica implica em uma atividade científica associada à experimentação. Essa deformação é chamada por Gil-Pérez *et al.* (2001) por uma concepção empírico-indutivista e ateórica. E está amplamente amparada pela visão positivista.

Essa concepção positivista, segundo a qual a ciência é uma coleção de fatos objetivos governados por leis que podem ser extraídas diretamente observando esses fatos com uma metodologia adequada, foi superada – entre filósofos e historiadores da ciência, mas não necessariamente nas salas de aula (Pozo; Crespo, 2009, p. 20).

Como Pozo e Crespo destacam, entre os educadores é comum a ideia de que o conhecimento científico é produzido única e exclusivamente por meio da experimentação e que este, inclusive, precede o conhecimento teórico existente sobre o tema.

Essa ideia parecia muito natural, e qualquer camponês poderia ter feito a mesma consideração; mas o filósofo inglês foi além. ... Com efeito, antes desse grande filósofo, encontrávamo-nos em profunda ignorância acerca do movimento dos corpos celestes, e é a ele que devemos a grande clareza de que gozamos atualmente em astronomia (Euler, 1985, p. 75 e 77, tradução nossa).

No excerto anterior, a ciência aparece como uma extensão “natural” do senso comum ou como simples progressão linear do raciocínio, reforçando a visão empirista-indutivista e a noção de progresso contínuo sem rupturas ou debates.

Também, podemos depreender desse material uma visão individualista e elitista da ciência, que segundo Gil-Pérez *et al.* (2001) é aquela na qual os conhecimentos científicos aparecem como obras de gênios isolados, ignorando-se o papel do trabalho coletivo e cooperativo, dos intercâmbios entre equipes.

Ao afirmar que “estamos em dúvida com o falecido Sr. Newton por esta importante descoberta” (Euler, 1985, p. 74, tradução nossa) e que “[...] é a ele que devemos a grande clareza que desfrutamos atualmente na astronomia” (Euler, 1985, p. 77, tradução nossa), Euler atribui à figura de Newton um papel praticamente exclusivo na chamada revolução científica associada à formulação da lei da gravitação universal. Tal interpretação enfatiza uma narrativa personalista e heroica da ciência, na qual são omitidas as contribuições de outros pensadores fundamentais; como Kepler, Galileu, Hooke, Halley entre outros; bem como o contexto cultural, técnico e social que possibilitou a emergência dessas ideias.

No âmbito do ensino de Ciências, esse tipo de narrativa tende a ser reproduzido por meio de episódios e recursos didáticos amplamente difundidos. Embora diversos aspectos do conhecimento científico e do trabalho científico possam ser transmitidos

de forma geral no ensino, e sejam frequentemente identificados em materiais didáticos e nas práticas docentes (Gil-Pérez *et al.*, 2001), alguns exemplos específicos, como a chamada Anedota da Maçã, merecem destaque e atenção por parte dos professores por reforçarem visões simplificadas e individualizantes da produção do conhecimento científico.

Apesar de aparecer em diversos relatos desde a morte de Newton, nas aulas e em livros didáticos no Brasil e no exterior, não há evidências de que essa história tenha realmente acontecido (Martins, 2006). Vejamos o excerto sobre como Euler descreve a construção da gravitação universal: “Um dia, este grande filósofo e matemático inglês estava deitado em um jardim, sob uma macieira, e uma maçã caiu em sua cabeça, dando-lhe a oportunidade de fazer várias considerações” (Euler, 1985, p.74, tradução nossa).

Esse trecho reforça o mito da maçã como origem da gravitação universal, transmitindo a ideia de que a ciência nasce de um episódio casual e quase mágico, o que empobrece a compreensão da investigação científica.

Vejamos, a partir destas que consideramos como sendo duas importantes distorções sobre a Natureza da Ciência, que podem ser transmitidas aos estudantes durante o ensino de ciências, que ao trabalhar com episódios da história da ciência, assim como qualquer outro material, é importante uma análise cuidadosa sobre como o conhecimento científico é construído. Diante da impossibilidade de sabermos exatamente, ou até mesmo com uma aproximação razoável, como o Newton e outros cientistas pensaram, nós, professores de ciências devemos nos pautar por estratégias didáticas que apresentem suporte teórico e metodológico para o ensino sobre a construção e a evolução do conhecimento científico.

Gomes dos Santos e Bastos Filho (2025a; 2025b) exploraram o método das conexões conceituais para um ensino que proporcione a construção de significados a partir do episódio da medida do raio da Terra por Eratóstenes. Também, sugerimos a construção ou o emprego de reconstruções racionais didáticas, que constituem em reconstruir a história de um conceito a partir de epistemologias contemporâneas (Silva, 2008; Silva; Nardi; Laburú, 2008, 2010; Silva; Laburú; Nardi, 2012).

4 PROCESSOS MENTAIS E ENSINO DE CIÊNCIAS

Os processos mentais que conduzem aos caminhos que levam a um feito grandioso do espírito humano são difíceis de expressão precisa, se apenas nos ativermos à interpretação isolada de qualquer que seja a pessoa que trabalhe à luz de esquemas previamente concebidos de antemão. Isso é verdade para os protagonistas de primeira instância do grandioso feito que se ponha em escrutínio, os quais, para analisarem o que eles próprios realizaram, são submetidos a uma verdadeira maratona para sistematizar as suas respectivas tempestades de ideias pregressas e/ou presentes em um processo de dimensões múltiplas, algumas tangíveis outras intangíveis; isso é verdade também para os hermeneutas de segunda instância que imperiosamente vão ter que lançar teorias prévias e premissas de diversas ordens na tentativa de compreensão do processo aos seus respectivos modos. Tudo isso tem íntima conexão com o ensino de ciências e, com maior razão, com o processo de aprendizagem genuína diante da complexidade envolvida.

Tendo em vista esse quadro, que compreende um turbilhão de ideias e de conceitos ainda não muito bem estabelecidos, talvez seja proveitoso que nos debrucemos, ainda que panorâmica e especulativamente, a analisar desafios históricos de compreensão que indivíduos muito criativos tiveram que se deparar, imersos em seus respectivos contextos socioeconômicos e culturais.

Uma tal exploração intelectual, ainda que seja altamente especulativa e incerta, sobre como as mentes criativas trabalham, ou como podem ou poderiam ter trabalhado, e como elas apresentam diferenças e peculiares cada uma a seu modo, podem ajudar no que se refere ao entendimento de como professores e estudantes podem agir no intuito de melhor aprender, a seu próprio modo, e, além disso, como podem fazer para desenvolver uma melhor capacidade de lidar com situações complexas. Assim, respeitando os próprios níveis de compreensão dos indivíduos, as pessoas têm um amplo espectro de potencialidades criativas e essa convicção tem repercussão no campo da educação científica.

Neste sentido, analisemos algumas particularidades de possíveis processos mentais de alguém considerado enormemente singular na história do pensamento humano e em que medida essa nossa metodologia de ataque seja pertinente ou não para que venhamos a tecer conjecturas sobre processos mentais de outros indivíduos

sejam eles considerados “geniais” ou “normais”. Vamos eleger o singularíssimo exemplo de Isaac Newton.

A fim de nos debruçar sobre esta proposta, lançaremos mão de alguns historiadores e hermeneutas que se dedicaram a estudar personalidades tanto no que diz respeito ao homem quanto no que concerne à obra e aqui enfoquemos este que é uma das mais singulares personagens da história do pensamento humano.

A propósito, seja a seguinte passagem de Arthur Koestler sobre a situação com a qual Newton se deparou e os desafios que teve de superar:

Foram, portanto, as seguintes as partes do quebra-cabeças que Newton teve pela frente por volta de 1660, trinta anos depois da morte de Kepler, e vinte anos depois da morte de Galileu. As peças-chave foram as leis do movimento dos corpos celestes, de Kepler, e as leis do movimento dos corpos na terra, de Galileu. Mas os dois fragmentos não se ajustavam (como não se ajustam hoje a relatividade e a mecânica dos quanta) (Koestler, 1989, p. 348).

