

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física
Programa de Pós-graduação em Ensino de Física
Doutorado em Ensino de Física

Rodrigo Weber Pereira

A formação de professores focada na vigilância epistemológica pautada pela
compreensão das relações entre fatores epistêmicos e sociais na construção da
Mecânica Clássica

Porto Alegre

2024

Rodrigo Weber Pereira

A formação de professores focada na vigilância epistemológica pautada pela
compreensão das relações entre fatores epistêmicos e sociais na construção da
Mecânica Clássica

Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de doutor em Ensino de Física
pelo Programa de Pós-graduação em Ensino de
Física do Instituto de Física da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Albuquerque
Heidemann.

Coorientadora: Profa. Dra. Eliane Angela Veit.

Porto Alegre

2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo Weber Pereira

A formação de professores focada na vigilância epistemológica pautada pela compreensão das relações entre fatores epistêmicos e sociais na construção da
Mecânica Clássica

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ensino de Física pelo Programa de Pós-graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Albuquerque Heidemann.

Coorientadora: Profa. Dra. Eliane Angela Veit.

Porto Alegre, 07 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Marianna Bosch
Universidade de Barcelona (UB)

Prof. Dr. Mauricio Pietrocola Pinto de Oliveira
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Luiz Fernando Ziebell

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Nathan Willig Lima

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Leonardo Albuquerque Heidemann (Presidente da banca)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter estado comigo todos os dias desta jornada.

Aos meus estimados orientadores, Leonardo e Eliane, meus mais sinceros agradecimentos pela mentoria competente, dedicada, incansável e paciente. Sou imensamente grato pelos ensinamentos, experiências, conselhos e bons momentos vividos ao longo desta jornada acadêmica, que teve início ainda no mestrado.

Expresso também minha gratidão aos estudantes que, de forma generosa, se dispuseram a colaborar voluntariamente como participantes da pesquisa.

À Ellen, mãe do meu filho, minha profunda gratidão pelo apoio incondicional e pela paciência ao longo deste percurso. Sua compreensão, carinho e presença foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar plenamente a esta pesquisa.

Agradeço a todos os membros da minha família pelo carinho e apoio ao longo desta caminhada. Em especial, expresso minha profunda gratidão à minha mãe, cujo incentivo constante foi essencial para que eu pudesse perseverar nos momentos mais desafiadores.

Agradeço à CAPES por financiar parcialmente esta pesquisa.

Sobre o autor

Minha trajetória acadêmica começou com a realização do bacharelado em Física na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Nesse período, tive excelentes perspectivas de formação. Atuei como bolsista de iniciação científica em laboratórios de pesquisa do Instituto de Física e tive oportunidade de fazer graduação sanduíche na Alemanha, na Universidade Livre de Berlim. Ainda durante a graduação, dei aulas de Física na Educação Básica, ocasião na qual meu interesse pelo ensino foi despertado. Em razão disso, em vez de seguir uma trajetória na “física dura”, me voltei para a área de Ensino de Física: graduação em licenciatura em Física, mestrado e doutorado em Ensino de Física são, agora, parte da minha história. Essa nova etapa também foi marcada por aprendizagens significativas, mas agora em outro patamar. Fiz estudos teóricos na área do ensino; apresentei trabalhos em eventos; pesquisei nos laboratórios didáticos com estudantes do bacharelado e licenciatura em Física; contribuí na reformulação de abordagens didáticas adotadas hoje em disciplinas do curso de Física (Física Experimental IV no trabalho de mestrado e Mecânica Clássica, no doutorado); fiz estágio de doutorado sanduíche na Dinamarca, na Universidade de Copenhague, aprofundando mais os conhecimentos acadêmicos. Todo esse período foi marcado por duas coisas: paixão pela Física e seu Ensino. Espero que este trabalho possa se somar às contribuições dos meus colegas de área, melhorando, mesmo que pouco, o Ensino da Física em nossa sociedade.

“[...] As ciências são como um belo rio cujo curso é fácil de seguir quando adquire certa regularidade; porém, se alguém deseja navegar até a fonte, não consegue encontrá-la em lugar algum, pois está distante e próxima ao mesmo tempo; ela se difunde de alguma forma por toda a superfície da Terra: da mesma forma, se alguém quiser voltar à origem das ciências, só encontrará obscuridade, ideias vagas, círculos viciosos; & perde-se nas ideias primitivas”

Carnot (1786, p. 107).

RESUMO

É amplamente conhecido no campo do ensino de Ciências que o processo de construção do conhecimento é complexo, envolvendo tanto aspectos epistêmicos quanto sociais. Da mesma forma, já se sabe que a didatização do conhecimento frequentemente simplifica essa complexidade em excesso. Com o objetivo de proporcionar a futuros professores o questionamento das transformações pelas quais o conhecimento passa no ensino de Mecânica Clássica, esta pesquisa avaliou as implicações de um ensino centrado na explicitação das hipóteses basilares do conhecimento científico, no contexto da formação de professores de Física, com intuito de promover os conhecimentos necessários para a realização da vigilância epistemológica na transposição didática na área da Mecânica Clássica (MC), abrangendo até o formalismo lagrangiano. A vigilância epistemológica é um conceito da Teoria Antropológica do Didático (TAD) e se refere à capacidade do(a) professor(a) de questionar o conhecimento a ser ensinado, avaliando seu grau de adequação em relação ao conhecimento de referência. O conceito de hipótese adotado é alinhado com a aceção de Lima e Heidemann (2023), que exploram episódios históricos para propor um sistema que permite a classificação das hipóteses quanto à sua natureza. A tese defendida é: *No contexto de formação de professores, a explicitação das hipóteses basilares do conhecimento como respostas a questões que só fazem sentido em seu contexto histórico de criação proporciona conhecimentos necessários para a vigilância epistemológica.* Para dar suporte a essa tese, foram realizados três estudos, sendo dois teóricos (Estudo 1 e 3) e um empírico (Estudo 2). No Estudo 1, foi realizado um estudo bibliográfico em que se identifica quais episódios históricos relevantes são adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores e quais são as principais hipóteses mobilizadas pelos cientistas nesses episódios. Em seguida, com o intuito de familiarizar o pesquisador com o contexto de investigação e com a proposta didática abordada, buscou-se avaliar o impacto de um ensino de MC pautado pela explicitação dessas hipóteses em uma primeira versão reformulada da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Com os resultados do Estudo 1 e dessa experiência, foram delineados, no Estudo 2, um Modelo Epistemológico de Referência (MER) e um Modelo Didático de Referência (MDR) provisórios, com o intuito de identificar que condições e restrições precisam ser consideradas em uma disciplina como a de MC para a Licenciatura da UFRGS quando se pretende preparar futuros professores para exercerem a vigilância epistemológica na transposição didática dos conceitos e teorias desse campo científico. As condições e restrições que emergiram desse estudo deram suporte empírico para a realização do Estudo 3, em que foi proposto um referencial teórico-metodológico na forma de um MER e um MDR em uma disciplina como a de MC para a Licenciatura da UFRGS com o objetivo de favorecer a vigilância epistemológica a partir da compreensão das hipóteses científicas que sustentam os conceitos e teorias dessa área.

Palavras-chave: Hipóteses basilares; Vigilância epistemológica; Teoria Antropológica do Didático; História da Ciência; Mecânica Clássica.

ABSTRACT

It is widely known in the field of Science Education that the process of knowledge construction is complex, involving both epistemic and social aspects. Likewise, it is already acknowledged that the didactization of knowledge often excessively simplifies this complexity. Aiming to encourage future teachers to question the transformations knowledge undergoes in the teaching of Classical Mechanics, this research e approach focused on the explicitness of the fundamental hypotheses of scientific knowledge, within the context of physics teacher education, with the intention of promoting the necessary knowledge for carrying out epistemological vigilance in the didactic transposition of Classical Mechanics (CM), including Lagrangian formalism. Epistemological vigilance is a concept from the Anthropological Theory of the Didactic (ATD) and refers to a teacher's ability to question the knowledge to be taught, assessing its degree of adequacy in relation to the reference knowledge. The concept of hypothesis adopted is aligned with the definition proposed by Lima and Heidemann (2023), who explore historical episodes to propose a system that allows the classification of hypotheses by their nature. The defended thesis is: In the context of teacher education, the explicitness of the fundamental hypotheses of knowledge, as answers to questions that only make sense in their historical context of creation, provides the necessary knowledge for epistemological vigilance. To support this thesis, three studies were conducted, two theoretical (Study 1 and 3) and one empirical (Study 2). In Study 1, a bibliographic study was carried out to identify which relevant historical episodes are appropriate to be addressed in a CM course for initial teacher education and what are the main hypotheses mobilized by scientists in these episodes. Then, aiming to familiarize the researcher with the investigative context and the proposed didactic approach, the impact of a CM teaching approach focused on making these hypotheses explicit was evaluated in a newly revised version of the Classical Mechanics course for the teaching degree at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). Based on the results of Study 1 and this experience, Study 2 outlined a provisional Reference Epistemological Model (REM) and Reference Didactic Model (RDM), with the purpose of identifying the conditions and constraints that need to be considered in a course like CM for the UFRGS teaching degree when the aim is to prepare future teachers to exercise epistemological vigilance in the didactic transposition of concepts and theories in this scientific field. The conditions and constraints that emerged from this study provided empirical support for Study 3, in which a theoretical-methodological framework was proposed in the form of an REM and RDM for a course like CM for the UFRGS teaching degree, with the objective of fostering epistemological vigilance through the understanding of the scientific hypotheses that underpin the concepts and theories in this area.

Keywords: Fundamental Hypotheses; Epistemological Vigilance; Anthropological Theory of the Didactic; History of Science; Classical Mechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1.1: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção da noção de Antiperistasis.....	39
Figura 5.2.1.1: Síntese das principais hipóteses assumidas por Galileu na descrição da trajetória dos projéteis. Tal descrição utiliza essencialmente o modelo de queda dos graves e a hipótese da inércia horizontal, como destacado.....	64
Figura 5.2.2.1: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção da lei da Gravitação Universal. O evento a ser descrito pela lei é o movimento dos astros.....	73
Figura 5.2.3.1: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção das Leis de Newton. O evento a ser descrito pela lei é a interação entre corpos.....	83
Figura 5.2.4.1: Diagrama representando uma alavanca. a) os círculos retratam as trajetórias ditas "não naturais", que seriam a causa para o surgimento do aparecimento de forças nas extremidades da alavanca; b) diagrama usado para obter a equação de vínculo.....	89
Figura 5.2.4.2: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção das Equações de Euler-Lagrange. O evento a ser descrito pela lei é o movimento dos corpos.....	92
Figura 6.5.1: Figura usada em um exercício proposto aos estudantes durante a aula. Exercício - Mostre, em notação moderna, que o seguinte enunciado de Galileu está correto: "Se o mesmo móvel descer a partir do repouso por um plano inclinado ou na vertical, dos quais a altura é a mesma, os tempos de percurso estarão entre si como os comprimentos do próprio plano e da vertical".....	118
Figure 6.5.2: Versão modificada do diagrama Q-R produzido pela Estudante 10. As questões estão destacadas em cinza e as respostas em rosa.....	124
Figure 7.1.1: Diagrama Q-R representando o bloco teórico da praxeologia sobre as Leis de Newton. No diagrama semipreenchido, as respostas (R) contidas nos retângulos brancos seriam substituídas por R1, R2,	157
Figura A.1: <i>Slide</i> contendo uma atividade rápida realizada em sala de aula para cada tarefa prévia: adivinhar quem era o cientista ou pensador com base em suas contribuições para a Ciência. O(a) leitor(a) que deseja se colocar na posição do(a) estudante está convidado(a) a participar da atividade.	193
Figura A.2: Desafio proposto aos estudantes da disciplina nas primeiras semanas de aula. Para resolver o desafio, é preciso empregar cálculo para encontrar a trajetória do movimento e argumentar se o movimento é possível no mundo aristotélico.....	195
Figura A.3: Diagrama representando o modelo que descreve o movimento de um projétil lançado na superfície da Terra sujeito à força de resistência do ar. Na figura, as caixas azuis são variáveis enquanto as elipses laranjas são parâmetros do sistema. As setas azuis representam as taxas de variações (derivadas) e as setas pontilhadas cinzas as relações causais entre as variáveis e parâmetros.....	197
Figura A.4: Problemas sugeridos para o segundo trabalho. No problema da esquerda, uma conta está acoplada a uma haste sobre a qual desliza sem atrito. A haste gira com aceleração angular constante, projetando a conta radialmente. O problema é resolvido no referencial do observador não inercial que gira junto com a haste. No problema da direita, tem-se como desafio encontrar a projeção, no plano horizontal, do movimento pendular, constatando assim a rotação da Terra.....	198
Figura A.5: Linha do tempo representando o semestre e os momentos de aplicação dos instrumentos de coleta de dados, que são o caderno de campo, as tarefas prévias (quadrados vermelhos), os relatórios dos trabalhos (R1, R2 e R3), os questionários (Q1 e Q2), o Plano de Aula sobre Gravitação (PAG) e a entrevista semiestruturada.....	201

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.2.1: MER provisório elucidando a praxeologia em torno da teoria da queda dos graves no topos dos licenciandos.....	100
Tabela 6.3.1: Panorama da metodologia de ensino empregada.....	104
Tabela 6.5.1: Elementos teóricos evocados pelos estudantes. A primeira coluna é o rótulo atribuído ao elemento teórico e o número entre parênteses precedendo o enunciado informa o número de vezes que o elemento foi evocado.....	110
Tabela 6.5.2: Elementos práticos evocados pelos estudantes. A primeira coluna é o rótulo atribuído ao elemento prático e o número entre parênteses precedendo o enunciado informa o número de vezes que o elemento foi evocado.....	114
Tabela 6.5.3: Tarefa produzida pelo Estudante 12. Os números antes dos enunciados do bloco teórico e Tipo de tarefa correspondem aos elementos teóricos e práticos listados na primeira coluna das Tabelas 6.5.1 e 6.5.2.....	120
Tabela 6.5.4: Tarefa produzida pela Estudante 1. Os números antes dos enunciados do Bloco teórico e Tipo de tarefa correspondem aos elementos teóricos e práticos listados na primeira coluna das Tabelas 6.5.1 e 6.5.2.....	121
Tabela 7.1.1: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre Antiperistasis no topos dos licenciandos.....	136
Tabela 7.1.2: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre a Teoria da Gravitação Universal de Newton no topos dos licenciandos.....	140
Tabela 7.1.3: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre as três leis de Newton no topos dos licenciandos.....	143
Tabela 7.1.4: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre as Equações de Euler-Lagrange no topos dos licenciandos.....	145
Table 7.1.5: Bloco prático da praxeologia sobre as Leis de Newton. As colunas “Questão” e “Tarefa” estão inicialmente em branco e são preenchidas pelos licenciandos.....	159
Tabela A.1: Resumo dos tópicos abordados na disciplina.....	190