Aqui estamos no contexto de descrições e explicações de índole matemática dos fenômenos e como tal, os obstáculos, como aquele de abandonar o céu da religião enquanto categoria passível de ser estudada cientificamente e considerar apenas o céu da astronomia, já não estão mais em pauta, pelo menos ao nível em que seriam obstáculos quase intransponíveis para um dado contexto histórico de grande predominância teológica²⁵. O que está em pauta é a situação de fragmentação: as leis terrestres são descritas pelas leis de Galileu e as leis dos movimentos dos planetas são descritas pelas leis de Kepler e nada parecia unir as leis que regem os fenômenos nesses dois domínios. Koestler ainda alude, por analogia, à comparação dessa situação com a atual e correspondente situação da incomensurabilidade entre as leis da relatividade e as leis da mecânica quântica.

Continuemos a seguir os argumentos de Koestler, acrescentando os nossos comentários e pareceres sobre a sua análise:

As forças que impeliam os planetas no modelo kepleriano não resistiam ao escrutínio do físico. E, vice-versa, as leis da queda dos corpos e dos projéteis de Galileu não possuíam relação aparente com os movimentos dos planetas nem dos cometas. Segundo Kepler, os planetas moviam-se em elipses;

²⁵ Há que se fazer aqui um contraponto; o conceito newtoniano de espaço enquanto sensório de Deus foi severamente criticado por Leibniz por ocasião da correspondência Leibniz-Clarke.

segundo Galileu, em círculos. Segundo Kepler, eram movidos pelos “raios” de uma força oriunda do Sol girante; segundo Galileu, não eram absolutamente movidos porque o movimento circular perpetuava a si próprio. Segundo Kepler, a preguiça ou inércia dos planetas fazia com que eles tendessem a ficar para trás; segundo Galileu, o próprio princípio de inércia os fazia persistir em girar em círculos. “Tudo estava em pedaços; não havia coesão” (Koestler, 1989, p. 348).

Debrucemo-nos sobre comentários acerca do excerto precedentemente disposto.

Ora, Koestler argumenta que *estava tudo em pedaços* e trata o desafio newtoniano como algo que requeria uma *síntese*, assim como o próprio título do capítulo²⁶ correspondente assim o expressa. Mais adiante, traremos à tona uma discussão atinente à pertinência ou não da palavra *síntese* para caracterizar o desafio e se ela (a palavra *síntese*) faz jus à monumental complexidade do ato criador newtoniano.

No momento, debrucemo-nos sobre uma apreciação interpretativa do excerto supra destacado começando pelo argumento segundo o qual *as forças que impeliam os planetas no sistema kepleriano não resistiam ao escrutínio do físico*. Certamente, as forças impelidoras as quais se refere Kepler nada têm a ver com as forças newtonianas; essa harmonia contempla o conjunto de planetas, ou seja, a concepção de Kepler definitivamente se reporta a um sistema de muitos corpos.

Para efeitos de comparação, se Kepler, por um lado, estava imbuído da bela ideia de uma espécie de harmonia universal envolvendo um conjunto de corpos, por outro, o sistema penetrante de Newton iria se basear em uma interação a dois corpos segundo uma lei que era universalmente válida para quaisquer duas massas newtonianas do universo. Deste modo, podemos concluir que Kepler e Newton trabalharam em universos conceituais distintos. Ainda à luz da crítica popperiana à indução, poderíamos acrescentar que uma pressuposta passagem indutiva da teoria de Kepler para a teoria de Newton não se sustentaria na medida em que a partir da premissa de um sistema que envolve uma multiplicidade de corpos não poderíamos

²⁶ Trata-se do capítulo III da quinta parte do livro de Koestler; o mencionado capítulo foi intitulado **Síntese Newtoniana**; a primeira seção do capítulo tem o título de **tudo está em pedaços**.

logicamente justificar o resultado de chegada segundo o qual teremos um sistema de dois corpos, ou seja, que se reportasse a uma interação envolvendo dois corpos.

Passemos agora aos nossos comentários atinentes ao importantíssimo e originalíssimo resultado de Kepler segundo o qual as órbitas dos planetas são elípticas e sua correspondente confrontação com a adoção epistemológica galileana, que aliás tem lavra platônica, segundo a qual as órbitas circulares são expressão da perfeição. Efetivamente, em função da excelente precisão dos resultados de Ticho Brahe (1546 - 1601), a descoberta de um desvio de 8 minutos de arco na órbita descrita por Marte era um indicador expressivo de que essa órbita era elíptica e não circular; diferentemente do que concebia Galileu, as órbitas correspondentes eram circulares em torno do Sol seguindo uma tradição de lavra platônica.

Como conciliar as órbitas elípticas de Kepler com as órbitas circulares de Galileu? De um ponto de vista estritamente geométrico a figura plana chamada elipse é o lugar geométrico no plano cuja soma das distâncias entre cada um de seus pontos a seus dois focos é uma constante. Se os focos coincidem, então a elipse redonda em uma circunferência e os dois focos coincidentes constituem o centro da circunferência. Órbitas circulares são uma aproximação das órbitas elípticas.

A questão da inércia é, no entanto, mais complexa, pois o movimento circular não pode persistir como mostrou Descartes (Descartes, 1952, p.634),²⁷ e desta maneira, era ainda necessário a grande contribuição de Newton para substancialmente progredir. Para um ensaio explicativo, ver (Costa de Lucena, *et al.*, 2024).

Outro ponto de grande importância é a da concepção de ações entre corpos separados de distâncias astronômicas: as famosas ações a distância; como isso seria possível à luz da analogia da criança que gira uma pedra em torno de si mediante uma cordinha.

Newton, muitíssimo provavelmente, teria usado o *princípio do tudo se passa como se fosse e que, além disso, o modelo de realidade não é a própria realidade*; o

²⁷ Ver, em especial, a seção 39 da segunda parte dos *Princípios de Filosofia* de Descartes em cujo título está escrito “[...] que todos os corpos que se movem, tendem a continuar seu movimento em linha reta” cujo original em francês é: “[...] que tout corps qui se meut, tend à continuer son mouvement en ligne droite”.

modelo da realidade nada mais é do que um modelo da realidade e assim driblou a matéria sutil e os seus vórtices que são conceitos de lavra cartesiana.

Teçamos agora algumas considerações atinentes ao termo **Síntese** e se esta palavra se adequa à grandiosidade do feito Newtoniano. Para tanto, tomemos uma citação de um estudioso que escreveu livros influentes sobre Newton:

Obviamente, Newton foi um gênio, no nível máximo de genialidade nas ciências físicas, comparável a um grupo seletivo de homens que (no meu juízo) compreende Arquimedes, Laplace, Einstein, Rutherford e Fermi. Mas dizer isto, não é que ajude mais a nossa compreensão do que falar de uma “síntese” na formulação da ciência newtoniana. Nós estamos (pelo menos, até então) privados de instrumentos adequados para a análise do gênio de Newton e na tentativa de reconstruir ou a natureza ou a gênese e formulação de tal gênio. O estudo da sequência de transformações que conduziram Newton à gravitação universal e à ciência dos *Principia* revela, no entanto, o modo de ação da sua imaginação científica criativa. Obviamente o passo essencial, a transformação final, o supremo esforço criativo que possibilitou a Newton de revelar o universo e as suas partes funcionantes como um sistema coerente de mecânica racional concebido no conjunto da lei do inverso do quadrado, permanece ainda envolto em mistério, até mesmo se fosse abstruído da categoria de miraculoso e colocado em nível parcialmente compreensível do gênio Humano supremo (Cohen, 1982, p. 230-231; tradução nossa a partir da edição italiana de 1982).

Vejamos agora se constitui algo proveitoso para o Ensino de Ciências rotularmos esquematicamente o pensamento de alguém e, em especial, esquematizarmos como “realmente” Newton pensou, para então nos julgarmos aptos para o mister de psicanalizar alguém, independentemente de quem seja, inclusive Newton e outros pensadores de grande envergadura criativa.

Articular conceitos como massa, força, ação à distância, espaço e tempo absolutos, entre outros, em um sistema coerente, como o realizado por Newton, está longe de constituir uma síntese trivial. Atribuir essa realização à ideia de um suposto sonambulismo criativo; ou ainda sugerir que Newton teria simplesmente se apoiado “nos ombros de outros gigantes do sonambulismo”; pouco contribui para a compreensão efetiva do processo de construção de sua teoria.

Em Bachelard (1996), o termo sonambulismo não designa um estado místico ou intuitivo, mas uma condição epistemológica na qual o pensamento opera de modo eficaz, porém guiado por hábitos intelectuais e pressupostos não explicitados. Longe de explicar a gênese das grandes teorias científicas, como a Teoria da Gravitação

Universal, essa noção é mobilizada justamente para ressaltar a necessidade de ruptura e vigilância epistemológica.