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
2	Referenciais teóricos.....	19
2.1	Teoria antropológica do didático (TAD).....	19
2.2	Análise da natureza das hipóteses científicas.....	29
2.2.1	Antiperistasis.....	34
3	Estudos anteriores.....	41
3.1	Formação de professores na TAD.....	41
3.2	Uso de história da Ciência na formação de professores.....	44
4	Delineamento metodológico.....	52
5	Estudo bibliográfico sobre as hipóteses basilares da MC (estudo 1).....	55
5.1	Metodologia de pesquisa.....	55
5.2	Resultados.....	58
5.2.1	O modelo de queda dos graves de Galileu.....	58
5.2.2	A lei da Gravitação Universal de Newton.....	65
5.2.3	As três Leis de Newton.....	74
5.2.4	As equações de Euler-Lagrange.....	83
5.3	Conclusão do Estudo 1.....	92
6	Estudo empírico para identificação de condições e restrições (Estudo 2).....	95
6.1	A disciplina de Mecânica Clássica para a licenciatura.....	96
6.2	MER e MDR provisórios associados à praxeologia da queda dos graves.....	97
6.3	Metodologia de ensino.....	102
6.4	Metodologia de pesquisa.....	105
6.4.1	Instrumentos de coleta de dados.....	106
6.4.2	Metodologia de análise dos dados.....	107
6.5	Resultados.....	109
6.6	Conclusão do estudo 2.....	128
7	Estudo 3: Um referencial teórico-metodológico para o ensino de MC.....	134
7.1	MER e MDR próprios para um ensino de MC pautado pela vigilância epistemológica.....	136
7.2	Conclusão do Estudo 3.....	165
8	Considerações finais.....	167
	REFERÊNCIAS.....	169
	Apêndice A - Relato de experiência na disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura.....	184
	Apêndice B - Instrumentos de coleta de dados (Relato de Experiência).....	204
	Apêndice C - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Estudo 2).....	214
	Apêndice D - Relato circunstanciado de aplicação da Metodologia de Ensino utilizada no	
	Estudo 2.....	216
	Apêndice E - Roteiro da entrevista semiestruturada (Estudo 2).....	221
	Apêndice F - Diagramas Q-R (Estudo 3).....	223
	Apêndice G - Tabelas para a construção das tarefas (Estudo 3).....	233

1 INTRODUÇÃO

Não é novidade para a área do ensino de Ciências que a construção do conhecimento é complexa, envolvendo elementos epistêmicos e sociais. Também não é novidade que a didatização¹ do conhecimento acaba, muitas vezes, reduzindo em demasia essa complexidade. Livros didáticos frequentemente retratam o processo de construção do conhecimento de forma linear e desvinculada de seu contexto de produção, caracterizando-o como um acúmulo constante de ideias individuais de cientistas brilhantes, que tinham compromisso com o progresso e a neutralidade da Ciência. De fato, seria inviável se pensar em um ensino de Física sem que o conhecimento abordado seja, em algum nível, modificado; a transformação do conhecimento está no seio da didatização. No entanto, o conhecimento científico que chega aos estudantes sofre variados níveis de adaptações, que podem ou não ser adequados ao contexto de ensino. O(a) professor(a) que tem consciência disso, questiona e reflete sobre o grau de adequação dessas transformações em relação ao conhecimento de referência, exerce algo que Chevallard denomina de vigilância epistemológica (Chevallard, 2019).

O(a) professor(a) ou educador(a) exerce vigilância epistemológica quando questiona as bases e pressupostos que fundamentam o conhecimento a ser ensinado (Chevallard, 1991, p. 16). Esta vigilância implica questionar as evidências, reavaliar ideias simples, e desfazer-se da familiaridade enganosa com o objeto de estudo. Envolve estar alerta para como um conhecimento é criado, transmitido e transformado, possibilitando uma análise crítica do conteúdo a ser ensinado em relação ao conhecimento de referência. Exercer a vigilância epistemológica suscita questionamentos do tipo: “por que apenas uma fração do conhecimento de referência ganhou status de saber a ser ensinado?”; “quais transformações o conhecimento de referência sofreu no processo de transposição didática?”; “por que certo episódio histórico da Ciência é privilegiado no contexto educacional em detrimento de outros?”. Em suma, a vigilância epistemológica pode ser entendida como o ato de refletir e questionar o processo de transposição didática tendo em vista sua adequação com relação ao conhecimento de referência.

É natural que, em determinados momentos, o(a) docente realize o que Chevallard (1991) chama de “fechamento da consciência didática”, supondo um certo isolamento e autonomia dos conhecimentos. Contudo, particularmente no contexto da formação docente,

¹ Entende-se por didatização o processo de transformação de certo conhecimento de referência com fins didáticos.

a naturalização de um ensino sem vigilância epistemológica, decorrente de uma didatização acrítica do conhecimento científico com relação ao conhecimento original, limita a própria prática dos futuros docentes. O questionamento sobre a natureza, seleção e organização dos conhecimentos a serem ensinados implica um questionamento sobre a própria *razão de ser* desses conhecimentos. Por exemplo, ao passar por uma formação calcada em conhecimentos isolados e monumentalizados², é natural que, na medida em que entende que o conhecimento é estático e impessoal, um professor tenha dificuldades para transformar suas práticas frente às particularidades do seu contexto, não conseguindo, entre outras coisas, diversificar a maneira como aborda os conceitos de forma atenta aos principais obstáculos que seus alunos enfrentam.

Por exemplo, um caso típico desse aspecto na Mecânica Clássica é a segunda lei de Newton, evocada nos livros didáticos para definir o conceito de força a partir do conceito de aceleração. Um professor que aprendeu que a origem do conceito de força é a sua relação com a aceleração internalizou uma visão distorcida da construção desse conceito; e possivelmente terá dificuldades em interpretar concepções alternativas de seus estudantes que, conforme a literatura, com frequência associam força à velocidade, não a mudanças no movimento (Harres, 2002). De fato, desde Aristóteles a noção predominante de força tem relação direta com o movimento, não com a mudança dele. Além disso, por muitos séculos o conceito de força tinha relação com a ideia que hoje temos de energia. Sem esses conhecimentos, o(a) professor(a) não consegue questionar o saber a ser ensinado, comparando-o com o saber de referência. Em outras palavras, o(a) professor(a) terá dificuldades em explicitar a razão de ser do conceito de força. Ainda, a habilidade do(a) professor(a) de propor situações aos estudantes para explicar o conceito de força de forma que faça sentido a eles fica limitada. Se essa deficiência ocorrer para outros conceitos, a própria difusão do conhecimento será prejudicada.

Indo ao encontro da complexidade no ensinar, autores da área de formação de professores em Ciências defendem um ensino reflexivo (p. ex., Akerson; Abd-El-Khalick; Lederman, 2000). De forma ampla, no contexto da didática das Ciências, Astolfi e Develay (1990) entendem que a realização de reflexões epistemológicas sobre os métodos, princípios e conclusões da Ciência a partir de abordagens históricas das ideias é uma boa maneira de se elucidar as condições de produção do saber. Alinhados com esses autores, Pérez e Carvalho (2011, p. 42) argumentam que é preciso investir em uma formação em que professores e professoras conheçam as limitações dos currículos enciclopédicos e

² A monumentalização do conhecimento diz respeito ao paradigma de que conhecimentos são monumentos interessantes de se visitar, em vez de ferramentas úteis para fornecer respostas a questões problemáticas (Chevallard, 2006).

reducionistas, que não atentam aos aspectos históricos, culturais nem sociais da construção do conhecimento. Portanto, dentre as diversas formas de se promover um ensino de Ciências reflexivo, a análise de episódios históricos se mostra candidata. Conforme apontam Forato, Martins e Pietrocola (2012), o uso de história da ciência no contexto de formação tem potencial de fomentar o aprendizado sobre a epistemologia da ciência, o que é fundamental para o letramento científico, o desenvolvimento do senso crítico dos estudantes, bem como aspectos sócio-históricos da construção do conhecimento científico.

Entretanto, propostas concretas de implementação enfrentam inúmeras dificuldades. Atualmente, as áreas de conhecimento são deveras especializadas, de forma que se pode falar que o conhecimento vive em “gaiolas epistemológicas”. Apesar de reconhecerem que toda abordagem histórica incorre em riscos (como o anacronismo), os autores da área de ensino de ciências defendem sua utilização, e recomendam, por exemplo, um enfoque transdisciplinar, visando a superação das barreiras colocadas pela especialização das áreas, assim como reflexões sobre a sintonia da abordagem histórica pretendida com os métodos de ensino adotados. De fato, simplesmente trazer elementos de história sem a observância de perspectivas historiográficas contemporâneas pode comprometer toda a representação pretendida. Assim, Pietrocola, Ricardo e Forato (2019) entendem que professores precisam estar minimamente cientes dos riscos envolvidos ao se trazer história da ciência para a sala de aula e argumentam que a vigilância epistemológica é uma ferramenta útil para minimizar as distorções inerentes do processo de transposição didática.

Segundo Adúriz-Bravo e Izquierdo-Aymerich (2009), assumir um enfoque na explicitação de episódios históricos é um meio de contornar as dificuldades em se apreender a sofisticada análise epistemológica requerida para compreender a construção do conhecimento científico. Entretanto, para Lederman (2006), as discussões sobre os elementos epistemológicos do fazer científico precisam ser explícitas, pois isso facilita a construção de concepções sofisticadas sobre aspectos relacionados à natureza da Ciência e sobre o fazer científico. No entanto, tais considerações podem ser infrutíferas quando não se tem em conta o público ao qual o ensino se destina. Em um artigo que discute as concepções espontâneas de estudantes de Física, Zylbersztajn (1983) alerta que, se a bagagem cultural e a linguagem dos alunos for desprezada, os mesmos possivelmente construirão estruturas superpostas de conhecimento, sendo uma formal, vinculada com o conhecimento ensinado, e outra informal, associada a conhecimentos construídos no dia a dia. Nesse caso, o propósito do ensino de Física é comprometido, já que, em sala de aula, os alunos usariam majoritariamente a estrutura formal, enquanto usariam a estrutura

informal ao lidar com situações espontâneas, o que anula o sentido do conhecimento científico.

Como promover um ensino para futuros docentes que, ao mesmo tempo em que cumpre os dispositivos legais vigentes (discutidos na Seção 6.1), também promove uma educação reflexiva, alinhada com perspectivas contemporâneas no Ensino de Física? Uma alternativa para esse objetivo é o ensino com enfoque no processo de modelagem científica (Justi; Gilbert, 2002; Louca; Zacharia, 2012; Heidemann et al., 2018). Isso porque, ao modelar, o sujeito pode evocar de forma explícita hipóteses cosmovisivas, ontológicas e/ou representacionais sobre o evento representado. Ou seja, no cerne do processo de modelagem científica se encontra o conceito de “hipótese”, que revela muito sobre as concepções filosóficas e epistemológicas vinculadas a um dado saber, bem como sobre o contexto sócio-histórico em que o saber foi produzido. Por exemplo, ao se compreender que Newton propõe a terceira lei a partir da hipótese de conservação da quantidade de movimento, na forma proposta anteriormente por Descartes³, pode-se refletir sobre o ensino tradicional desse conhecimento, inclusive vislumbrando novas formas de abordá-lo no contexto educacional. Por conta disso, entende-se que a compreensão das hipóteses que fundamentam a construção das teorias e modelos são muito importantes para fomentar reflexões sobre a transposição didática, favorecendo a vigilância epistemológica.

Frente ao exposto, entende-se que a compreensão, por parte dos professores, das hipóteses basilares da construção do conhecimento pode ser importante para: i) proporcionar a contextualização do conhecimento, fomentando a criticidade e discussões sobre a influência do contexto histórico em que ele foi construído; ii) elucidar a construção do conhecimento como um processo de modelagem que produz sistemas hipotético-dedutivos, ou seja, para esclarecer que as hipóteses são a base para a construção do conhecimento que vem depois; o conhecimento não é entendido como um produto, mas como uma construção que parte de algo mais básico; e iii) fomentar a vigilância epistemológica na prática docente.

Para investigar essas proposições, escolheu-se a Mecânica Clássica (MC) como área de investigação, em particular, no contexto de uma disciplina chamada Mecânica Clássica para a Licenciatura, do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A disciplina com a temática da MC foi escolhida como contexto do estudo porque: i) mesmo se tratando de uma disciplina viva, que move físicos ainda hoje na

³ A noção da conservação da quantidade de movimento (produto da massa pela velocidade) cartesiana tem raiz na Teoria do Impetus, de Jean Buridan, que viveu no séc. XIV (Peduzzi, 2008).

busca por soluções para problemas sobre dinâmica não linear⁴, por exemplo, costuma ser abordada como uma disciplina exclusivamente de base, desconectada da produção contemporânea da Física. Por isso, entende-se que ela, principalmente no contexto de formação de professores, necessita ser estruturada como uma disciplina de Física contemporânea; ii) tradicionalmente a disciplina é abordada com grande enfoque matemático em detrimento de discussões conceituais. Com o uso extensivo de recursos computacionais, a disciplina pode ter um enfoque mais conceitual, o que é imprescindível na formação de professores; e iii) em consulta preliminar da literatura, identificou-se uma lacuna em termos de trabalhos que propõem um ensino deste tema pautado por concepções contemporâneas de ensino. Os conteúdos abordados são compatíveis com os da súmula da disciplina, a saber: formulação vetorial da mecânica newtoniana; forças conservativas e forças centrais; sistemas de partículas: centro de massa, leis de conservação; oscilações; noções sobre o formalismo lagrangiano e hamiltoniano.

Nessa pesquisa, busca-se elucidar se e como um ensino por meio do enfoque nas hipóteses basilares da ciência pode fomentar a vigilância epistemológica sobre temas no âmbito da MC. Portanto, pode-se enunciar o objetivo geral desta pesquisa:

Identificar aspectos teóricos e metodológicos de uma abordagem didática capaz de proporcionar o exercício da vigilância epistemológica por parte de futuros professores de Física sobre temas da Mecânica Clássica a partir da compreensão das hipóteses assumidas na teorização desse campo científico,

assim como sua questão norteadora:

Como favorecer o exercício da vigilância epistemológica por parte de professores de Física na transposição didática dos conceitos e teorias da Mecânica Clássica?

Como é inerente a uma pesquisa qualitativa, essa questão foi desdobrada ao longo da investigação em questões mais específicas, cujas respostas foram construídas em três estudos, dois de natureza teórica (Estudos 1 e 3) e um empírico (Estudo 2).

No capítulo seguinte, explicam-se os referenciais teóricos usados nesta pesquisa. No Capítulo 3, relatam-se estudos anteriores pertinentes para o trabalho. No Capítulo 4, expõe-se o delineamento metodológico, explicando o encadeamento dos Estudos 1, 2 e 3. No

⁴ Conhecimentos de fronteira na Física, como a dinâmica não linear, nascidos no seio da MC, tem implicações que vão muito além da Mecânica Clássica.

capítulo seguinte, o estudo bibliográfico (Estudo 1) é apresentado. No Capítulo 6, elucida-se o estudo empírico exploratório (Estudo 2). No Capítulo 7, apresenta-se o referencial teórico-metodológico para o ensino de MC (Estudo 3). Por fim, são apresentadas as considerações finais deste trabalho no Capítulo 8.

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

Conforme explicado na introdução, este trabalho é centrado na promoção da vigilância epistemológica no ensino de MC, tendo a TAD (Chevallard, 1996) como referencial teórico. Para elucidar as hipóteses basilares associadas à MC, utilizou-se o referencial teórico de Lima e Heidemann (2023). Esses referenciais são apresentados nas seções seguintes, respectivamente.

2.1 TEORIA ANTROPOLÓGICA DO DIDÁTICO (TAD)

Na TAD, Chevallard (1996) usa o termo “didático” para enfatizar que se trata de uma teoria sobre o estudo, sobre a difusão do conhecimento por pessoas ou instituições. Já o termo “antropológica” salienta que a construção e difusão do conhecimento é feita no seio das interações humanas, que podem ser caracterizadas como uma rede de colaborações e significados. Assim, a TAD explica as relações entre pessoas, instituições e conhecimentos, vinculando a ação humana, em particular a difusão do conhecimento, com as condições e restrições impostas por um determinado contexto. A questão central dessa teoria, imersa na didática francesa, pode ser elaborada da seguinte forma: *Como os conhecimentos são (ou não são) difundidos nas sociedades?*

Para se responder a tal questão, pode-se explorar algumas perguntas mais específicas: Quem decide o que é ensinado? Por que uma perspectiva é adotada em detrimento de outra? Até que ponto um conhecimento pode ser ensinado em um determinado contexto em função das condições e restrições impostas? Essas questões podem ser respondidas quando se entende a atividade humana como resultante de relações entre pessoas e/ou instituições com os corpos de conhecimento em diferentes instituições (Chevallard, 2019).

Na TAD, as relações das pessoas com os conhecimentos podem ser representadas por meio do que Chevallard denomina de *Organizações Praxeológicas* (OPs), ou *praxeologias* (Chevallard, 1998, 2019, 2020). Tipicamente, uma OP é formada por um Bloco Prático (a “*praxis*”) e um Bloco Teórico (o “*logos*”). Dentro do Bloco Prático, tem-se um tipo de tarefa (usualmente um problema a ser resolvido) e uma técnica (a forma como a tarefa é resolvida). Já o Bloco Teórico é composto por uma tecnologia (discurso que gera, explica ou justifica a técnica usada) e uma teoria (que gera, explica ou justifica a tecnologia). Por exemplo, o problema “*estimar a fração da energia solar refletida pela água de um lago ao*

longo do dia” (tipo de tarefa) pode ser resolvido através da mobilização de técnicas fundamentadas em conhecimentos teóricos bem estabelecidos na Física. Nesse caso, a teoria eletromagnética clássica (*teoria*) é útil porque permite analisar a interação da radiação eletromagnética com a água - um meio dielétrico - à luz da conservação da energia: a amplitude do campo elétrico da onda refletida pela interface ar-água pode ser obtida pelas equações de Fresnel. Os conceitos específicos como “meio dielétrico”, “conservação da energia”, “amplitude do campo elétrico”, “onda refletida” e “interface ar-água” fazem parte do *discurso tecnológico*, sem o qual não se consegue utilizar as equações de Fresnel. Com o aparato tecnológico, tem-se subsídios para amparar a *técnica*, isto é, com base nesse instrumental teórico, é possível construir um experimento que mede a intensidade da luz refletida por uma porção d’água como função do ângulo de incidência. A água poderia ser de torneira, a luz, de um *laser*, e os instrumentos de medida poderiam ser luxímetros, para medir a iluminância da luz, e transferidores, para medir o ângulo de incidência (*técnica*). Evidentemente, essa OP não é única, já que outras técnicas ou blocos teóricos podem ser mobilizados para a mesma tarefa. Eventualmente, no entanto, a instituição⁵ passa a adotar e endossar certas técnicas e conhecimentos para resolver determinados tipos de tarefas, até que certo tipo específico de OP é legitimada pela instituição.

No contexto de uma instituição formal de ensino, o professor julga o aprendizado do estudante avaliando se ele consegue mobilizar teorias, discursos tecnológicos e técnicas para resolver determinados tipos de tarefa. Nesse sentido, o processo de avaliação pode ser entendido como uma medida da conformidade entre as OPs dominadas pelos estudantes com OPs preconizadas pela instituição para a posição de estudante. No exemplo anterior, a OP ilustrada é uma representação de uma parte da relação esperada entre um estudante e conceitos de ótica em uma disciplina de Física experimental no contexto de uma determinada instituição universitária.

Por meio do conceito de OP, também é possível entender como se dá a disseminação de conhecimentos em uma sociedade. Na TAD, esse processo é entendido como a difusão social de relações entre pessoas e objetos, ou, nos termos até aqui apresentados, como a difusão de OPs. A difusão de conhecimentos em si equivale à transposição de OPs entre diferentes instituições; e tendo em vista os fatores que favorecem ou restringem esse processo, provoca transformações no conhecimento original. Como esses fatores se manifestam em contextos educacionais? Segundo Gascón (2011), as dimensões

5 Na TAD, “instituição” é um conceito central que se refere a qualquer estrutura ou organização social que influencia, regula ou determina as práticas e comportamentos dos indivíduos. No contexto educacional, uma instituição pode ser uma escola, uma universidade, ou até mesmo o sistema de ensino como um todo.

fundamentais do problema didático são as dimensões epistemológica, ecológica e econômica.

A dimensão epistemológica se refere ao entendimento da organização e estrutura do saber a ser estudado, ensinado ou transposto, destacando a necessidade de um Modelo Epistemológico de Referência (MER) para guiar esse entendimento (Idem, 2011). Segundo Gascón e Nicolás (2022, p. 15), o MER responde à questão: “o que (se deve) estudar?”. Um MER pode ser explícito ou implícito, tratando-se de uma ferramenta crucial na análise dos processos de transposição didática, no estudo do fenômeno didático em si e no *design* de novos processos de estudo (Florensa; Bosch; Gascón, 2020). Ele serve como uma ferramenta heurística para revelar fenômenos previamente não notados ou ignorados pelo modelo epistemológico dominante. O MER desempenha um papel fenomenotécnico, fornecendo elementos conceituais para formular problemas didáticos e expandir o conhecimento em questão. Na construção de MER, considera-se dados empíricos de todas as fases de transposição didática. Esse processo envolve: a) selecionar, rejeitar e destacar fatos didáticos; b) estabelecer conexões; c) lidar com dados raros ou ausentes.

Não há uma forma consensual de representar um MER. Destacam-se, no entanto, duas delas. Em uma delas, o MER é representado como uma sequência de praxeologias de complexidade crescente, em que as limitações de uma praxeologia demandam a construção de uma nova, mais completa que a anterior (p. ex, Sierra, 2006; Ruiz-Munzón, 2010). A outra forma de representação do MER cristaliza-se por meio de um mapa de questões e respostas iniciadas por uma questão geradora (p. ex. Barquero, 2009; Lucas, 2015). Como será visto, no terceiro estudo deste trabalho, optou-se por representar o MER como uma sequência de praxeologias de complexidade crescente.

Já a dimensão ecológica se refere às condições e restrições, que podem ser entendidas como fatores ou variáveis que influenciam as atividades didáticas em um determinado contexto, facilitando-as ou restringindo-as. A compreensão das condições e restrições permite compreender por que as atividades didáticas ocorrem de determinada forma em um contexto específico, podendo revelar o que é necessário para modificar tais atividades (Gascón, 2011). O contexto no qual as condições e restrições são avaliadas neste estudo é o da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS, cursada por licenciandos da Física. Uma das particularidades desse contexto é a própria existência de uma disciplina de MC voltada à licenciatura, isto é, uma disciplina preocupada não apenas com a exposição do formalismo matemático, mas também com as implicações didáticas dos saberes, especialmente no contexto do Ensino Médio. Talvez essa seja a característica que

mais diferencia o contexto desse estudo do restante dos cursos de formação de professores de Física no Brasil.

No âmbito da TAD, as condições e restrições moldam as relações entre pessoas/instituições e os objetos de estudo - no contexto deste estudo, os objetos de estudo são os conteúdos da MC. Condições podem ser representadas por enunciados como: “A explicitação do papel das ideias aristotélicas no pensamento newtoniano favorece a reflexão e questionamentos sobre o processo de transposição das leis de Newton”, “É difícil transpor conhecimentos originalmente expressos na linguagem das razões e proporções”, “O entendimento das noções de ímpeto e força impressa facilita a compreensão menos distorcida do conceito de inércia, evidenciando sua razão de ser” e “Muitos livros didáticos sobre MC em nível superior apresentam o conhecimento de forma descontextualizada, ignorando as contribuições de diferentes cientistas na construção dos saberes”. Como se observa, as condições só podem ser parcialmente conhecidas e não estão disponíveis a priori. Geralmente, elas emergem da observação minuciosa do sistema didático, sem garantir um conhecimento completo (assim como no caso das forças invisíveis que moldam o comportamento social em uma instituição, mas nem sempre são reconhecidas imediatamente). Já as restrições podem ser entendidas como tipos de condições que limitam a difusão do conhecimento. São exemplos de restrições: “A formalização matemática rigorosa da Mecânica Analítica só é possível após o domínio do cálculo variacional”, “O tempo limitado em sala de aula restringe o uso de metodologias ativas, como debates e discussões em grupo”, “As diretrizes curriculares nacionais impõem um conteúdo mínimo que deve ser abordado” e “A dificuldade dos licenciandos em compreender a língua inglesa limita sua autonomia na busca de conhecimentos além do material didático disponível”.

As condições e restrições diferem entre si na medida em que as condições são passíveis de alteração por qualquer instância, enquanto as restrições são limitações que só podem ser superadas a partir de alguma instância particular (Chevallard, 2019, 2020). Por exemplo, no nível de graduação, frente à realidade dos livros de MC que apresentam o saber de forma descontextualizada, pode-se recorrer a materiais didáticos alternativos; a dificuldade em transpor conhecimentos sobre razões e proporções pode ser superada por meio de uma maior ênfase no tópico, atacando as dificuldades mais comuns. Ressalta-se que essas soluções são adequadas ao contexto da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS, que será caracterizada no Estudo 2. Possivelmente, algumas das condições poderiam ser restrições em outros contextos educacionais. As restrições são mais difíceis de modificar: os estudantes não aprenderão inglês do dia para a noite, nem mesmo

em um semestre letivo inteiro; o tempo disponível para aulas de Física só será alterado após a aprovação de lei específica, etc.

Chevallard (2018) destaca que o estudo da ecologia permite explorar as condições que possibilitam ou impedem a ocorrência de fenômenos educacionais, enquanto Bosch e Gascón (2006) enfatizam que a ecologia institucional das praxeologias é um objeto central da didática, pois revela influências que vão além da sala de aula e que impactam o ensino de forma ampla. Tais influências são hierarquizadas nos chamados níveis de codeterminação didática (Chevallard, 2019, 2022). Por exemplo, um sistema didático em particular pode surgir no contexto de diferentes tipos de pedagogias (p. ex., em função de diretrizes locais), que por sua vez são influenciadas pelos diferentes tipos de escolas. Em níveis mais altos de codeterminação, podemos compreender que as escolas estão inseridas em sociedades, que influenciam tais escolas (afinal, cada sociedade pode abrigar diferentes tipos de Estados, religiões, etc.). Subindo mais um nível, entendemos que todas as sociedades são grupos inseridos em determinada civilização (p. ex., a civilização ocidental), que possui valores e elementos culturais próprios. Segundo Chevallard, o nível mais alto de codeterminação é a humanidade em si, que é única desde a extinção do Homem de Neandertal.

Assim, a escala de codeterminação é uma ferramenta útil para compreender certa realidade educacional tendo em vista o contexto mais amplo, que usualmente é deixado de fora das análises didáticas. As condições e restrições são, em última análise, originárias de diferentes níveis da escala de codeterminação didática (Bosh, 2018). Isso é evidenciado pelos exemplos de condições e restrições anteriormente mencionados. Em outras palavras, a influência dos diferentes níveis de codeterminação em cada realidade educacional é a marca da sociedade, salientando a feição antropológica dos processos didáticos: o ensino e a aprendizagem não são apenas processos cognitivos ou pedagógicos isolados, mas também fenômenos sociais e culturais que são moldados pelas práticas, valores e estruturas de cada sociedade (Castela, 2020). Mesmo que a influência dos níveis de codeterminação resulte em condições e restrições que independem da vontade dos indivíduos, isso não significa que uma realidade educacional não possa ser mudada. Na TAD, entende-se que as restrições podem se tornar condições a partir de uma dada posição institucional (Chevallard, 2020; Gascón, 2011).

Por fim, a dimensão econômica diz respeito à forma como os sistemas didáticos lidam com as condições e restrições a ele impostas (Gascón e Nicolas, 2022). Trata-se do conjunto de regras e princípios que regulam a organização e funcionamento do sistema didático. Conforme explica Gascón (2011, p. 213), para entender a dimensão econômica, é

preciso elucidar tanto o MER quanto um Modelo Didático de Referência (MDR) associado. Como sugere o nome, o MDR fornece uma resposta à questão: “como (se deve) estudar?”. Um MDR é naturalmente dependente do MER, já que a resposta à pergunta de natureza didática (“como estudar?”) dependerá “do que” está sendo estudado. O recurso representacional para a exposição do MDR mais utilizado em pesquisas na TAD é o chamado esquema herbatiano, porque ele descreve o processo de obtenção de respostas no paradigma educacional de questionamento do mundo, a pedagogia central preconizada pela teorização (Chevallard, 2007). A seguir, também com o objetivo de ilustrar conceitos da TAD importantes neste estudo, descreve-se o esquema herbatiano em maiores detalhes.