Nesse sentido, mesmo que o episódio da queda da maçã possa ser interpretado como um momento de *insight* abdutivo, nos termos da abdução discutida por Peirce (1989) e retomada em análises contemporâneas (Bastos Filhos, 1995), tal episódio só é minimamente plausível se compreendido como parte de um longo processo de elaboração intelectual. Um *insight* dessa natureza apenas faz sentido para alguém que já refletia reiteradamente sobre o problema, de modo que não há, nesse processo, nada de misterioso ou repentino, mas sim um encadeamento racional e historicamente situado de ideias.

Todo ato criativo contém pelo menos duas faces: uma face é o da disciplina racional, mas essa disciplina racional não deve dispensar a outra face que é o do devaneio pois ambas as faces são essenciais para o ato criativo tal como chamou a atenção Gaston Bachelard (Bachelard, 1996).

Concebemos que uma atividade educativa que leva o tema para a sala de aula e outras instâncias menos formais deve fomentar muitos *insights* para a discussão da natureza da ciência.

Mas em um ensino fragmentado, onde na maioria das vezes o professor não permite que o aluno tenha liberdade intelectual para encontrar a solução dos problemas é muito pouco provável que ocorram *insights* criativos que suscitem um aprendizado pleno de significados. Isso acontece quando o professor apresenta uma questão, mas não oferece condições para que os alunos pensem e respondam a questão, o próprio professor a responde como uma etapa natural da exposição do conteúdo (Carvalho, 2018). Convenhamos que essa postura didática inibi ou limita a imaginação dos alunos. Ensinar não se confunde com apresentar questões e suas respectivas respostas; aprender, nesse contexto, é memorizar as questões e suas respectivas respostas.

O sucesso do desenvolvimento científico, diferentemente do sucesso escolar tradicional, ocorre quando pesquisadores se dedicam à resolução de problemas para os quais não há, naquele momento, respostas amplamente aceitas. Nesse sentido, o êxito da obra de Newton está associado à elaboração de novas explicações para os problemas relativos ao movimento dos corpos, rompendo com modelos explicativos anteriormente estabelecidos e que passaram a não apresentar respostas aceitáveis.

Como já discutido neste trabalho, identificar com precisão os processos mentais envolvidos na elaboração dessas explicações constitui uma tarefa de grande relevância para a ciência e para o ensino de Ciências, mas permanece, em grande medida, no campo da especulação. Ainda assim, é possível afirmar que Newton atuou em um contexto de significativa liberdade intelectual, condição que lhe permitiu explorar hipóteses, reformular conceitos e articular ideias de modo inovador. À luz dessa compreensão, defende-se que propostas de ensino de Ciências voltadas a uma aprendizagem autêntica devem constituir espaços que articulem o rigor racional com a valorização da liberdade intelectual dos estudantes. Isso implica permitir a formulação de hipóteses, o exercício do pensamento imaginativo e a construção de utopias intelectuais, como alternativas à prática pedagógica marcada pela fragmentação conceitual que ainda predomina em muitas salas de aula de Ciências.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ensino da Teoria da Gravitação Universal ou ensino sobre a Teoria da Gravitação Universal? A diferença é sutil, mas significativa, pois, compreendê-la implica nas escolhas que definirão o processo didático. No primeiro caso, o ensino tem como enfoque o conteúdo em si, nas explicações dos conceitos centrais (força gravitacional, massa, distância etc.) e na resolução de problemas matemáticos. No segundo, o foco do processo didático é deslocado para reflexões e discussões sobre a ciência (metaciência²⁸). Compreender como a teoria foi construída, validada e como evolui ao longo da história da ciência passam a fazer parte dos objetivos de aprendizagem. As discussões teóricas que propomos neste trabalho têm como objetivo subsidiar processos didáticos que sejam adequados ao ensino sobre a gravitação universal.

²⁸ Na perspectiva de Imre Lakatos, a metaciência corresponde ao nível de análise no qual a própria ciência é examinada por meio de uma reconstrução racional de seu desenvolvimento histórico, especialmente a partir da comparação entre programas de pesquisa científicos (LAKATOS, 1979). Trata-se de uma abordagem de segunda ordem que não visa explicar diretamente fenômenos naturais, mas compreender os critérios de racionalidade, progresso e degenerescência das teorias científicas ao longo do tempo. Ao articular história e filosofia da ciência, a metaciência lakatosiana busca oferecer uma leitura normativa e crítica da prática científica, evidenciando que a avaliação do conhecimento científico depende de contextos históricos e de estruturas teóricas em competição, e não de um método científico único e universal.

À luz do objetivo deste estudo, promover a compreensão ampla de conceitos científicos a partir de episódios da história da ciência, em particular por meio de reconstruções racionais didáticas, defendemos que as discussões desenvolvidas em torno do episódio da Teoria da Gravitação Universal de Newton constituem um referencial fecundo para o ensino de Ciências. Também, que em certa medida, o trabalho realizado permitiu delinear uma estrutura epistemológica que se mostra adequada ao ensino desse conteúdo, na medida em que favorece a articulação entre aspectos conceituais, históricos e epistemológicos da produção do conhecimento científico.

Essa estrutura dialoga com princípios considerados centrais para o ensino de Ciências, como os processos metacognitivos, a valorização das concepções dos estudantes e a necessária transposição didática do conhecimento científico, entendida como uma reconstrução profunda da ciência para fins de ensino (Izquierdo-Aymerich; Adúriz-Bravo, 2003).

Sob quaisquer perspectivas, o desenvolvimento do conhecimento científico é um empreendimento complexo, assim como é o seu ensino, que devido a essa complexidade, exige que para a sua plena compreensão que ele seja explorado sob vários pontos de vista. Mas em sala de aula os professores precisam fazer escolhas sob as quais eles não possuem total autonomia, haja vista que devem considerar o currículo escolar e outros aspectos, tais como, carga horária, recursos didáticos disponíveis etc. Também, devemos levar em conta que a visão de ciência dos professores, ou qualquer pessoa que se disponha a ensinar sobre a ciência, influencia diretamente suas escolhas didáticas e pedagógicas (Gil-Pérez *et al.*, 2001; Izquierdo-Aymerich; Adúriz-Bravo, 2003).

Nesse sentido, a estrutura conceitual que propomos para o desenvolvimento de situações de ensino e/ou reconstruções racionais didáticas para a abordagem histórica da Teoria da Gravitação Universal, oferece um importante parâmetro didático. Ou seja, discussões, articulações, interpretações e especulações que foram suscitadas a partir da análise do desenvolvimento da teoria da gravitação universal, constituem um ponto de partida para as escolhas que resultarão em situações de ensino com potencial para o ensino sobre a construção e o desenvolvimento do conhecimento científico.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDER, H. G. **The Leibniz-Clarke correspondence**. Manchester University Press, Barnes & Noble, New York, 1956.

ALVES DE ARAÚJO, E. S. **O desencantamento do mundo: uma reflexão necessária para o ensino de ciências e matemática**. 2013. 75f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Educação, Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática - PPGECEM/UFAL, Maceió, 2013.

AUSTRILINO SILVA, L.; BASTOS FILHO, J. B. Which is the “true force”? Descartes’ quantity of motion or Leibniz’s “vis viva”? In: **Third International History, Philosophy, and Science Teaching Conference**, 3, Minneapolis, Minnesota, EUA, 29 out. – 1 nov. 1995a. p. 1068-1079.

AUSTRILINO SILVA, L.; BASTOS FILHO, J. B. Crítica de Leibniz concernente ao problema da “verdadeira” força. **Scientia**, São Leopoldo, v. 6, n. 1, p. 65-88, 1995b.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Tradução de Estela dos Santos Abreu. 1. ed. (5. reimpr.). Rio de Janeiro: Contraponto Editora Ltda, 1996. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fis2008/Bachelard1996.pdf>. Acesso em: 01 maio 2025.

BASTOS FILHO, J. B. Cartesian and newtonian concepts of mass. **American Journal of Physics**, v. 54, n. 3, p. 201-202, 1986. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/aip/article-abstract/54/3/201/1044390/Cartesian-and-Newtonian-concepts-of-mass?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 03 set. 2025.