O esquema herbartiano deriva seu nome do pedagogo alemão J. F. Herbart (1776-1841), que defendia uma formação caracterizada por uma postura receptiva a perguntas, tanto de alunos quanto de professores, diante de perguntas ainda sem resposta e problemas não resolvidos. Uma representação simbólica desse esquema é a seguinte (Chevallard; Bosch, 2020):

$$[S(X, Y, Q_0) \curvearrowright M = \{O_1, O_2, \dots, O_m, R_1^\diamond, R_2^\diamond, \dots, R_n^\diamond, Q_1, Q_2, \dots, Q_p, D_1, D_2, \dots, D_q\}] \curvearrowright R^\heartsuit .$$

Na primeira parte do esquema, $S(X, Y, Q_0)$ representa o sistema didático composto por um conjunto de pessoas na posição de quem aprende X , na posição de quem ensina Y e uma questão geradora Q_0 . Quando o sistema didático inicia a procura por respostas à questão geradora, a busca tipicamente leva ao encontro de um conjunto de obras O_1, O_2, \dots, O_m , que se tratam de pedaços de conhecimentos (como teorias e praxeologias) produzidos por outras pessoas no passado, como tentativa de responder a questões similares à Q_0 ou que podem ser relevantes para respondê-la. Tais conhecimentos trazem um conjunto de respostas parciais ou provisórias $R_1^\diamond, R_2^\diamond, \dots, R_n^\diamond$, que recebem o símbolo sobrescrito para indicar que possuem legitimação na instituição. Ainda, dados de toda a natureza D_1, D_2, \dots, D_q fazem parte do processo de investigação (constantes físicas, datas, fragmentos textuais, etc). Entretanto, nem todas as questões geradoras poderão ser completamente respondidas unicamente por um conjunto preestabelecido de respostas. Assim, Q_0 acaba sendo dividida em questões derivadas Q_1, Q_2, \dots, Q_p , às quais precisam de respostas, reiniciando assim o processo.

O conjunto das obras preexistentes, respostas parciais ou provisórias e questões derivadas compõem o chamado *milieu* M , que pode ser entendido como um meio de exploração e acúmulo de subsídios para responder a Q_0 . O *milieu* é construído e organizado pelo sistema didático, evoluindo com o tempo, até que, eventualmente, torna-se

estável o suficiente para embasar a elaboração de uma resposta final R^\heartsuit à questão geradora. A resposta final recebe um coração sobrescrito para indicar seu lugar no coração do processo de investigação, isto é, o estudo da questão tem como alvo a obtenção de respostas. Portanto, o estudo de Q_0 pode ser representado como uma arborescência de questões derivadas e respostas parciais que termina na construção de uma resposta final provisória R^\heartsuit a Q_0 ⁶. Como esclarecem Bosch e Winsløw (2015), a resposta R^\heartsuit é, em si, uma praxeologia, ou uma amálgama de praxeologias, contendo conhecimentos teóricos (*know why*) e práticos (*know how*) provenientes do *milieu* M construído.

Segundo Chevallard (2022, p. 218), o esquema herbatiano pode ser usado para descrever todos os paradigmas de estudo. Neste ponto, é conveniente discorrer brevemente sobre dois paradigmas opostos, que se localizam no nível pedagógico na escala de codeterminação. O chamado paradigma de visita às obras é um modelo em que o estudo é estruturado como se os conhecimentos (ou obras) já estivessem prontos e finalizados, cabendo aos alunos “visitá-los”. Nesse paradigma, as obras são apresentadas como produtos acabados, deixando poucas oportunidades para os estudantes compreenderem o processo de criação dessas obras ou a razão de sua existência (*raison d'être*). Em contraste, o paradigma de questionamento do mundo coloca a ênfase no processo de construção do conhecimento, ao invés do conhecimento já construído, principalmente por meio de questões. Nesse paradigma, o estudo é organizado em torno da exploração de questões cruciais e vivas, incentivando uma abordagem funcional dos saberes. As obras ainda são “visitadas”, mas agora com o objetivo de usá-las como ferramentas para fornecer respostas às questões, colocando a razão de ser dessas obras no centro do processo de aprendizado. A TAD propõe que uma transição do paradigma de visita às obras para o de questionamento do mundo é fundamental para promover um ensino que valorize o entendimento profundo e a aplicação prática do conhecimento, em vez de apenas a memorização de resultados acabados (García, Lendínez e Lerma, 2022).

Por exemplo, no esquema herbatiano aplicado ao paradigma tradicional de visita às obras, as questões geradoras são, tipicamente, bastante fechadas, admitindo um número limitado de obras monumentalísticas O_1, O_2, \dots, O_m acessíveis aos estudantes. Isso gera um conjunto de respostas $R_1^\diamond, R_2^\diamond, \dots, R_n^\diamond$ muito próximas da resposta final R^\heartsuit , previamente conhecida pelo(a) professor(a) e, essencialmente, a única possível. Nesse paradigma, o *milieu* é pouco construído, pois já nasce essencialmente pronto. Já no

⁶ Evidentemente, admite-se, no pior dos casos, a impossibilidade de responder a Q_0 frente às condições e restrições do sistema didático.

paradigma de questionamento do mundo, as questões geradoras são de cunho aberto e não pressupõem um conjunto predeterminado de obras e respostas parciais ou mesmo finais possíveis. Nesse paradigma, os estudantes se envolvem num tipo de investigação tipicamente analisada em termos das chamadas *dialéticas de estudo* (Chevallard, 2007).

Chevallard (2022, p. 219) define as dialéticas como praxeologias, materializadas em processos ou métodos de pensamento, que permitem superar ou transcender duas formas opostas ou contrárias de restrições, transformando-as em novas condições que as substituem. Essas novas condições resultam de uma operação de “superação”, em que as restrições anteriores são elevadas a um novo nível ou integradas de uma maneira que vai além delas. Tanto professores quanto estudantes precisam desenvolver essas dialéticas e sua influência é tão mais presente quanto mais aberto é o processo de estudo. As três principais dialéticas de qualquer processo de estudo são as dialéticas: *das perguntas e respostas; da conjectura e prova; e do indivíduo e do coletivo* (Barquero; Bosch; Romo, 2019). Essas dialéticas caracterizam, respectivamente, a evolução do estudo (*cronogênese*), do *milieu* (*mesogênese*) e das responsabilidades entre os integrantes do sistema didático (*topogênese*).

A dialética das perguntas e respostas descreve temporalmente a sucessão de questões que os futuros professores buscam responder e as respostas que fornecem para elas, isto é, a *cronogênese* do estudo. O “não saber a resposta para uma dada questão” e seguir o processo de estudo até obter uma solução é um conhecimento que supera a tendência natural de querer respostas prontas, vindas do(a) professor(a).

A dialética de conjectura e prova se refere à forma como novos elementos devem ser incorporados ao *milieu*, compondo assim a mesogênese da investigação. No curso de um estudo sobre uma questão Q_0 por um sistema didático $S(X, Y, Q_0)$, X é confrontado com enunciados emitidos por livros, artigos, da internet, de Y , etc. Na TAD, todos os sistemas capazes de emitir mensagens são chamados de *media*⁷. Apesar da plausibilidade, todas as mensagens recebidas por X (incluindo aquelas enviadas por Y) devem ser considerados conjecturas. A *media* deve ser questionada e vasculhada a procura de provas dos enunciados por ela emitidos, não devendo esses ser simplesmente aceitos e incorporados no *milieu*. Essa dialética dá conta de explicar a busca pela verdade no processo de estudo. Saber como lidar com as informações recebidas de forma não ingênua é o conhecimento descrito pela dialética da conjectura e prova.

⁷ Com relação às mensagens emitidas, a *media* se comporta como um *milieu* “adidático”, no sentido de ser desprovida de qualquer intenção de provar ou refutar a mensagem.

A dialética do indivíduo e do coletivo é um conhecimento que permite a superação das tensões inerentes ao trabalho coletivo⁸. Os atores $x \in X$ podem atuar individualmente ou em grupo contribuindo para o coletivo com suas próprias respostas R_x^\heartsuit , que equivalem, em importância, às respostas $R^\diamond \in M$, de onde a resposta final coletiva R^\heartsuit será produzida. Saber navegar entre o indivíduo (eu) e o coletivo para contribuir com a criação de uma resposta R^\heartsuit é fundamental para valorizar as respostas geradas pela comunidade de estudo em oposição às respostas impostas pelo(a) professor(a) ou pela instituição. Gestos inerentes da dialética do indivíduo e do coletivo envolvem acordos sobre quais perguntas serão endereçadas, que obras serão estudadas, a distribuição de tarefas, responsabilidades e atribuições de cada ator, qual resposta final será dada, etc. Os papéis e responsabilidades assumidos pelos participantes ao longo da investigação definem a *topogênese* do estudo.

No contexto desta pesquisa, o conceito mais importante do corpo teórico da TAD é a noção de vigilância epistemológica, que está intimamente relacionada com o processo de transposição didática. Todo processo de transposição didática envolve transformações em relação ao conhecimento original (Chevallard, 2019). Por exemplo, ao discutir determinada OP em sala de aula, é comum a apresentação de conhecimentos sem a devida *contextualização*, o que pode, em algum nível, apagar o sentido do conhecimento. Inúmeras outras adaptações são possíveis; salienta-se que nem todas elas são necessariamente ruins ou boas: a contextualização é útil até o ponto em que situa o conhecimento, conferindo-lhe sentido sem, contudo, sobrecarregar o estudante; a transformação do conteúdo é bem-vinda até o ponto em que o conhecimento apreendido deixa de ser útil para lidar com uma dada situação, etc. O professor que tem consciência disso, e é capaz de refletir e questionar o saber a ser ensinado tendo em vista o saber de referência, exerce no processo de transposição didática o que Chevallard denomina de *vigilância epistemológica*. Nem sempre, no entanto, o professor exerce vigilância epistemológica: há situações em que não há questionamento sobre o porquê das coisas serem como são ou sobre o que precisaria mudar para que elas fossem mais adequadas em relação ao saber de referência. Nesses momentos, diz-se que o professor fecha sua consciência didática, concentrando-se no fim específico de ensinar determinado conhecimento. O professor pode usar a criatividade para proporcionar um ensino adequado ao seu contexto, podendo surgir daí técnicas originais, ou mesmo um ensino crítico e reflexivo, porém apartado do questionamento sobre a compatibilidade entre os dois tipos de saberes (Chevallard, 1991, p. 16-17).

⁸ Um estudo coletivo não deve ser confundido com um estudo em grupo. Grupos são formas de organização dos atores do processo de estudo, que é, em si, entendido como coletivo.

Cabe ainda destacar a diferença entre a transposição didática interna e externa dos saberes. Segundo Chevallard (1991, p. 12), a transposição externa se refere à escolha, por um grupo de indivíduos que tipicamente está fora do sistema didático, dos conhecimentos que farão parte dos currículos. Esse processo envolve a seleção e fragmentação do saber em unidades que constituem o saber a ser ensinado, envolvendo, evidentemente, transformações e adaptações no processo de transposição. Já a transposição interna é aquela feita predominantemente pela instituição na qual o professor atua, sendo voltada para o contexto específico de sala de aula, por exemplo. O processo de transposição interna se dá do saber a ser ensinado (aquele nos livros, por exemplo) para o saber ensinado (o saber transposto pelo professor). Assim, pode-se dizer que a atuação do professor é essencialmente passiva na transposição externa e mais ativa na interna. O processo de transposição é entendido como um processo essencialmente institucional, no qual o professor é mais espectador do que agente. Pode-se dizer que o professor *sofre* a transposição didática coletivamente construída no âmbito da instituição. Isso não elimina o papel do professor no exercício da vigilância epistemológica.

Nesta pesquisa, a TAD é fundamental para tornar, em uma disciplina de formação de professores, mais explícitas as transformações decorrentes do processo de transposição didática interna dos conhecimentos científicos a partir de discussões sobre questões do tipo: *Até que ponto a transformação de conceitos científicos pode auxiliar a prática docente sem comprometer o conhecimento original? Como o entendimento historicamente situado e a compreensão das tensões relacionadas ao contexto da construção do conhecimento científico dão sentido a um dado conhecimento?* No contexto deste estudo, entende-se que discussões centradas nessas questões favorecem que os estudantes construam subsídios para a realização da vigilância epistemológica em sua futura prática e, por isso, devem permear todas as etapas do seu currículo. Destaca-se que, na articulação a ser construída, não se pretende propor a condução de discussões específicas sobre conceitos da TAD; na pesquisa, exploram-se os conceitos da TAD em situações de ensino, evidenciando os processos históricos e epistemológicos envolvidos na difusão dos conhecimentos nas sociedades.

Conceitos da Modelagem Científica, em articulação com a TAD, são úteis nessa pesquisa porque podem esclarecer como os modelos científicos, entendidos como sistemas hipotético-dedutivos, se transformam historicamente por meio de, entre outras coisas, mudanças nos seus pressupostos (p. ex., princípios adotados e concepções sobre a natureza), e se modificam em função das relações institucionais com os corpos de conhecimento legitimados, dos contextos sociais e históricos, e dos paradigmas científicos

hegemônicos. Depreende-se daí a importância de uma compreensão mais profunda das hipóteses basilares do conhecimento, que serão exploradas em maior detalhe na próxima seção. Ainda, pode-se entender que o suporte teórico que sustenta os modelos científicos ensinados no contexto dos sistemas educacionais fica, muitas vezes, implícito. Portanto, um ensino que privilegia discussões dessa natureza em um curso de Licenciatura em Física é fundamental, pois pode contribuir para o desenvolvimento de concepções epistemológicas mais sofisticadas por partes dos futuros professores.

2.2 ANÁLISE DA NATUREZA DAS HIPÓTESES CIENTÍFICAS

Um modelo científico pode ser entendido como um sistema hipotético-dedutivo. Esse entendimento não implica necessariamente uma visão sintática da Ciência, pautada por ideias positivistas; assumir que modelos científicos são sistemas hipotético-dedutivos é compreender que grande parte do conhecimento é derivado de hipóteses básicas sobre a natureza e sobre a Ciência, e que o fazer científico é dirigido por essas hipóteses. Por conta disso, pode-se argumentar que a compreensão das hipóteses admitidas na construção dos modelos científicos é fundamental para se entender a própria Ciência. A importância dos modelos e da modelagem científica, especialmente no ensino de Física, já é reconhecida por mais de 30 anos (por ex., Dounas-Frazer; Lewandowski, 2018). Embora o *status* epistemológico dos modelos científicos ainda seja uma questão em debate, admite-se que eles são essenciais no que diz respeito à produção, disseminação e aceitação do conhecimento científico.

Apesar do significado do termo “modelo” não ser consensual, grande parte dos epistemólogos da ciência utilizam a noção de “representação” quando se referem a um modelo científico (Oh; Oh, 2011). Essas representações precisam ser explicitadas por meio de construções externas, pois a validade de um modelo é conferida pelos pares. Assim, um dos pré-requisitos para que um modelo científico seja válido é que o seu significado possa ser compartilhado, o que requer que os conceitos imbricados em sua construção sejam explicitáveis. Esse aspecto dos modelos é crucial na argumentação que se pretende construir: a clareza sobre os aspectos que fundamentam um modelo (ou um conhecimento) fomenta a abertura da consciência didática, estimulando a vigilância epistemológica por parte dos estudantes futuros professores.

O processo de construção de um modelo científico, ou o processo de modelagem científica propriamente dita, engloba um conjunto de ações com o intuito de resolver uma situação-problema, ou representar um evento físico (Louca; Zacharia, 2012). Estudos

apontam que o ensino por meio do enfoque no processo de modelagem científica promove avanços nas concepções epistemológicas dos estudantes, pois, quando expostos a essa abordagem, eles têm a oportunidade de entender o papel dos modelos na ciência, em particular sua utilização como mediadores entre teoria e realidade e o papel fundamental da utilização de evidência experimental no processo de contrastação empírica para dar suporte ou não a uma teoria ou modelo (Brandão et al., 2012; Heidemann et al., 2016).

Ensinar por meio do enfoque no processo de modelagem envolve, como dizia Hodson (2014), aprender Ciência e aprender sobre Ciência. Nesta perspectiva, entende-se que os elementos epistêmicos e sociais da construção do conhecimento científico estão intimamente relacionados. Uma forma de trazer tais elementos para o âmbito didático é evocar discussões sobre episódios históricos da Ciência (McComas; Kokkotas; Rizaki, 2011). Pode-se citar, a título de exemplo, as transformações históricas do conceito de força na Física (Jammer, 1957). Para Aristóteles (séc. IV a.C.), força era pré-requisito para a existência de movimento. Assim, ao ser abandonado a partir do repouso, por exemplo, um corpo adquire uma força interna/inata que atua o levando para o centro da Terra, seu lugar natural. Tal força possui a propriedade finalística de reestabelecer a hierarquia dos elementos na cosmovisão aristotélica; tal concepção só foi substituída com Descartes (séc. XVII d.C.), que formulou o conceito de inércia como é hoje conhecido. Para Descartes, só existem forças de contato e essas são sempre externas ao corpo, não possuindo propriedades finalísticas. No entanto, vê-se que a herança milenar aristotélica deixou marcas até mesmo em Newton, cujas ideias sucedem Descartes: a primeira lei de Newton, conforme consta no *Principia*, é um postulado sobre a existência de forças de inércia, internas ao corpo, responsáveis por resistir às mudanças no movimento (propriedade finalística) (Chaib; Aguiar, 2016, p. 146). O conceito de força também foi usado ao longo da história para designar o conceito moderno de trabalho ou energia, o que ocasionou muita confusão ao longo dos séculos: os pioneiros da conservação da energia do séc. XIX enunciavam suas leis como princípios de conservação de “força” (p. ex., Kuhn, 1979). Abordagens históricas, que revelam as nuances e a complexidade do processo de construção do conhecimento científico, têm o potencial de promover uma compreensão mais profunda do significado desses conhecimentos, facilitando o aprendizado em Ciências. (Becker; Heidemann; Lima, 2024). As implicações do uso de elementos da história da Ciência em cursos de formação de professores são discutidas com maior profundidade na Seção 3.2.

No âmbito do “aprender sobre ciências”, pode-se destacar que o estudo de episódios históricos permite despertar a consciência de que, por exemplo: a Ciência não é neutra; a

construção do conhecimento é um empreendimento coletivo; o pensamento dos cientistas é, frequentemente, imbricado de metafísica; a aceitação das ideias científicas não é isenta de interesses e de relações de poder; cientistas frequentemente ignoram evidências experimentais buscando sustentar as próprias concepções filosóficas; a construção do conhecimento na Ciência não é linear, fruto do acúmulo contínuo de conhecimento por poucas mentes brilhantes que perpassam a história (Erduran; Dagher, 2014; Allchin, 2017; McComas, 2020). A clareza sobre tais aspectos é fundamental para um professor de Física que não deseja incorrer em falácias históricas, ou repercutir noções ingênuas sobre o fazer científico em sala de aula. Já no âmbito do “aprender Ciência”, uma análise histórica pode ser útil porque nela se encontra a gênese do conhecimento, bem como seu emprego nas diferentes áreas, sua evolução ao longo dos séculos. A clareza sobre tais aspectos pode auxiliar o futuro docente no processo de transposição didática, fomentando a vigilância epistemológica.

A construção dos modelos científicos vai além do mundo sensível. Em outras palavras, grande parte do que dirige a modelagem é hipotético. Conforme destacava Giere (1983), uma compreensão sobre a natureza das hipóteses e teorias científicas é fundamental para o entendimento do fazer científico. Essa concepção é partilhada por Lima e Heidemann (2023), que propõem uma estrutura de análise de episódios históricos partindo da noção do conceito de hipótese científica. Hipóteses podem ser entendidas como proposições científicas que vão além das evidências, isto é, excedem o conteúdo empírico do mundo experienciável, dirigindo o trabalho de pesquisa científica. Segundo os autores, grande parte do conhecimento científico é hipotético e esse aspecto se manifesta tanto nos conceitos científicos quanto nas hipóteses sobre a construção do conhecimento.

A concepção adotada se diferencia da concepção usual, que, conforme apontado por autores como Bunge (1989), Giere (1991) e Poincaré (1902), tende a classificar as hipóteses com base em características como confiabilidade, alcance ou especificidade, priorizando critérios epistemológicos estritos. Em oposição a essa abordagem, propõe-se uma categorização que integra fatores epistêmicos e sociais, oferecendo uma visão mais holística e aplicável em investigações históricas e em sala de aula. Esses aspectos são frequentemente ignorados no processo de transposição didática, sendo abordados, quando presentes, de maneira implícita. Em suma, esse enfoque permite que as hipóteses sejam vistas não apenas como proposições verificáveis, mas como ferramentas que contextualizam o conhecimento científico em seu processo de desenvolvimento e o tornam acessível em abordagens didáticas baseadas na história da ciência. Nessa concepção, a

vigilância epistemológica pode ser fomentada em nível mais amplo, abrangendo elementos da natureza da ciência.

Nesta pesquisa, adota-se a classificação das hipóteses científicas apresentadas por Lima e Heidemann (idem), que classificam as hipóteses quanto à sua natureza e quanto ao seu status lógico no conhecimento. Quanto à natureza, as hipóteses podem ser cosmovisivas, ontológicas e representacionais. As hipóteses cosmovisivas são afirmações de cunho metafísico ou epistemológico. Elas não se referem a nenhum evento em particular e dizem respeito a uma visão sobre a realidade, sobre a construção do conhecimento científico e como o cientista entende que sua teoria se adequa a ela. Por exemplo, as seguintes hipóteses são de natureza cosmovisiva: “existe uma realidade objetiva”, “Deus criou o Universo” e “a Matemática é a linguagem mais pura e adequada para descrever os fenômenos naturais”. Já as hipóteses ontológicas são afirmações sobre como um ente é ou sobre como ele deve se comportar. A afirmação sobre o “ser” diz respeito à essência da coisa em si. Por exemplo, “o calor é um fluido”, “o espaço é preenchido pelo éter” ou “a energia é um artifício meramente matemático”. Já a afirmação sobre o comportamento pode ser exemplificada pelas frases: “a interação da luz com a matéria é um fenômeno de natureza dual”, “o potencial de interação entre átomos sempre produz sistemas ligados”. Por fim, as hipóteses representacionais são aquelas assumidas quando se constrói uma representação esquemática do fenômeno ou ente para que possa ser estudado à luz de alguma teoria. Essas representações envolvem idealizações, sendo mantidos os traços-chaves do fenômeno ou ente e desprezados elementos considerados desprezíveis, promovendo simplificações que tornam o problema tratável. Por exemplo, “dois planetas interagem como se fossem partículas pontuais”, “o potencial gravitacional da Terra pode ser calculado como se ela fosse perfeitamente esférica”, “o fio de um pêndulo pode ser considerado inextensível e de massa desprezível em comparação com a massa do objeto em sua extremidade”, “pode-se desprezar a força de arrasto do ar no lançamento de um projétil”, etc. Uma hipótese representacional, portanto, vai além das evidências na medida em que pressupõe que determinados fatores são desprezíveis no que é investigado.

Assim, enquanto as hipóteses cosmovisivas têm natureza geral, as hipóteses ontológicas e representacionais dizem respeito diretamente ao fenômeno que se está tentando descrever. A adoção das diferentes hipóteses por um cientista geralmente reflete o momento sócio-histórico e cultural em que ele vive. Como exemplo disso, Lima e Heidemann (idem, p. 6) explicam que:

A busca por unificação das teorias físicas em Einstein pode ter tido influência da cultura judaica; a visão “gestáltica” de Bohr em suas pesquisas

no início da Teoria Quântica podem ter influência da filosofia de Harald Høffding; a busca de uma interpretação materialista e causal para Mecânica Quântica por Bohm pode ter influência de seus estudos marxistas, entre vários outros.

Dessa forma, a concepção de hipótese proposta por Lima e Heidemann é adotada neste trabalho pois permite identificar como as afirmações na pesquisa científica podem se relacionar com o contexto social e a construção do conhecimento. Além disso, possibilita distinguir os compromissos metafísicos e epistemológicos subjacentes, as concepções dos cientistas sobre a natureza e o comportamento dos entes, e destaca as simplificações da realidade que permeiam os conhecimentos científicos. Essa abordagem é essencial para uma compreensão mais abrangente da Ciência. Assim, a noção de hipótese aqui adotada se diferencia significativamente da concepção usual, e essa distinção se reflete na análise de episódios históricos realizada neste estudo, constituindo um de seus aspectos singulares.

Conforme mencionado, Lima e Heidemann (idem) também propõem a classificação das hipóteses quanto ao seu papel lógico nas teorias. Essa classificação distingue as hipóteses em axiomas iniciais, axiomas assumidos posteriormente e derivações. Apesar de ser útil para uma compreensão mais aprofundada sobre a estrutura do conhecimento científico, não se utiliza essa classificação neste estudo porque o enfoque está nas influências das tensões que circundam a construção do conhecimento científico.

Toda tentativa de retratar episódios históricos incorre no risco de não refletir adequadamente os eventos em estudo. A historiografia moderna tem sido a principal fonte de referências para a análise e o uso de história da ciência em contextos educacionais. Por meio da historiografia, entende-se, por exemplo, que todo relato histórico é fundamentado em uma visão particular, resultando em interpretações individuais (Kragh, 1987; Martins, 2004). Pietrocola, Ricardo e Forato (2019) chegam a conclusão de que é impossível fazer uma transposição didática envolvendo episódios da história da ciência com acurácia historiográfico e didática. Os autores recomendam, no entanto, a observância de princípios básicos da historiografia e destacam a vigilância epistemológica como uma habilidade que pode mitigar os riscos envolvidos no processo de transposição didática. Alinhado com essa concepção, Ricardo (2020) entende que a vigilância epistemológica é uma ferramenta didática útil para produzir conteúdos mais significativos no contexto escolar, ao mesmo tempo em que destaca as potencialidades do uso da história da ciência no contexto do ensino.

Como construir materiais didáticos com conteúdo histórico seguindo preceitos da historiografia moderna? Conforme mencionado, um importante passo é reconhecer que a elaboração de narrativas históricas é inevitavelmente impactada, de forma implícita ou

explícita, pelos valores, crenças e metodologias usadas na análise por aqueles que fazem o relato histórico. Os vieses pessoais, por mais que contidos, permanecem enraizados em quem faz a análise e se refletem, invariavelmente, na narrativa. Uma forma de mitigar esse aspecto é confrontar relatos históricos com trabalhos de especialistas (Forato, 2008; Gravoglu et al., 2008). Um dos equívocos mais comuns em relatos históricos é o anacronismo, isto é, o ato de representar o passado com as lentes do presente (Allchin, 2004). Tal representação tipicamente evidencia uma compreensão teleológica dos eventos históricos, ressaltando exageradamente a contribuição de poucos “gênios”, como se suas ideias infalíveis tivessem catapultado a ciência inexoravelmente em direção ao seu estado atual. Whitaker (1979) recomenda evitar reconstruções lineares, que retratam os eventos de forma ordenada. Tipicamente, essas reconstruções “fazem sentido” e se constituem em referenciais coerentes e lógicos, úteis para preparar alguém para fazer uma avaliação. Entretanto, tendem a simplificar demasiadamente o contexto de produção do conhecimento e tipicamente consideram o pensamento de poucos indivíduos como representantes do todo um período. Outro problema com construções lineares da história é que elas retratam a ciência como um empreendimento que apenas avança e não depende do aspecto humano: bastaria usar a razão e seguir um método universal, desvinculado de qualquer contingência humana e aspectos do contexto sócio-histórico em que o cientista vive. De fato, como ressaltam Pietrocola, Ricardo e Forato (2019, p. 373), é fundamental entender o papel da dimensão humana na construção da ciência, pois só assim ela pode ser entendida como uma construção cultural, “[...] influenciada pelos inúmeros elementos axiológicos de determinado tempo, e como uma atividade que não pode ser dissociada de considerações metafísicas ou estéticas [...]”. É seguindo esses preceitos da historiografia moderna que a metodologia de análise de episódios históricos centrada no conceito de hipóteses é entendida e aplicada neste trabalho.

Lima e Heidemann (2023) utilizam uma síntese diagramática para representar as hipóteses assumidas pelos cientistas na construção de conhecimentos específicos. Nesse quadro, ficam claras as relações entre o contexto no qual um conhecimento foi produzido e as hipóteses assumidas, bem como sua natureza. No seu artigo, os autores exemplificam sua metodologia com a análise de episódios históricos em que se evidencia a construção da Equação Geral do Calor e da Equação de Schrödinger. Eles, nessas duas análises, se focam no estudo de obras específicas, como o livro “Teoria Analítica do Calor”, de Fourier, para a análise da construção da Equação do Calor. A pesquisa bibliográfica exposta no Capítulo 5, de modo distinto, é inspirada no esquema de Lima e Heidemann (2023), mas envolve o estudo de conjuntos de obras, e não de produções individualmente,

proporcionando uma análise mais ampla das influências do contexto em que as teorias foram construídas, dando mais subsídios para a estruturação da disciplina de Mecânica Clássica pretendida.

Na próxima subseção, para exemplificar a metodologia inspirada em Lima e Heidemann (2023) utilizada no estudo bibliográfico no contexto da MC, aborda-se o episódio histórico que culminou na construção da noção de Antiperistasis, por Aristóteles. Diversos elementos desse episódio histórico serão evocados em episódios subsequentes, como será discutido na Seção 5.2, onde se apresenta os resultados do estudo bibliográfico (Estudo 1).