BASTOS FILHO, J. B. Comment on Letter by Erlichson. **American Journal of Physics**, v.55, n. 11, p. 969, 1987. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/aip/article-abstract/55/11/969/1044106/Comment-on-letter-by-H-Erlichson?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 05 set. 2025.

BASTOS FILHO, J. B. A unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler à luz da crítica popperiana à indução. **Rev. Bras. Fís.**, v. 17, n.3, p. 233-242, set. 1995. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a28.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2025.

BASTOS FILHO, J. B. Descartes, Leibniz, Newton and modern physics: plenum, action at a distance and locality. In: CONTI, L.; MAMONE CAPRIA, M. (org.). **La Scienza e i Vortici del Dubbio**. Napoli: Edizioni Scientifiche Italiane, 1999. p. 327-356.

BASTOS FILHO, J. B. Reconstruções racionais de episódios da história da ciência sob um viés epistemológico: fundamentação. In: CARUSO, F. **Roberto, o amigo: Roberto Moreira e a história e filosofia da ciência**. São Paulo: Livraria da Física, 2017. p. 75 – 115.

BASTOS FILHO, J. B. Unificação newtoniana à luz de uma reconstrução racional sob viés epistemológico. **Psicologia e Saberes**, Maceió, v. 7, n.8, p. 3 – 19, 2018. Disponível em: <https://revistas.cesmac.edu.br/psicologia/article/view/771/644>. Acesso em: 15 set. 2022.

BASTOS FILHO, J. B.; XAVIER DE ARAÚJO, R. M. Conflitos entre os *Principia* de Newton e os *Principia* de Descartes. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, série 2, 1, (1), p. 65-76, 1989.

BRANDÃO, R. V. **A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no Ensino de Física**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BURTT, E. A. **As bases metafísicas da ciência moderna**. Tradução de José Viegas Filho e Orlando Araújo Henriques. Revisão de Paulo Cesar de Moraes. Brasília: Editora da Universidade de Brasília - UnB, 1991.

CARVALHO, A. M. P. Fundamentos teóricos e metodológicos do ensino por investigação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 18, n. 03, p. 765-794, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2018183765>. Acesso em: 18 set. 2025.

COHEN, I. B. **La rivoluzione newtoniana**: con illustrazioni della trasformazione di idee scientifiche. Milano: Feltrinelli, 1982.

COMCIÊNCIA. **Carta ao leitor**. ComCiência: Revista Eletrônica de Jornalismo Científico, n. 63, 2005. Disponível em: <https://www.comciencia.br/dossies-1-72/200503/carta/index.shtml>. Acesso em: 31 ago. 2025.

COSTA DE LUCENA, M. P.; MONTEIRO, M. A.; BASTOS FILHO, J. B. Lei de Inércia como divisor de águas na história da ciência ocidental: uma possível argumentação. In: BARROS, M. A.; BASTOS FILHO, J. B.; CAMPOS, A. (org.). **Pesquisas em Ensino de Física**: Múltiplos Olhares. Campina Grande: EDUEPB, 2024. cap. 3. Disponível em: <https://eduepb.uepb.edu.br/publicacoes-2024/>. Acesso em: 02 maio 2025.

DESCARTES, R. Les principes de la philosophie. In: BRIDOUX, A. (org.). **Descartes**: oeuvres et lettres. Paris: Bibliothèque de la Pléiade, 1952.

DESCARTES, R. **Discurso do método**. Tradução de J. Guinsburg e Bento Prado Júnior; introdução de Gilles-Gaston Granger; prefácio e notas de Gérard Lebrun. São Paulo: Nova Cultural, 1987. (Coleção Os Pensadores; v. Descartes I).

EULER, L. Carta a una princesa alemana sobre diversos temas de física y filosofía. In: RIOJA, A. (org.). **Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia**. Introducción, selección, traducción y notas de Ana Rioja. Madrid: Alianza Editorial, 1985. p. 39–179.

FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27–59, 2011. Disponível em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2011v28n1p27?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 ago. 2025.

GALILEI, G. **O ensaiador**. São Paulo: Nova Cultural, 1987. (Coleção Os Pensadores; v. Galileu/Newton).

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico & copernicano**. Tradução, introdução e notas de Pablo Rúben Mariconda. 2. ed. São Paulo: Discurso Editorial/Imprensa Oficial, 2004.

GIL-PÉREZ, D.; MONTORO, I. F.; ALIS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125153, 2001. Disponível em: http://educa.fcc.org.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132001000200001. Acesso em: 12 fev. 2025.

GRUPO DE REESTRUTURAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). Física 1: mecânica. 5. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.

HEIDEMANN, L. A. **Ressignificação das atividades experimentais no ensino de física por meio do enfoque no processo de modelagem científica**. 2015. 298 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HESSEN, B. T. The social and economic roots of Newton's Principia. In: BUKHARIN, N. I. et al. (ed.). **Science at the cross roads**: papers presented to the International Congress of the History of Science and Technology held in London from June 29th to July 3rd, 1931 by the delegates of the U.S.S.R. London: Frank Cass & Co. Ltd., 1971. p. 147–212.

IZQUIERIDO-AYMERICH, M.; ADÚRIZ-BRAVO, A. epistemological foundations of school science. **Science & Education**, 12, p. 27-43, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022698205904>. Acesso em: 02 maio 2025.

KOESTLER, A. **O Homem e o universo**: como a concepção do universo se modificou através dos tempos. Tradução de Alberto Dinis. 2. ed. São Paulo, Instituição Brasileira de Difusão Cultural Ltda. IBRASA, 1989.

LAKATOS, I. O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In: LAKATOS I.; MUSGRAVE, A. (org.). **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo: Cultrix; Editora da Universidade de São Paulo, 1979. p. 109-243.

LAKATOS, I. **Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales**. Madrid: Editora Tecnos, 1987.

LEIBNIZ, G. W. Discurso de Metafísica. In: **Tratados fundamentales**. Buenos Aires: Editorial Losada, S. A. p. 93-148, 1947.

LEIBNIZ, G. W. **Correspondência com Clarke**. Tradução e notas de Carlos Lopes de Matos. São Paulo: Abril Cultural, 1988. v. 2. (Coleção Os Pensadores).

MÄNTYLÄ, T.; KOPONEN, I. T. Understanding the role of measurements in creating physical quantities: a case study of learning to quantify temperature in physics teacher education. **Science & Education**, v. 16, n. 3, p. 291-311, 2007. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/227088898 Understanding the Role of Measurements in Creating Physical Quantities A Case Study of Learning to Quantify Temperature in Physics Teacher Education](https://www.researchgate.net/publication/227088898_Understanding_the_Role_of_Measurements_in_Creating_Physical_Quantities_A_Case_Study_of_Learning_to_Quantify_Temperature_in_Physics_Teacher_Education). Acesso em: 11 nov. 2023.

MARTINS, R. A. A maçã de Newton: história, lendas e tolices. In: SILVA, C. C. (org.). **Estudos de história e filosofia das ciências**: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. p. 167-189.

MARTINS, A. F. P. História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24, n.1, p.112-131, abr. 2007. Disponível em:
<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6056/12761>. Acesso em: 13 jul. 2025.

MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro De Ensino De Física**, v. 32, n. 3, p. 703–737, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p703>. Acesso em: 13 jul. 2025.

MASSONI, N. T; CARVALHO, F. de A. Caminhos para a inserção da Natureza da Ciência na Educação Básica: alguns resultados de pesquisa a partir de uma disciplina na Licenciatura de Física. **Revista de estudios y experiencias en educación**, v. 21, n. 45, p. 183–208, 2022. Disponível em:
<https://www.rexe.cl/index.php/rexe/article/view/1135>. Acesso em: 21 abr. 2024.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, jan. 1995. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7084>. Acesso em: 24 fev. 2023.

MOURA, B. A. O que é natureza da ciência e qual sua relação com a história e filosofia da ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 1, p. 32-46, jan./jun. 2014. Disponível em:
<https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/237>. Acesso em: 14 dez. 2024.

OLIVEIRA, V. **Resolução de problemas abertos para aprendizagem de física no Ensino Médio na perspectiva da modelagem didático-científica**. 2018. 186 f. Tese

(Doutorado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

OLIVEIRA, R. A.; MARTINS, A. F. P.; SILVA, A. P. B. Temas de Natureza da Ciência a partir de episódios históricos: os debates sobre a natureza da luz na primeira metade do século XIX. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, p. 197–218, 6 abr. 2020. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8086222>. Acesso em: 20 ago. 2025.