2.2.1 Antiperistasis

A Antiperistasis faz parte de uma das primeiras tentativas de se explicar o movimento de projéteis, conforme proposto por Aristóteles de Estagira (384-322 a.C.), um atento observador da natureza que viveu na era de ouro da antiga Grécia. Nessa explicação, defende-se que o meio (ar) tem capacidade de, simultaneamente, propelir o projétil no sentido inicial de movimento e pará-lo⁹. O mecanismo funciona da seguinte forma: quando o projétil perde contato com o agente que o propeliu, entra em ação um movimento de circulação do ar em torno do projétil. Essa circulação ocorreria porque o ar que estava na frente do projétil foi comprimido, tornando-se mais denso; ao mesmo tempo, o ar atrás se tornou mais rarefeito. Assim, entendendo que a natureza tem horror ao vácuo, Aristóteles argumentava que o ar flui da região mais densa para a menos densa. Tal movimento acaba produzindo uma força externa sobre o projétil, fazendo com que o objeto seja impelido para frente. Porém, a Antiperistasis seria um mecanismo imperfeito, produzindo uma força contrária ao movimento também, freando o projétil gradualmente. Outro aspecto limitante e que diminuiria o movimento do projétil é a resistência sofrida por ele em função do seu movimento ser “não natural” (esse conceito será discutido em seguida). Assim, como diria Aristóteles, a antiperistasis do lançamento de um projétil é uma espécie de reação oposta à perturbação do ar no entorno do projétil e do movimento ser não natural.

Como se vê, a explicação da Antiperistasis envolve uma série de argumentos e hipóteses que serão elucidados a partir de agora. Começa-se explicando algumas hipóteses cosmovisivas assumidas por Aristóteles que não dizem respeito diretamente ao lançamento de projéteis, mas têm implicações na sua explicação do fenômeno. A epistemologia da

⁹ Antiperistasis é um termo que se origina do grego e significa "resistência oposta" ou "contra ação". O sentido não deve ser confundido com a "ação e reação" na acepção da teoria newtoniana, como se depreende da argumentação no texto.

Ciência grega à época de Aristóteles era baseada principalmente na observação dos fenômenos. Platão (427-347 a.C) foi o mestre de Aristóteles e acreditava que experimentos e observação são elementos superficiais e enganosos, pois dependem dos sentidos humanos. O mundo sensível seria apenas uma imitação imperfeita do mundo real, que seria o mundo das formas eternas e perfeitas (Nodari, 2004, p. 362). O próprio Aristóteles não via os experimentos como necessários. Seu raciocínio é embasado no seguinte argumento: as coisas materiais são perecíveis, de forma que qualquer demonstração nelas embasadas é efêmera e não universal, já que vale apenas em um intervalo de tempo e sob determinadas condições (Fix, 2019, p. 551). Assim, uma hipótese cosmovisiva assumida por Aristóteles é a de que *o conhecimento verdadeiro é adquirido por meio da razão e da observação*. Essa é uma das bases sobre as quais sua explicação do movimento de projéteis se assenta. Muitos outros elementos, no entanto, são evocados, todos vinculados com o sistema de mundo concebido por Aristóteles, que é muito geral.

A construção do Universo aristotélico precisou satisfazer questionamentos em aberto sobre a organização, extensão e composição do espaço. Sobre a organização, Aristóteles fazia a hipótese simultaneamente cosmovisiva e ontológica de que *o cosmos é hierarquicamente estruturado (cosmovisiva) a partir do seu centro, onde se encontraria a Terra (ontológica)*. Essa hipótese se conecta à cosmovisão de Aristóteles sobre a existência de dois mundos: o sublunar - imperfeito, corruptível, feito dos elementos terra, ar, água e fogo - e o supralunar - perfeito, eterno, feito de um quinto elemento denominado éter. Essa visão é corroborada pela observação direta, que evidenciava a regularidade dos movimentos celestes. Qualquer imperfeição nesse sistema (como o súbito cruzar de um meteorito) era explicada por Aristóteles e seus seguidores por movimentos passageiros de matéria na zona de transição entre a região sublunar e supralunar (Cohen, 1988, p.33).

Já as conjecturas sobre extensão e composição do espaço são associadas e implicam a hipótese de que *o vácuo não existe e que o Universo é finito*. Para Aristóteles, o espaço em si só faz sentido com a existência de matéria que o preenche. A ideia de vácuo como a existência do nada é uma contradição lógica. Cunha-se assim a ideia de que a natureza tem “horror ao vácuo” e muitos fenômenos passam a ser explicados por meio desse princípio (Kuhn, 1990, p.100). A impossibilidade do vácuo, por sua vez, leva naturalmente à hipótese de que o Universo é finito: se todo espaço existente é preenchido, ele deve ser finito, já que seria absurda a existência de uma quantidade infinita de matéria. Outro argumento favorável à finitude do espaço é a hipótese anterior, segundo a qual a Terra é o centro do universo. Ora, se o universo é infinito, então não teria centro, o que é uma contradição. Como último argumento, pode-se levar em conta o movimento das

estrelas: se a extensão do Universo fosse infinita, as estrelas – localizadas na “fronteira” do Universo, na chamada “casca de estrelas” - precisariam de uma velocidade infinita para executar sua rotação em torno da Terra, o que novamente é um absurdo (Matthen; Hankinson, 1993, p. 418). Em última análise, o fato de o Universo ser finito implica a impossibilidade de movimentos infinitos. Assim, tem-se a explicação do porquê o ar se desloca em torno do projétil, aplicando nele, nesse processo, uma força no sentido do movimento. Isso ocorre para evitar a formação do vácuo na região em que o ar fica rarefeito.

Hoje se entende que não é necessária a presença de força para haver o movimento, mas isso não era assim na época de Aristóteles. Ele imagina que, sem a força do ar propelindo o projétil, ele pararia instantaneamente (Campos; Ricardo, 2012, p. 7). O movimento implicaria o contato permanente com um agente motor (o próprio ar). Em sua concepção, o movimento de ascensão do projétil ocorria em linha reta e era chamado de *violento*, em oposição ao movimento *natural* de queda em direção ao centro da Terra (Lang, 1998, p. 208-215). Sua hipótese sobre o movimento violento era a seguinte: *o movimento violento só é possível graças à presença de uma força externa. A velocidade desse movimento pode ser representada didaticamente como diretamente proporcional à força externa e inversamente proporcional à força de resistência* (Peduzzi, 2008, p. 39). Nessa representação, de forma compatível com o que foi apresentado até aqui, a velocidade é nula se a força externa é zero e tende ao infinito se a resistência diminui indefinidamente. Assim, não é possível um movimento violento sem resistência, pois isso significaria velocidade infinita. Assim, a hipótese mencionada é simultaneamente ontológica (afirma a existência de força externa) e representacional (descreve a dinâmica do movimento pela proporcionalidade mencionada¹⁰).

As controvérsias sobre as causas do movimento foram e permaneceram fontes de debates por muitos séculos. No caso do movimento violento, a força externa fazia o papel de *causa eficiente*, isto é, a força externa seria o agente que produz a mudança de posição sendo observada. Mas e o movimento natural em direção ao centro da Terra? Esse teria uma *causa finalística*, que está relacionada com o “objetivo” ou finalidade do corpo como causa do movimento (Reale, 2001). Essa é uma hipótese central na física aristotélica, em que basicamente se afirma que *a matéria possui uma “força inata” (ontológica) que leva o corpo a se mover em direção ao seu “lugar natural” (cosmovisiva) no Universo*. Assim, após parar o movimento violento, o projétil cairia em linha reta em direção ao centro da Terra porque ali é *seu lugar natural*. Toda a matéria teria a tendência a se mover até seu lugar

10 Aristóteles não escrevia equações. Ele usava uma Matemática nova à sua época, chamada teoria das razões e proporções (Martins, 2021).

natural na hierarquia do universo, de acordo com seu “peso”. Assim, as pedras, por serem mais pesadas que o ar, cairiam em direção ao centro da Terra porque ali é seu lugar natural. O ar subiria porque assim se preserva a ordem do Universo. Nesse sentido, Aristóteles atribui ao corpo uma espécie de vontade ou ânsia de atingir seu objetivo; uma força inata à matéria, dentro do corpo, capaz de induzir o próprio movimento. A queda do projétil em direção ao centro da Terra seria com velocidade crescente pois, quanto mais próximo do centro da Terra, mais o projétil “anseia” em chegar lá, no seu lugar natural, aumentando assim sua velocidade (Koyré, 1982, p.14). Essa velocidade seria evidentemente autolimitada quando o corpo estivesse chegando no seu destino. Segundo Koyré (1980, p. 10), enquanto o movimento natural tem destino certo e o movimento violento tem fim determinado, existe outra classe de movimento que tem uma característica especial. Esse seria o movimento circular uniforme, o único movimento que pode perdurar indefinidamente no universo. Essa afirmação é uma hipótese derivada a partir do paradigma platônico, que será discutido oportunamente.

Simon e Rezende (2018) argumentam que o movimento era, para Aristóteles, uma mudança de “alguma coisa para outra coisa”. No caso do projétil, o movimento violento não é um *estado* de movimento, mas sim uma transição entre um movimento não natural para um movimento natural. Essa mudança produz a ação concreta no corpo de diminuir sua velocidade. Por isso, uma hipótese representacional sobre o lançamento de projéteis é que *a resistência ao movimento violento se dá no sentido contrário ao movimento do projétil*. Assim, pode-se entender a resistência como bifatorial: ela vem do ar, já que o mecanismo da Antiperistasis é imperfeito, e do fato que o corpo executa um movimento não natural. O surgimento dessa resistência ao movimento não natural ocorre também na explicação da lei da alavanca, que é importante para compreender as origens do conceito de trabalho virtual, presente nos fundamentos da Mecânica Analítica. Os detalhes da explicação aristotélica para o equilíbrio da alavanca serão elucidados mais adiante, porém, Aristóteles observou que a mesma lei de proporcionalidade entre velocidade, força externa e resistência do meio são aplicáveis nessa situação sob o argumento de que a trajetória circular (e portanto antinatural) executada por corpos em uma alavanca provoca uma reação de resistência da natureza ao movimento. Em última análise, tal resistência produziria o equilíbrio na alavanca.

Para finalizar a descrição do movimento de projéteis, deixa-se claro a última hipótese representacional, que é a de que *o movimento tem duas partes: uma logo após o lançamento (movimento violento), em que o projétil se desloca desacelerado em linha reta, e*

outra após o mesmo perder toda sua velocidade, quando ele cai também em linha reta (movimento natural), porém agora acelerado, até atingir seu lugar natural.

Na Figura 2.2.1.1, exibe-se um quadro sintetizando as hipóteses consideradas, segundo a nossa interpretação, basilares na construção de Antiperistasis (parte inferior). Na parte superior da figura, destacam-se os elementos contextuais que levaram a cada uma das hipóteses, cujas naturezas (cosmóvisivas, ontológicas ou representacionais) se sobrepõem mutuamente em vários casos. No canto inferior direito, destaca-se o evento sendo descrito: o movimento de um projétil. Destaca-se que a reconstrução do episódio histórico que culminou com a formulação da noção de Antiperistasis não é a única possível, tampouco abrange todas as hipóteses ou elementos contextuais que contribuíram nesse desenvolvimento. A análise apresentada reflete a interpretação pessoal deste autor sobre as fontes consultadas e sobre o período descrito. Por mais que tenha sido feito esforço no sentido de mitigar eventuais vieses, possivelmente eles se refletiram na interpretação dos materiais e nas conclusões obtidas.

Pelo que foi apresentado, vê-se que todas as hipóteses consideradas básicas relacionadas à construção da noção de Antiperistasis excedem o conteúdo empírico, isto é, vão além dos sentidos. Quanto mais à esquerda do diagrama, mais abrangentes são as hipóteses; quanto mais à direita, mais específicas e voltadas ao fenômeno. Juntas, elas formam uma cadeia interligada de relações a partir das quais se pode fazer deduções sobre os eventos em estudo. Ainda, a representação na Figura 2.2.1.1 evidencia como elementos contextuais podem suscitar a formulação de hipóteses de diferentes naturezas. Por exemplo, a discussão sobre as causas do movimento (elemento contextual) é a semente de hipóteses representacionais e ontológicas. Também se destaca como uma hipótese pode ter diferentes naturezas, por exemplo a hipótese da força inata: a hipótese de sua existência é uma afirmação de cunho ontológico, enquanto sua finalidade (chegar ao “lugar natural”) tem feição cosmóvisiva. Cabe destacar, ainda, que existe certa plasticidade com relação a própria classificação das hipóteses. Nesse ponto, reforça-se a noção de que a reconstrução alcançada é apenas *uma* dentre as possíveis, já que, provavelmente, outro pesquisador teria formulado uma construção diferente do episódio histórico.

Outro ponto importante a ser destacado é que hipóteses podem ser interpretadas de forma distinta dependendo das concepções filosóficas sobre a realidade dos cientistas que as concebem, sejam elas realistas, pragmáticas ou antirrealistas. Por exemplo, um realista diria que o modelo cosmológico de Aristóteles é uma descrição real e precisa da forma com os corpos no universo interagem (Aristóteles era um realista); já um pragmatista poderia argumentar que o modelo é útil porque descreve o movimento dos planetas com suficiente

precisão, além de uma boa descrição qualitativa dos fenômenos sublunares, porém não faria juízo de valor sobre sua natureza ontológica, ou seja, não é relevante para ele se a Terra é o centro do Universo ou não. Por fim, um antirrealista poderia dizer que o modelo cosmológico serve apenas como instrumento matemático que auxilia ou permite a compreensão dos fenômenos, porém não corresponde necessariamente à realidade, tratando-se provavelmente de ficções (essa seria a descrição de Platão).