PASCAL, B. **Pensamentos**. Tradução de Sérgio Milliet; introdução e notas de Ch.-M. des Granges. 4. ed. São Paulo: Nova Cultural, 1988. (Coleção Os Pensadores; v. Pascal).

PEIRCE, C. S. Escritos coligidos. In: PEIRCE, C. S.; FREGE, G. (org.). **Os Pensadores**: Peirce – Frege. São Paulo: Nova Cultural, 1989.

POPPER, K. R. **Conocimiento objetivo**. Madrid: Editorial Tecnos S.A. 1974a.

POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Editora Cultrix, 1974b.

POPPER, K. R. **Conjecturas e refutações**. 2. ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília (UnB), 1982.

POZO, J. I.; CRESPO, M. A. G. **A aprendizagem e o ensino de ciências**: do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico. 5^a. ed. Porto Alegre: Artimed, 2009.

SCHÖNBERG, M. **Pensando a física**. 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 1985.

SILVA, O. H. M. **Um estudo sobre a estruturação e aplicação de uma estratégia de ensino de física inspirada em Lakatos com a reconstrução racional didática para auxiliar a preparar os estudantes para debates racionais entre teorias e/ou concepções rivais**. 2008. 280 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2008.

SILVA, O. H. M.; NARDI, R.; LABURÚ, C. E. Uma estratégia de ensino inspirada em Lakatos com instrução de racionalidade por uma reconstrução racional didática. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 10, n.2, p. 09–26, jun. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ensaio/article/view/10402>. Acesso em: 05 maio 2023.

SILVA, O. H. M.; NARDI, R.; LABURÚ, C. E. Um estudo dos avanços conceituais dos estudantes sobre calor e temperatura decorrentes da aplicação de uma estratégia de ensino inspirada na teoria de Lakatos. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, v. 5, n. 1, p. 1–18, 19 jul. 2010. Disponível em: <https://reiec.unicen.edu.ar/reiec/article/view/50>. Acesso em: 05 maio 2023.

SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E.; NARDI, R. Contribuições da reconstrução racional didática do desenvolvimento de concepções epistemologicamente mais aceitáveis sobre a natureza da ciência e do progresso científico. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 14, n.1, p. 65–80, abr. 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ensaio/article/view/34673>. Acesso em: 05 maio 2023.

SILVA OLIVEIRA, C. E.; FIREMAN, E. C.; BASTOS FILHO, J. B. A Solução atribuída a D'Alembert sobre a 'verdadeira força' é capaz de dirimir a polêmica ensejada pela crítica de Leibniz a Descartes? **Investigações em Ensino de Ciências**, vol. 18, n. 3, p. 581-600, 2013. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/115/79>. Acesso em: 11 mar. 2025.

ZABALA, A. **A prática educativa**: como ensinar. Porto Alegre: ArtMed, 1998.

CONSIDERAÇÕES

Esta tese teve como propósito investigar em que medida a integração entre o método das Conexões Conceituais e as Reconstruções Racionais Didáticas (RRD) pode favorecer a construção e a ressignificação de significados em aulas de Ciências, especialmente em contextos de ensino nos quais as dimensões históricas e epistemológicas da ciência tendem a ser pouco exploradas ou mesmo ausentes. Parte-se da compreensão de que a aprendizagem científica se enriquece quando os conceitos são situados em redes de relações conceituais e em processos históricos de produção do conhecimento, o que enseja o surgimento de elementos facilitadores em prol de um ensino articulado visando uma educação genuinamente multidisciplinar (Bittencourt, 2006).

Para alcançar esse objetivo, foram desenvolvidos quatro estudos independentes (quatro artigos), nos quais exploramos episódios da história da ciência à luz de dois referenciais teórico-metodológicos: Conexões Conceituais e as Reconstruções Racionais Didáticas, compreendidos tanto como instrumentos de análise epistemológica de episódios históricos quanto como metodologias para o ensino de Ciências. Em cada estudo, essas abordagens foram mobilizadas de forma isolada ou integrada, de modo a explorar suas potencialidades para ampliar a compreensão da ciência e de suas práticas.

Em razão da adoção do formato *multipaper*, no qual a tese se organiza como um conjunto de artigos independentes, as Considerações Finais foram estruturadas em três seções. Na primeira, intitulada **SÍNTESE DOS ESTUDOS QUE COMPÕEM ESTA TESE**, são retomados os principais resultados, discussões e ideias desenvolvidas ao longo dos artigos. Na segunda, **CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E PARA A PESQUISA NA ÁREA**, são explicitadas as implicações do estudo para o ensino, a pesquisa e a formação de professores. Por fim, na seção **A TÍTULO DE CONSIDERAÇÕES FINAIS**, apresentam-se reflexões de caráter integrador e prospectivo, visando explicitar as contribuições gerais da tese e possíveis desdobramentos futuros.

SÍNTESE DOS ESTUDOS QUE COMPÕEM ESTA TESE

Neste trabalho, cada capítulo/artigo consiste em um estudo independente sobre o tema ensino de ciências a partir de abordagens históricas. São independentes porque cada um destes estudos possui sua própria autonomia, em que as categorias conceituais, em cada um deles trabalhadas, assumem de per si um sentido de unidade, ainda que parcial; esse sentido de unidade também permite que cada um desses pares de capítulos/artigos converse entre si; além disso, assim o supomos, ao conversarem entre si eles tem o potencial de ensejar novas relações e significações em sucessivas recorrências. Pensamos que seja esse um dos objetivos precípuos de um ensino que persegue a produção de significados. Deste modo, todos buscam apresentar ao leitor múltiplas maneiras de abordar episódios da história da ciência no ensino de ciências, mas não de qualquer ensino, mas sim de um ensino que tem como objetivo precípicio suscitar uma aprendizagem plena de significados. A título de síntese, abaixo apresentaremos os principais resultados obtidos em cada um dos estudos para em seguida promovermos o encontro destes a partir da questão de pesquisa e dos objetivos propostos.

No que concerne ao **Artigo 1** intitulado ‘**Conexões para um Ensino de Ciências Multidisciplinar a partir do Seminal Feito de Eratóstenes**’, e tal como o próprio título sugere, seu objetivo mais transparente consiste em ensejar um ensino que proveja a articulação de conexões que visem uma prática pedagógica genuinamente multidisciplinar. O episódio escolhido para gerar tais articulações foi o da medida do raio da Terra por Eratóstenes de Alexandria. Essas articulações foram realizadas em um pano de fundo ancorado na confluência Ciência-Arte-Filosofia e a escolha do episódio da história da ciência foi motivado pelos menos por quatro razões principais: 1) a primeira de tais razões reside no fato deste episódio constituir, ainda hoje, um emblemático exemplo, seja como metáfora ou não, contra a atitude do mais alto grau de obscurantismo intelectual caracterizado *lato sensu* pelo assim chamado terraplanismo; 2) a segunda de tais razões consiste em articular um problema que em princípio seria meramente restrito a um ensino *stricto sensu*, ou seja, um problema que seria apenas e tão somente restrito ao referencial teórico da geometria de Euclides, mas, diferentemente de um ensino do gênero, ele permite ampliar

potencialidades ensejando, por conseguinte, conexões que pertencem a um amplo espectro de relações Arte-Ciência-Filosofia, concepção de ensino essa que atende muito mais consistentemente ao projeto multidisciplinar; 3) a terceira de tais razões consiste em afirmar que o episódio, -quando relacionado à crítica aristotélica da impossibilidade do infinito e das razões de lavras de Aristarco de Samos, de Copérnico e de Galileu em prol do heliocentrismo e em detrimento do geocentrismo-, já se constitui, ele próprio, em poderoso argumento contra o geocentrismo; 4) a quarta de tais razões reside precisamente em prover meios para a discussão qualificada acerca da não-linearidade do desenvolvimento histórico, ou seja, como foi possível depois de desenvolvimentos tão notáveis, passar a se acreditar em concepções tão pré-científicas como de uma suposta terra “plana”.