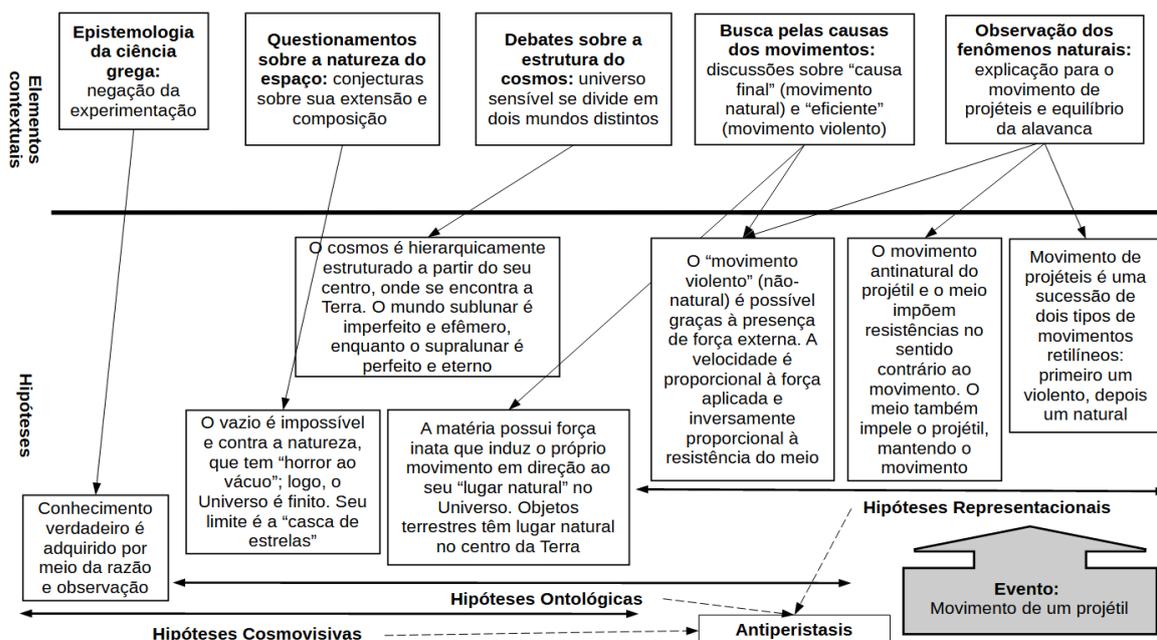


Figura 2.2.1.1: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção da noção de Antiperistasis.

Uma dificuldade da utilização da metodologia de Lima e Heidemann (2023) é a complexidade da identificação das hipóteses imbricadas nas teorias. Isso porque, frequentemente, elas não apareceram de forma explícita como aqui destacado. Essa não é, no entanto, uma característica exclusiva da construção aristotélica, mas sim da Ciência como um todo (Matthews, 1992; McComas et al., 1998; Gil-Perez et al., 2001; Lederman, 2006). Esse aspecto também está presente nos outros episódios históricos apresentados na Seção 5.2 do Estudo 1.

O referencial teórico-metodológico para análise dos episódios históricos centrado no conceito de hipótese de Lima e Heidemann (2023) foi usado neste trabalho como uma representação da construção da disciplina da Mecânica. Essa reconstrução é produto do Estudo 1, apresentado no Capítulo 5.

3 ESTUDOS ANTERIORES

Este trabalho é realizado no contexto de uma disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura. Conforme explicado, planeja-se reestruturar a disciplina, incorporando elementos da história da ciência, com ênfase nas hipóteses fundamentais da Mecânica, integrando esses elementos às discussões do curso, com vias a fomentar a vigilância epistemológica na transposição didática pelos futuros professores. Por isso, a elucidação de aplicações específicas da TAD, especialmente na formação de professores, é considerada essencial e será abordada na próxima seção.

Ainda, embora a ênfase nas hipóteses basilares represente uma novidade na abordagem, o uso de perspectivas históricas já é amplamente discutido na literatura. Portanto, outra seção deste capítulo explora propostas para o uso da história da ciência como apoio ao ensino, com enfoque na identificação dos obstáculos enfrentados pelos futuros professores para a transposição didática desse tipo de abordagem, essencial para a análise da estrutura hipotética do conhecimento.

3.1 FORMAÇÃO DE PROFESSORES NA TAD

A formação docente, assim como qualquer atividade humana na perspectiva da TAD, pode ser descrita em termos de praxeologias. Seguindo a proposta de Cirade (2006), o problema da formação de professores pode ser colocado em termos das praxeologias a serem ensinadas, praxeologias para o ensino e praxeologias da profissão: i) as praxeologias a serem ensinadas são identificadas com os saberes que constam nos currículos escolares; ii) as praxeologias para o ensino englobam as praxeologias a serem ensinadas, acrescentando o conhecimento necessário para delimitar, interpretar, relacionar e explicitar a *razão de ser* do conhecimento a ser ensinado e para conceber, construir e realizar gestos didáticos a eles relacionados; iii) as praxeologias da profissão docente se inserem em um conjunto mais amplo de praxeologias, que engloba as duas anteriores, contendo conhecimentos orientados à difusão social das praxeologias dos saberes, assim como diversos outros elementos especificamente relacionados com o exercício da profissão docente.

Na TAD, entende-se que praxeologias são geradas a partir das tentativas de respostas a questões (Chevallard, 2013). Depreende-se disso que as questões que geram as praxeologias a serem ensinadas têm impacto sucessivo nas praxeologias para o ensino e

nas praxeologias da profissão de professor. Neste trabalho, conforme será elucidado no Estudo 3, desenvolve-se a praxeologia a ser ensinada e a praxeologia para o ensino, já que elas compõem grande parte da praxeologia da profissão docente. De fato, a praxeologia da profissão tem escopo mais amplo, envolvendo conhecimentos que se adquirem apenas com a experiência direta com a sala de aula e com o passar do tempo, por exemplo. Mas como desenvolver tais praxeologias no contexto de formação de professores?

Um dispositivo instrucional que coloca o estudo de questões pertinentes à formação docente explicitamente no âmago da formação de professores é o chamado Percurso de Estudo e Pesquisa – Formação de Professores (PEP-FP). Inicialmente proposto por Sierra (2006) na formação inicial de professores, esse dispositivo segue sendo usado e aperfeiçoado, tendo ganhado popularidade no âmbito da formação de professores, principalmente de Matemática (Barquero; Romo-Vázquez, 2022). Por meio dos PEP-FP, busca-se familiarizar os futuros docentes com a metodologia didática dos Percurso de Estudo e Pesquisa (PEP), que são atividades investigativas voltadas à obtenção de respostas a questões iniciadas por uma questão geradora. Em um PEP, não se tem como objetivo explicitamente ensinar um conteúdo ou outro, mas sim responder à questão geradora inicialmente formulada. Idealmente, o professor tem um papel de guia do processo, intervindo principalmente quando a investigação se aproxima de “becos sem saídas”, ou requer conceitos que estão além da capacidade momentânea dos estudantes (Chevallard, 2017). Entretanto, a literatura mostra que professores em formação que experienciaram um PEP-FP tiveram dificuldade de implementar os PEP em sua prática docente, tendendo a retornar ao ensino transmissivo tradicional (Barquero et al., 2015).

Levando em conta tais problemas, outros pesquisadores, como Jessen (2022), propuseram metodologias didáticas alternativas voltadas a formação de professores, também buscando familiarizar os futuros docentes com os PEP. A autora identificou que, por mais que a metodologia PEP-FP seja um sólido *design*, os professores têm dificuldade em aplicá-lo por falta de suporte após a formação. Uma alternativa para superar isso seria a incorporação de elementos de outro dispositivo didático voltado à formação de professores, popularmente usado no Japão, chamado *lesson study* (Miyakawa, 2022). Esse dispositivo consiste em um processo de estudo colaborativo, no qual os professores já atuantes se reúnem para planejar, observar e analisar aulas ministradas por um dos professores do grupo. Durante a *lesson study*, os participantes focam na melhoria do ensino e na aprendizagem dos estudantes, compartilhando ideias, *feedbacks* e estratégias eficazes. Em seu estudo sobre a implementação do *lesson study* em um cursos de formação de professores de Matemática intitulado “*Math in Change*”, Jessen (2022) esperava fomentar o

suporte mútuo demandado pelos professores em suas práticas futuras. Mesmo assim, após a implementação, apesar de resultados majoritariamente positivos durante a aplicação, a autora reconhece que “[...] *é duvidoso que os professores tenham continuado a utilizar e a desenhar os PEP após a conclusão do curso [...]*” e que “[...] *é necessária mais investigação sobre as condições e restrições de criação de mudanças mais sustentáveis*” (idem, p. 245, tradução nossa).

Os trabalhos acima citados são exemplos de instrumentos didáticos frequentemente utilizados no âmbito da formação de professores tendo a TAD como referencial teórico. Apesar disso, optou-se por não utilizá-los, essencialmente por três motivos: 1) essas metodologias são adequadas para o emprego em uma disciplina de transposição didática ou em um curso extraclasse, não em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura, comprometida com o ensino dos saberes da Física; 2) seus ciclos de atividades são demasiadamente longos, podendo demorar várias semanas; 3) seu foco é primariamente direcionado ao ensino da metodologia didática dos PEP, tendo um saber/conteúdo específico como mote. Assim, por mais que os futuros professores possam estender o aprendizado por analogia a outros conteúdos, o escopo da atividade acaba sendo limitado, tanto em termos das metodologias didáticas aprendidas, quanto dos conteúdos abordados. Neste estudo, pretende-se implementar uma metodologia didática integral, capaz de permear toda a disciplina.

Em sua tese de doutorado, Ruiz-Olarría (2015) promoveu uma formação docente voltada a professores do Ensino Médio pautada pela construção coletiva de praxeologias para o ensino dos saberes da Matemática. Como resultados do estudo, concluiu-se que a construção de tal praxeologia proporciona conhecimentos necessários não apenas para delimitar, interpretar e questionar a praxeologia a ensinar, como também para delinear e gerenciar uma nova praxeologia a ensinar. Tais evidências sugerem que a metodologia munuiu os futuros professores com conhecimentos necessários para realizar a vigilância epistemológica, ao menos no âmbito da Matemática. Concordando com Cirade (2006), Ruiz-Olarría (2015, p. 131) afirma:

As praxeologias da profissão docente se constroem em grande medida como consequência das respostas às questões que podem surgir no âmbito das praxeologias matemáticas para o ensino ou mesmo no campo das praxeologias matemáticas a ensinar.

Ou seja, considera-se essencial colocar tais questões no centro do processo de formação docente e tentar respondê-las com os futuros professores. Na tese, a autora constrói as praxeologias por meio da metodologia didática PEP-FP, que, conforme

justificado, optou-se por não utilizar neste estudo. Assim, a contribuição do estudo de Ruiz-Olarría (idem) neste trabalho é primariamente a proposição de que a construção explícita e coletiva de praxeologias pode auxiliar os professores a questionar o conhecimento a ser ensinado (praxeologia a ser ensinada), fomentando a formação de conhecimentos necessários para o ensino (praxeologia para o ensino) pautado pela vigilância epistemológica. Essa concepção de construção coletiva dos elementos praxeológicos já é empregada no Estudo 2 (Capítulo 6), mas é desenvolvida em nível mais amplo no Estudo 3 (Capítulo 7).

O primeiro passo na construção de uma praxeologia a ser ensinada é o questionamento do saber a ser ensinado, isto é, dos saberes presentes nos currículos. Nesse caso, busca-se determinar uma razão de ser alternativa à praxeologia dominante, mais alinhada com a proposta defendida neste estudo, sobre a importância do papel das hipóteses basilares do conhecimento científico no ensino de Física. O questionamento da praxeologia a ser ensinada suscitará a proposição de respostas alternativas, que por sua vez levantarão novas questões. As sucessivas tentativas de responder às questões levantadas nesse processo acaba por gerar uma praxeologia a ser ensinada alternativa. Ao final, cristalizam-se os elementos que respondem à pergunta crucial: *o que (os professores devem) estudar?* Em outras palavras, forma-se o Modelo Epistemológico de Referência (MER) da praxeologia a ser ensinada. O MER também é fundamental no delineamento da metodologia didática que guiará o processo de formação dos professores. Ou seja, por meio dele se responde à questão: *como (os professores devem) estudar?* Os dispositivos que respondem a essa questão, permitindo uma análise praxeológica aprofundada das organizações didáticas, são os Modelos Didáticos de Referência (MDR).

No Estudo 2, constrói-se um MER e um MDR provisórios sobre a teoria da queda dos graves com base em questões delineadas para destacar elementos da praxeologia a ser ensinada e para o ensino. No Estudo 3, seguindo essa mesma proposta, mas levando em consideração os resultados do Estudo 2, constroem-se um MER e MDR mais amplos, voltados à elucidação de mais elementos praxeológicos da Mecânica Clássica.

3.2 USO DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES

O uso de história da ciência já é entendido como uma abordagem relevante em aulas de ciências há cerca de 30 anos (Matthews, 1992). A compreensão de que esse tipo de abordagem também é útil na formação de professores de áreas científicas é amplamente reconhecida e igualmente longa. Segundo Matthews (1997, 2015), professores de ciências

em formação deveriam ter conhecimentos sobre história e filosofia da ciência porque esse conhecimento permite tornar a ciência compreensível para os estudantes, caracterizando-a como conhecimento humano sistematizado e possibilitando o desenvolvimento da criticidade e do pensamento lógico. Outro aspecto destacado pelo autor é que os professores devem não apenas compreender o conhecimento que estão ensinando, mas também as maneiras como a humanidade elabora esse conhecimento para ser apresentado aos estudantes.

Nas últimas décadas, diversos países têm se empenhado em incluir a história da ciência nos currículos de ciências, com o propósito de fomentar a alfabetização científica, reforçando a necessidade de abordar esse tópico no contexto de formação de professores. Por exemplo, há uma colaboração de vários grupos intitulada *Next Generation Science Standards* nos Estados Unidos (NGSS Lead States, 2013), há o *National Curriculum Information Center* na Coreia do Sul (MOE, 2015) e o *Eurydice* na Europa (Eurydice, 2011). No Brasil, pesquisadores têm dado especial atenção a este tópico já há bastante tempo (Peduzzi; Martins; Ferreira, 2012).

Mas o que diz a literatura sobre a inserção desse tópico em cursos de formação de professores? Em uma revisão da literatura recente, Becker, Heidemann e Lima (2024) investigaram o uso da história da Ciência no ensino de Física com o objetivo de avaliar as metodologias empregadas, os contextos de ensino (educação básica, superior ou informal) e os resultados obtidos, cobrindo o período de 2012 a 2022. A revisão, conduzida nas plataformas ERIC, SpringerLink e Wiley InterScience, identificou um total de 32 artigos, 19 focados na educação básica e 13 na superior. Dentre os artigos em nível superior, apenas seis investigam especificamente a introdução de temas de história da Ciência no contexto de formação de professores.

Nas referidas fontes, a implementação de temas de história da Ciência resultou em impactos significativos em várias dimensões do desenvolvimento pedagógico e conceitual dos futuros professores. De maneira geral, as metodologias contribuíram para o aumento do conhecimento conceitual dos professores em formação, permitindo-lhes uma compreensão mais profunda dos conceitos científicos. Além disso, a abordagem histórica também promoveu um fortalecimento das habilidades de ensino, equipando os futuros educadores com melhores estratégias pedagógicas e maior autoeficácia em sala de aula. Em alguns casos, a abordagem também foi eficaz em aprofundar o conhecimento dos professores sobre a Natureza da Ciência, contribuindo para uma visão mais crítica e informada sobre a prática científica e seu ensino. Esses resultados indicam que o uso de abordagens históricas pode ser uma ferramenta poderosa para enriquecer tanto o conhecimento teórico quanto as

habilidades práticas dos professores em formação, preparando-os para abordar o ensino de ciências de maneira mais contextualizada e envolvente.