No que concerne ao **Artigo 2**, intitulado **‘A natureza do espaço: alguns problemas epistemológicos suscitados pelo seminal episódio de Eratóstenes’** podemos dizer que ele parte do mesmo problema gerador do artigo pregresso que era o da medida do raio da Terra, porém o problema é analisado à luz de um conjunto de categorias conceituais diferentes em relação àquelas das quais lançamos mão para ressaltar a importância de seu teor, circunstância essa que mostra a riqueza conceitual que um simples problema- ou aparentemente um simples problema- pode representar no contexto da história cultural humana. De identidade com o artigo pregresso, podemos aduzir que além do próprio tema gerador, há também aquela referente à adequação a uma prática pedagógica de natureza multidisciplinar na qual as disciplinas conversam entre si e, desta forma, os professores e estudantes tem a oportunidade de sair de seus quadrados mentais, o que no fundo representariam camisas-de-força cognitivas. No artigo em tela, partimos do confronto entre as teorias, respectivamente, de um lado, a dos dois mundos qualitativamente distintos de Aristóteles, e de outro lado, da teoria de Eratóstenes que no fundo identifica o espaço natural envolvendo Terra e Sol com o espaço da geometria de Euclides. Ao longo desse artigo as teorias de Aristóteles e de Eratóstenes são confrontadas à luz das categorias filosóficas de **Ser** e de **Devir** de lavras, respectivamente parmênidiana e heraclitiana. A discussão é ampliada ao incluir a crítica galileana ao éter aristotélico e em seguida implementada uma discussão que redunda numa primeira inversão epistêmica galileana em favor da mudança e do devir acompanhado de uma outra mudança epistêmica galileana desta feita em favor da permanência e do ser que

caracteriza os invariantes matemáticos da física pós galileana e pós newtoniana, talvez com exceção do conceito termodinâmico de entropia. No decorrer do artigo são implementadas algumas discussões epistemológicas à luz de considerações trazidas por Prigogine e Stengers (Prigogine; Stengers, 1984), além de outras envolvendo os conceitos de *estranhamento do mundo* e de *desencantamento do mundo*. O artigo em tela ainda explora uma importante discussão, à luz de considerações de Einstein sobre os dois tipos de espaço com os quais a física historicamente lança mão, associando-o a dois tipos possíveis de educação. Nessa discussão, a concepção de espaço enquanto detentor de primazia em relação aos objetos materiais eventualmente nele contidos é associada a uma educação bancária no sentido freiriano do termo, enquanto uma concepção de espaço que atribua o mesmo estatuto ontológico e epistemológico indissolúvel tanto ao próprio espaço quanto aos objetos a ele indissoluvelmente relacionados é associada a uma educação dialógica na qual todos os atores são protagonistas imprescindíveis de seus próprios aprendizados e de suas próprias educação.

No que concerne ao **Artigo 3** intitulado '*O Ensino da Gravitação Universal à Luz dos Métodos Combinados das Conexões Conceituais e das Reconstruções Racionais Didáticas*', diríamos que embora o seu tema gerador não seja focado apenas em um episódio isolado o qual tenha potencialidade de prover conexões conceituais e sim em um processo que perpassa dois séculos (XVI e XVII) e que portanto exige um maior esforço a fim de que tais conexões conceituais sejam articuladas, ele guarda com os dois outros artigos pregressos o objetivo comum de enriquecer o ensino que se insere em uma prática pedagógica multidisciplinar. De antemão, no presente caso, nos debruçamos sobre um processo realmente complexo e passível de ser estudado sob os mais amplos e diversos vieses, todos, e cada um deles, mesmo se considerados de per si, enormemente complexos. Ao longo do artigo 3 definimos como objetivo precípua do trabalho o seguinte: Investigar de que maneira a combinação dos métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas, aplicada ao estudo de episódios históricos da ciência, em especial àqueles da Revolução Científica dos séculos XVI e XVII, pode favorecer a superação da fragmentação cognitiva e potencializar a produção de significados e ressignificados, contribuindo para uma formação científica crítica, criativa e cidadã. Os dois métodos combinados, ou seja, o das conexões conceituais com o das reconstruções racionais

didáticas se aproximam do método da modelagem que segundo Cohen (1981) e Hestenes (1992) foi a marca dominante que caracterizou o espírito criador de Newton e desafia até hoje as cabeças mais sutis a seguirem o seu raciocínio tão enormemente brilhante quanto filosoficamente considerado pouco consistente. A RRD, no fundo, consiste em uma narrativa racional que tem o potencial pedagógico de juntar as partes do quebra-cabeça que consiste, por um lado, em uma ciência local cujo parâmetro característico é a aceleração local com que os corpos caem a pequenas alturas na superfície de cada astro que se considere, com, por outro lado, uma ciência astronômica cujo parâmetro característico é a constante que aparece na terceira lei de Kepler. Ambas as constantes não são universais, na medida em que se referindo a sistemas particulares, mas ambas necessariamente devem estar ligadas por uma constante universal, que é a constante de gravitação universal **G**, válida para qualquer caso.

No que concerne ao **Artigo 4**, intitulado ***Discussões sobre o Ensino de Ciências suscitadas a partir da Teoria da Gravitação Universal: Categorias Conceituais, Natureza da Ciência e Processos Mentais*** diríamos que ele se encontra em continuidade conceitual com o artigo imediatamente pregresso e, tal como o título expressa, explora as categorias conceituais das quais lançamos mão ao longo da construção do trabalho, além da discussão sobre a Natureza da Ciência e de uma apreciação sobre os Processos Mentais com os quais os pensadores lançaram mão para dar conta de um empreendimento tão glorioso do espírito humano. Dito de uma maneira meramente esquemática, as categorias intervenientes na física dos movimentos locais de Galileu bem como aquelas intervenientes na astronomia kepleriana, pertencem ambas ao campo da cinemática. No entanto, a Revolução Newtoniana vai exigir a invenção de categorias dinâmicas, notadamente as de Massa e de Força. No que diz respeito aos Processos Mentais intervenientes, diríamos que o nosso objetivo não é o de psicanalizar o processo criativo newtoniano e sim o de explorar o alcance da inteligência humana no intuito de adquirirmos a capacidade de compreender os belos resultados historicamente obtidos que são patrimônio da Humanidade e de permitir uma educação científica que ressalte a inteligência e a autonomia intelectual de seus protagonistas como hermeneutas de quaisquer processos que enfim, devem ser direito de quaisquer cidadãos.

Enfim, podemos concluir que tal como na concepção Lakatosiana (Lakatos, 1979, 1989) de Programas Científicos de Pesquisa, os nossos quatro capítulos/artigos acima guardam um núcleo duro comum de objetivos quanto a uma prática pedagógica que favorece a multidisciplinaridade, acompanhado de um “cinturão protetor” adaptável a ‘circunstâncias diversas que advenham ou possam advir da prática educacional.

CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E A PESQUISA NA ÁREA

Como contribuição mais imediata desta tese, destacam-se os quatro artigos científicos desenvolvidos ao longo do estudo e que a compõem. Cada um desses artigos explora episódios da história da ciência à luz do método das Conexões Conceituais e das Reconstruções Racionais Didáticas, o que possibilita não apenas a ampliação do conhecimento sobre os episódios analisados, mas, sobretudo, uma compreensão epistemologicamente orientada da construção e da evolução dos conceitos científicos envolvidos. Além disso, os artigos apresentam uma estrutura didática passível de adaptação e replicação em sala de aula, conferindo-lhes potencial para contribuir tanto com a formação de professores de Ciências, de modo geral, quanto, de forma mais específica, com a formação de professores de Física.

Nesse sentido, os resultados desta tese dialogam diretamente com estudos como o de Ferreira e Custódio (2021), que evidenciaram a inserção ainda tímida de temas relativos à Natureza da Ciência nos cursos de Licenciatura em Física no Brasil. Segundo os autores, disciplinas relacionadas à História, Filosofia, Epistemologia e Sociologia da(s) Ciência(s) e da Física correspondem a apenas 3,39% da carga horária dos cursos, enquanto os Saberes Pedagógicos representam 0,94% e os Saberes Disciplinares de Física, 0,32%, totalizando apenas 4,65% da carga horária dedicada a essas temáticas. Esse cenário reforça a relevância da presente tese para a formação de professores, uma vez que as discussões desenvolvidas ao longo dos artigos contemplam explicitamente o ensino sobre a Natureza da Ciência, contribuindo para uma formação mais crítica, reflexiva e epistemologicamente fundamentada.

Como principal contribuição desta tese, destaca-se a proposição de um modelo epistemológico para o ensino de Ciências. Trata-se de um modelo epistemológico na medida em que resulta da integração entre o método das Conexões Conceituais e o

das Reconstruções Racionais Didáticas, orientando explicitamente a forma como o conhecimento científico é organizado, interpretado e apresentado em contextos de ensino.

O método das Conexões Conceituais consiste, inicialmente, na seleção de um episódio relevante da história da ciência e, em seguida, na exploração dos conceitos nele envolvidos a partir de articulações interdisciplinares, multidisciplinares e transversais. Nesse processo, a construção de significados e ressignificados emerge à medida que professor e alunos, assumindo o papel de hermeneutas, elaboram processos explicativos que mobilizam relações entre conceitos e diferentes contextos históricos, culturais e científicos. As Reconstruções Racionais Didáticas, por sua vez, partem da escolha explícita de uma epistemologia contemporânea segundo a qual a construção e a evolução dos conceitos científicos serão apresentadas. Por exemplo, ao adotar a epistemologia dos modelos de Mario Bunge para a reconstrução didática do episódio relativo às leis de Kepler, todas as ações explicativas e didáticas são orientadas pela noção de modelagem científica, enfatizando idealizações, relações estruturais e limites explicativos dos modelos.

A integração entre esses dois métodos permite que o processo de construção do conhecimento científico seja didaticamente recriado, articulando, de um lado, diferentes contextos disciplinares e, de outro, os compromissos epistemológicos assumidos. Dessa forma, o modelo proposto oferece um referencial consistente para o ensino de Ciências que favorece a compreensão da ciência como uma prática histórica, conceitualmente estruturada e epistemologicamente orientada.

MODELO EPISTEMOLÓGICO PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS

(Conexões Conceituais + Reconstruções Racionais Didáticas)

Com o objetivo de facilitar a compreensão e a aplicação deste modelo pelos professores de ciências, abaixo, apresentamos sistematicamente as etapas envolvidas no processo. É importante destacar que este modelo proposto, apesar de amplamente amparado na literatura e em referencias sólidos, ele é fruto de um trabalho teórico, sendo assim, e considerando que a complexidade envolvida na construção do conhecimento científico e em seu ensino, um modelo é uma proposta para representar um fenômeno ou processo, de maneira nenhuma, temos a pretensão

de considerar este modelo como sendo a realidade, o que seria incompatível com um ensino que visa a construção de significados.

Etapas para o desenvolvimento do modelo epistemológico proposto.

Etapa 1 – Seleção do episódio histórico

Escolha de um episódio relevante da história da ciência
(ex.: Leis de Kepler, Gravitação Universal, medida da Terra por Eratóstenes)
Justificativa didática e conceitual da escolha

Etapa 2 – Definição da epistemologia de referência

Eleição explícita de uma epistemologia contemporânea
(ex.: epistemologia dos modelos; programas de pesquisa; racionalismo histórico etc.)
Identificação de categorias epistemológicas centrais
(modelo, idealização, explicação, lei, evidência, etc.)

Etapa 3 – Reconstrução racional didática do episódio

Reorganização do episódio histórico segundo a epistemologia escolhida
Ênfase nos processos de construção, revisão e validação dos conceitos
Explicitação dos compromissos teóricos envolvidos

Etapa 4 – Estabelecimento das Conexões Conceituais

Articulação dos conceitos científicos com:
outras áreas da ciência;
matemática;
filosofia;
história;
cultura e sociedade.

Exploração de relações interdisciplinares, multidisciplinares e transversais

Etapa 5 – Produção de significados e ressignificados

Desenvolvimento de explicações pelos estudantes
Discussão de alternativas conceituais e modelos concorrentes

Etapa 6 – Transposição didática consciente

Planejamento de atividades, discussões e avaliações coerentes com o modelo

Adequação ao currículo, à carga horária e ao contexto escolar

Reflexão sobre a Natureza da Ciência envolvida

A TÍTULO DE CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em acordo com a síntese dos resultados e das contribuições apresentadas anteriormente, evidenciamos que os objetivos deste trabalho foram alcançados. O primeiro e o segundo objetivos específicos desta tese — analisar o potencial das conexões conceituais para promover um ensino de ciências multidisciplinar e examinar os problemas epistemológicos relacionados à noção de espaço, suscitados pelo episódio de Eratóstenes — foram alcançados por meio dos estudos desenvolvidos nos capítulos/artigos 1 e 2. No primeiro, a exploração do feito de Eratóstenes de Alexandria, ancorada na confluência entre arte, ciência e filosofia, demonstrou que o método das conexões conceituais é capaz de ampliar a compreensão dos conceitos científicos ao estabelecer múltiplas pontes de significados entre diferentes campos do saber. Essa abordagem mostrou-se eficaz para enriquecer o campo conceitual dos estudantes e romper com a fragmentação disciplinar que frequentemente limita a aprendizagem em ciências. No segundo estudo, o mesmo episódio foi reinterpretado sob uma perspectiva epistemológica, permitindo discutir a natureza do espaço e suas implicações para o ensino de ciências. Ao confrontar as concepções de espaço aristotélica e de Eratóstenes à luz das categorias de Ser e Devir, o artigo evidenciou o potencial do diálogo entre ciência e filosofia para formar um pensamento crítico e interdisciplinar, reafirmando a relevância de um ensino de ciências que promova reflexão, problematização e contexto histórico.

Os dois objetivos subsequentes — investigar como a combinação dos métodos das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas pode contribuir para o ensino da gravitação universal e discutir as contribuições das reconstruções racionais didáticas para o ensino de ciências voltado à compreensão da natureza da ciência e de seus processos mentais — foram atendidos nos capítulos 3 e 4. O estudo

sobre o ensino da gravitação universal demonstrou que a integração entre ambos os métodos favorece a superação da fragmentação cognitiva e possibilita uma leitura histórica e epistemológica da ciência, promovendo a produção de significados e a articulação entre as dimensões conceituais e metodológicas do conhecimento científico. Já a análise das reconstruções racionais didáticas evidenciou a importância de compreender os processos mentais e as categorias conceituais que sustentam as teorias científicas, estimulando uma aprendizagem reflexiva, contextualizada e livre de visões distorcidas sobre a natureza da ciência. Desse modo, os quatro objetivos convergem para um mesmo propósito, que é o de consolidar um ensino de ciências que valorize o diálogo entre saberes, o pensamento crítico e a construção coletiva de significados, em consonância com uma percepção de ciência e de ensino de ciência que seja histórica, cultural e social.

A título de considerações finais, levamos em conta que a proposta das conexões conceituais e das reconstruções racionais didáticas, tal como desenvolvida nesta tese, conversa profundamente com o princípio da dialogicidade freiriana (Freire, 1983) e bakhtiniana (Bakhtin, 2006, 2011). Ambos os métodos partem da premissa de que o conhecimento não é algo a ser depositado, mas construído na relação entre sujeitos e saberes historicamente situados. Assim como em Paulo Freire, que entende o ato de conhecer como um movimento de aproximação crítica e criadora do sujeito com o mundo, as conexões conceituais e as reconstruções racionais didáticas favorecem o encontro entre diferentes campos do saber, por exemplo, ciência, arte e filosofia, promovendo um processo de ensino em que professores e estudantes se tornam coprodutores de significados. Essa perspectiva rompe com a lógica da “educação bancária” ao propor que o ensino de ciências se realize por meio do diálogo entre rationalidades distintas, estimulando a curiosidade epistemológica e o pensamento crítico²⁹.

Nesse sentido, os resultados alcançados nos quatro estudos (artigos) revelam que o uso articulado dessas abordagens promove um ensino de ciências dialógico,

²⁹ Fundamental para a ocorrência do dialogismo é a relação com o outro, a presença e a valorização constante da alteridade, nunca dissolvida em uma espécie de fusão. Por isso, Bakhtin não considera propriamente dialógica a dialética de base hegeliana, em que as contradições são resolvidas em uma síntese seguida de novas contradições. Além disso, a dialética ignora a singularidade, tornando-se, no dizer de Bakhtin, um diálogo sem vozes, sem falantes (Nuto, 2011).

em que o conhecimento é continuamente reconstruído em um processo de escuta, questionamento e ressignificação, num processo que considera eu com os outros. Tal como o diálogo em Freire é o fundamento da práxis libertadora, as reconstruções racionais didáticas e as conexões conceituais instauram um diálogo entre o passado e o presente da ciência, entre diferentes epistemologias e modos de compreender o mundo. Essa dialogicidade epistemológica e pedagógica conduz a um ensino que não apenas transmite conceitos, mas que forma sujeitos capazes de interpretar criticamente a ciência, compreendendo-a como uma manifestação cultural e humana em permanente construção, o que reafirma a convergência entre a proposta metodológica da tese e o horizonte emancipador da educação freiriana.

REFERÊNCIAS

BAKHTIN, M. **Marxismo e filosofia da linguagem**. 12.ed. São Paulo: Editora HUCITEC,2006.

BAKHTIN, M. **Estética da criação verbal**. 6.ed. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2011.

BITTENCOURT, J. Integração curricular e ensino de matemática. In: SABINO DIAS, M. F.; CASSIANI DE SOUZA, S.; SEARA, I. C. (org.). **Formação de Professores: Experiências e Reflexões**. Florianópolis: Letras Contemporâneas, 2006, p. 152-158.

COHEN, I. B. Newton's discovery of gravity. **Scientific American**, v. 244, n. 3, p. 166-179, 1981. Disponível em: https://www.scientificamerican.com/article/newtons-discovery-of-gravity/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 05 jun. 2025.

FERREIRA, G. K.; CUSTÓDIO, J. F. Cenários do debate sobre a natureza da ciência nos cursos de licenciatura em física no Brasil. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 1022–1066, 20 set. 2021. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8078611>. Acesso em: 21 set. 2025.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido**. 17^a ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia**: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1999.

HESTENES, D. Modeling games in the newtonian world. **American Journal of Physics**, v. 60, n. 8, p. 732–748, 1992. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-abstract/60/8/732/1054114/Modeling-games-in-the-Newtonian-World?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 21 nov. 2023.

LAKATOS, I. O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In: LAKATOS I.; MUSGRAVE, A. (org.). **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo: Cultrix; Editora da Universidade de São Paulo, 1979. p. 109-243.

LAKATOS, I. **La metodología de los programas de investigación científica**. Madrid: Alianza Editorial, 1989.

NUTO, J. V. C. Dostoiévski e Bakhtin: a filosofia da composição e a composição da filosofia. **Bakhtiniana**, São Paulo, v. 1, n.6, p.129-142, 2011. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/bakhtiniana/article/view/6434>. Acesso em: 12 out. 2025.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança**: metamorfose da ciência. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trincheira e revisão de João Pedro Mendes. Brasília: editora da UnB, 1984.

APÊNDICE

Carta de Leonhard Euler a uma princesa alemã (carta nº. 52)

Sobre el descubrimiento de la gravitación universal hecho por el gran Newton

La pesantez o gravedad es pues una propiedad de todos los cuerpos terrestres, e incluso de la Luna. La pesantez mediante la cual ésta es impelida hacia la Tierra, es la que retarda su movimiento, de la misma manera que la pesantez retarda el movimiento de una bala de cañón o de una piedra lanzada con la mano. Somos deudores del difunto señor Newton por este importante Descubrimiento. Encontrándose un día este gran filósofo y matemático inglés tendido en un jardín, bajo un manzano, le cayó una manzana sobre la cabeza proporcionándole la ocasión de hacer diversas consideraciones. Supuso que era la pesantez la que había hecho caer la manzana, tras haberse desprendido ésta de la rama, tal vez por el viento o por cualquier otra causa. Esta idea parecía muy natural y todo campesino hubiera hecho tal vez la misma consideración, pero el filósofo inglés fue más lejos. Se planteó la cuestión de qué ocurriría si el árbol fuera mucho más alto, si en ese caso la manzana también caería, cosa de la que no podía dudar.

Pero si el árbol hubiera sido tan alto que llegara hasta Luna, se sentía confundido ante la decisión de si la manzana caería o no. En el caso de que cayera, lo cual le parecía muy verosímil ya que no podría ponerse un límite a la altura del árbol desde donde la manzana dejara de caer, en ese caso, sería necesario que ésta tuviera aún cierta pesantez que la impulsara hacia la Tierra. Por consiguiente, puesto que la Luna se encontraría en ese mismo lugar, tendría que ser impulsada hacia la Tierra por una fuerza semejante a la de la manzana. Sin embargo, dado que no le caía sobre la cabeza, comprendió que el movimiento podría ser la causa de ello, de la misma manera que una bomba puede pesar sobre nosotros sin caer verticalmente hacia abajo. Esta comparación del movimiento de la Luna con el de una bomba le determinó a examinar la cosa más atentamente y, auxiliado por la más elevada geometría, halló que seguía en su movimiento las mismas reglas que observamos en el movimiento de una bomba, de modo que si fuera posible arrojar ésta desde la altura de la Luna y con

la misma velocidad, tendría el mismo movimiento que ella. La única diferencia que advirtió era que la pesantez de la bomba a esa distancia de la Tierra sería mucho menor que aquí abajo. V. A. habrá visto a través de este relato que el comienzo de este razonamiento del filósofo era muy simple y que no difería apenas del de un campesino, en tanto que su continuación se ha ido elevando infinitamente por en mima del alcance de este último. Es pues una propiedad muy notable de la Tierra el que todos los cuerpos que se encuentran, no sólo en ella, sino también aquellos que se encuentran muy alejados incluso hasta la distancia de la Luna, tengan una fuerza que los empuja hacia el centro de la misma. Esta fuerza es la pesantez, que disminuye a medida que los cuerpos se alejan de su superficie. El filósofo inglés no se detuvo aquí. Puesto que sabía que los cuerpos de los planetas son perfectamente semejantes a la Tierra, concluyó que los cuerpos que se encuentran en las proximidades de cada uno de ellos son pesados y que la dirección de esta pesantez tiende al centro mismo del planeta. Esta pesantez sería allí tal vez mayor o menor que sobre la Tierra, de manera que un cuerpo de un cierto peso aquí, al ser transportado a la superficie de un planeta cualquiera, tendría allí un peso que sería mayor o menor. Por último, esta fuerza de gravedad de cada planeta, se extiende también a grandes distancias en torno a cada uno, y puesto que vemos que el planeta Júpiter tiene cuatro satélites y el planeta Saturno cinco, que se mueven en torno a ellos como la Luna en torno a la Tierra, no podríamos poner en duda que el movimiento de los satélites de Júpiter es retardado por su pesantez hacia el centro de Júpiter y el de los satélites de Saturno por su pesantez hacia el centro de Saturno. Ahora bien, de la misma manera que la Luna se mueve en torno a la Tierra y los satélites en torno de Júpiter o a Saturno, todos los planetas a su vez se mueven en torno al Sol. De ello em propio Newton ha extraído la famosa consecuencia de que el Sol está dotado de una propiedad semejante de pesantez y que todos los cuerpos que se encuentran en sus proximidades son impulsados hacia él por una fuerza que podríamos denominar pesantez solar. Esta fuerza se extiende muy lejos en torno al Sol, mucho más allá de todos los planetas, puesto que es esta fuerza de pesantez la que retarda su movimiento. Este mismo filósofo, gracias a la capacidad de su mente, ha encontrado el medio de determinar el movimiento de los cuerpos cuando se conoce la fuerza con la que son impelidos. Por consiguiente, puesto que había descubierto la fuerza con la que todos los cuerpos son impulsados, estaba en condiciones de dar una exacta descripción de su movimiento.

Em efecto, con anterioridad a este gran filósofo nos encontrábamos en una profunda ignorancia acerca del movimiento de los cuerpos celestes y es a él a quien debamos la gran claridad de la que gozamos en el presente en astronomía. V. A. estará muy sorprendida de los grandes progresos que todas las ciencias han hecho a partir de un comienzo que pareció primero muy simple y superficial. Si Newton no se hubiera tendido en un jardín bajo un manzano y no le hubiera caído por azar una manzana sobre la cabeza, tal vez nos encontraríamos en la misma ignorancia sobre el movimiento de los cuerpos celestes y sobre una infinidad de fenómenos que dependen de él. Esta materia merece, pues, toda la atención de V. A. y me complazco en seguir hablando a continuación sobre el mismo tema.

3 septiembre 1760

Leonhard Euler