As metodologias empregadas para integrar elementos de história da Ciência descritas nos 32 estudos compreendidos pela revisão da literatura englobaram uma variedade de abordagens e atividades. Entre elas, destacaram-se as aulas expositivas (59%), atividades em grupo (44%), atividades de leitura e escrita (34%), discussões em sala de aula (22%) e atividades experimentais (25%). Essas metodologias refletiram a diversidade de estratégias pedagógicas empregadas para integrar a história da Ciência no ensino de física. Os autores não detalharam em sua revisão da literatura quais metodologias foram empregadas especificamente no contexto de formação de professores. Para elucidar esse aspecto em maior profundidade em cursos de formação professores de ciências em geral (não apenas de Física), foi realizada uma consulta à literatura, conforme explicado a seguir.

Inicialmente foi realizado uma consulta à literatura, por meio da plataforma ERIC, que é especializada em educação. Buscou-se artigos em inglês, publicados desde 2015, que contém em seus títulos, resumos ou palavras-chave os seguintes termos em inglês: "History of Science" e "instructional strategies" ou "teaching methods" ou "curriculum development" ou "teacher education" ou "pedagogical approaches". Também aplicou-se um filtro "Preservice Teacher Education", para selecionar artigos relacionados ao contexto de professores em formação. Como resultado, foram encontrados 17 artigos. Após a leitura dos títulos e resumos, foram eliminados 10 artigos que não eram relacionados com a discussão de propostas de aplicação de tópicos de história da ciência no contexto de formação de professores de ciências (Física, Matemática, Química, etc.). Os sete artigos restantes foram lidos integralmente, fornecendo outras referências úteis para a compreensão da utilização da história da ciência no contexto educacional em geral. A seguir, apresentam-se as principais propostas de abordagem desse tópico no contexto de formação de professores, assim como o resultado de sua aplicação, quando possível.

No contexto de um curso de história da Física para professores em formação, Rutt e Mumba (2019) implementaram diversas metodologias para introduzir elementos da história da ciência no contexto do estudo, começando com leituras semanais que cobriam tanto o conteúdo histórico quanto estratégias pedagógicas para integrar a história da ciência no ensino. Após as leituras, os futuros professores participavam de discussões reflexivas *online* em pequenos grupos, seguidas de reflexões individuais para aprofundar o entendimento dos temas abordados. Além disso, realizaram projetos em grupo, como a criação de uma linha do tempo das descobertas científicas, que destacavam a evolução e a estrutura de

conhecimentos científicos. Por fim, os futuros professores compilaram uma coleção de recursos digitais e não digitais relacionados à história da ciência para uso em suas futuras aulas, e criaram um portfólio eletrônico que demonstrava sua compreensão e habilidades em planejamento didático com foco na história da ciência. Os principais benefícios incluíram um aumento na confiança dos futuros professores em integrar a história da ciência em suas aulas e uma percepção positiva sobre o valor dessa integração para melhorar o ensino de ciências. Especificamente, foi reconhecido o potencial da história da ciência para humanizar a Ciência, tornando-a mais acessível e envolvente para os estudantes, além de ajudar a ilustrar a evolução das ideias científicas e a natureza colaborativa do desenvolvimento científico.

Em um curso integrado de História da Ciência e Tecnologia para futuros professores de Matemática, Física e Ciências da Computação, Bevez e Dmytrienko (2020) utilizaram diversas estratégias para introduzir elementos da história da ciência no currículo de formação docente. Entre as metodologias adotadas, destacam-se os seminários temáticos, nos quais os estudantes discutiam descobertas e invenções científicas (p. ex., relógio de Huygens), associando com suas implicações históricas, além de resolver problemas históricos ligados às suas áreas de estudo (p. ex., teoria da artilharia de Tartaglia). Os futuros professores também realizaram tarefas individuais, como pesquisas e apresentações sobre invenções e descobertas tecnológicas, e foram desafiados a planejar aulas e atividades extracurriculares que integrassem material histórico, conectando teorias e práticas pedagógicas com o desenvolvimento científico ao longo do tempo. Esses métodos contribuíram para preparar os futuros docentes para integrar a história da ciência em suas práticas de ensino, reforçando a compreensão das interconexões entre ciência, tecnologia e sociedade, e promovendo uma visão mais abrangente e contextualizada do conhecimento científico.

Pekdağ e Azizoğlu (2020) usaram uma abordagem histórica para ensinar conceitos sobre o átomo em um curso de formação de professores de química, concluindo que o uso da história da ciência aumentou significativamente o interesse e o desempenho dos futuros professores no conteúdo. A abordagem envolveu a utilização de quatro fontes de interesse situacional: (1) Novidade, introduzindo materiais inéditos, como biografias de cientistas e animações de experimentos históricos, para captar e manter a atenção dos alunos; (2) Autonomia, permitindo leituras individuais de textos históricos, promovendo a independência e reflexão no aprendizado; (3) Envolvimento Social, através de discussões em grupo que incentivam a interação e o pensamento colaborativo; e (4) Aquisição de Conhecimento, utilizando materiais ricos em conteúdo histórico e animações para aprofundar o

entendimento dos conceitos científicos. Além de aumentar os interesse dos estudantes em tópicos científicos, a abordagem auxiliou os estudantes a ver o empreendimento científico como mais filosófico, social e humano.

Em um estudo que combinava a aprendizagem baseada em problemas, Dogan (2017) introduziu a história da ciência como contexto histórico e filosófico para os problemas que futuros professores de ciências precisavam resolver, ilustrando a evolução dos conceitos científicos sob a influência de fatores culturais, filosóficos e tecnológicos. Os futuros professores desenvolveram planos de aula que utilizaram cenários históricos como base para as atividades. Segundo o autor, essa abordagem aprofundou a compreensão da Natureza da Ciência, oferecendo aos professores em formação uma base sólida para ensinar esses conceitos em suas futuras salas de aula.

Em um artigo recente, Souza, Máximo-Pereira e Lourenço (2024) defenderam que os mapas conceituais são ferramentas eficazes para inserir tópicos de história da ciência na formação de professores de Física, pois permitem visualizar a evolução histórica dos conceitos científicos de forma hierárquica, facilitando a compreensão das interconexões entre ideias e a transmissão desse conhecimento de maneira organizada. Segundo os autores, os mapas fomentam uma visão mais estruturada e integrada da ciência por parte dos futuros professores.

No contexto de um curso intitulado "History of Science for Teachers", Park et al. (2023) integraram a história da ciência na formação dos professores de Física da Coréia do Sul. A ênfase dessa integração foi o estudo do desenvolvimento conceitual e sociocultural da ciência ao longo de diferentes períodos históricos e regiões, o que permitiu aos futuros professores compreender a evolução das ideias científicas e o impacto do contexto sociocultural na construção da Ciência. Outra estratégia instrucional bastante usada foi o microensino, onde os professores desenvolviam e apresentaram unidades de ensino que incorporavam história da Ciência para seus colegas, simulando aulas e recebendo *feedback*. Os autores concluem que a metodologia amplia o conhecimento pedagógico dos futuros docentes, ajudando-os a entender as complexidades do ensino de ciências e a enriquecer suas práticas com uma perspectiva histórica.

Segundo Güler e Ünal (2021), o uso de episódios históricos na forma de 'histórias de ciência' pode melhorar o desempenho acadêmico e a motivação dos futuros professores em cursos de Física universitários. As referidas histórias são narrativas curtas que apresentam a vida de um cientista, caracterizam a natureza da ciência, demonstram qualidades científicas e oferecem aos alunos uma perspectiva histórica do assunto sendo ilustrado. O estudo comparou grupos que utilizaram ou não essa abordagem no ensino da queda livre,

constatando que os alunos expostos às histórias tiveram um desempenho acadêmico superior. Os autores concluem que a metodologia é uma estratégia eficaz para melhorar a compreensão da Física em nível superior.

Outras estratégias comumente utilizadas para ensinar por meio de história da ciência no contexto do Ensino Médio, mas que podem ser adaptadas ao contexto da educação de professores são as abordagens Recorrente (p. ex., Rudge e Howe, 2004), Narrativa (p. ex., Isabelle, 2007) e Argumentativa (p. ex., Clary e Wandersee, 2013). A abordagem Recorrente é focada na elucidação da evolução de um conceito científico ao longo do tempo, destacando como o entendimento científico se desenvolve e refina. Já a abordagem Narrativa (*storyline*) usa histórias para engajar os estudantes no estudo de um evento histórico específico, apresentando o desenvolvimento científico de maneira cativante. Por fim, na abordagem Argumentativa, busca-se identificar uma controvérsia histórica e desenvolver uma atividade que permita aos estudantes entender e defender uma posição sobre o tema.

Até aqui foram narradas as principais abordagens e estratégias para a introdução de elementos de história da ciência no contexto de formação de professores encontradas na literatura recente. Quais os principais obstáculos associados à implementação dessas mesmas práticas na transposição didática para o Ensino Médio?

Höttecke e Silva (2011) e Henke e Höttecke (2015) identificaram uma lista de obstáculos para a introdução de história da ciência no contexto do ensino médio, dentre eles: materiais curriculares insuficientes, falta de preparação para conduzir discussões em sala de aula sobre história, expectativas dos alunos que divergem do estudo de história na aula de ciências, falta de coerência com os padrões curriculares e dúvidas dos colegas sobre o valor do esforço para ensinar história da ciência. Em uma pesquisa realizada com professores de Física em serviço, Leone e Rinaudo (2020) mostram que um fator limitante comumente evocado é a complexidade intrínseca envolvida na análise de episódios históricos. Os professores relatam que sentem não ter sido suficientemente preparados para isso durante seus estudos de graduação e pós-graduação, sentindo-se pouco habilitados para abordar temas de natureza histórica. Em outra pesquisa com professores de Física em serviço, mas que realizaram um curso de desenvolvimento profissional focado em elementos de história da ciência, Winrich e Garik (2021) reportaram que os professores se queixaram principalmente da: falta de tempo; ausência de materiais didáticos com conteúdo histórico à disposição; complexidade dos textos históricos, em sua maioria inadequados ao nível médio. Já Park *et al.* (2023) analisaram o trabalho colaborativo de professores de ciências em formação na preparação de planos de aula pautados por elementos de história

da ciência. Os principais obstáculos relatados incluíram: dificuldade em encontrar e adaptar materiais históricos adequados ao contexto educacional, o desafio de ensinar tópicos sem respostas definitivas (p. ex., controvérsias históricas), equilibrar o conteúdo científico com o histórico nas aulas e promover a empatia histórica nos alunos.

Assim, pode-se dizer que existe uma variedade considerável de propostas e métodos para a inserção de história da Ciência no contexto de formação de professores. Dentre eles, destacam-se:

- Estudo por meio de materiais didáticos ricamente preparados, para facilitar a apreensão de conhecimentos sobre episódios históricos pelos estudantes;
- Representação de eventos históricos por meio de linhas do tempo ou mapas conceituais;
- Simulação de aulas em microunidades de ensino pautadas por episódios da história da Ciência, com *feedback* dos colegas;
- Leituras semanais, de natureza histórica, cobrindo tópicos discutidos em aulas;
- Uso de histórias curtas, de cunho biográfico, centradas na vida de um cientista;
- Estímulo à autonomia dos estudantes para fazerem suas próprias buscas e reflexões sobre episódios históricos;
- Realização de seminários temáticos, com ênfase na apresentação de descobertas/invenções científicas, associando com suas implicações históricas, assim como a solução de problemas relacionados.
- Preparação de aulas e seminários sobre temas de história da ciência.
- Fomento de discussões por meio de episódios históricos controversos;
- Criação de um repositório online, na forma de um portfólio, contendo materiais produzidos pelos estudantes. Os materiais são testemunhos públicos que refletem a compreensão sobre os episódios históricos, promovendo aprendizado coletivo;
- Estímulo de discussões em grupo sobre eventos históricos para instigar o pensamento colaborativo e crítico;
- Ênfase no desenvolvimento sociocultural da ciência ao longo de diferentes períodos históricos e regiões geográficas.
- Confecção de planos de aula guiados pelo pano de fundo de um episódio histórico específico.

Algumas das estratégias acima listadas são empregadas no contexto desta pesquisa, como será discutido na Seção 6.2, onde se constrói o MER e MDR provisórios para a disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura.

Evidenciou-se que a utilização da história da ciência no contexto de formação de professores traz diversos benefícios significativos. Ela auxilia na compreensão da Natureza da Ciência e na criação de uma base sólida em Física, além de contribuir para o aumento do desempenho em provas. Ao fornecer um contexto histórico e filosófico para o conhecimento, a história da ciência tem o potencial de humanizar a ciência, ilustrando o caráter coletivo do saber científico e explicitando o processo de construção do conhecimento. Ademais, essa abordagem aumentou o interesse dos futuros professores pelo conteúdo e proporcionou a obtenção de uma concepção mais integrada e organizada dos conhecimentos. Esses resultados corroboram os achados da revisão da literatura conduzida por Becker, Heidemann e Lima (2024).

Apesar das vantagens, a implementação de abordagens que utilizam a história da ciência no Ensino Médio enfrenta vários obstáculos significativos. A falta de materiais didáticos adequados, muitas vezes inadequados ao nível de compreensão dos estudantes do ensino médio, é um desafio frequente, agravado pela formação prévia insuficiente dos professores. Além disso, há uma incompatibilidade entre a proposta e os currículos atuais, o que resulta em resistências institucionais. A complexidade intrínseca da análise e transposição de um episódio histórico também torna essa abordagem desafiadora. A falta de tempo para abordar esses conteúdos em sala de aula, aliada ao fato de que muitos estudantes não gostam de temas de história em aulas de ciência, acrescenta dificuldades adicionais. Finalmente, saber dosar o conteúdo científico com o histórico nas aulas é outro obstáculo significativo a ser superado.

Um resultado indireto desta revisão da literatura, que reforça a relevância do presente trabalho na área de Ensino de Física, é a ausência de referências que apresentem propostas abrangentes de integração de elementos da história da ciência em uma disciplina como Mecânica Clássica para a Licenciatura. Nesse sentido, este trabalho preenche uma lacuna ao fornecer subsídios teóricos que dão suporte ao ensino de conteúdos desde a física aristotélica até o formalismo lagrangiano, permeando de maneira significativa as discussões nessa disciplina.

Assim, nesta subseção foram avaliadas as potencialidades do uso de história da Ciência no contexto de formação de professores, as metodologias mais empregadas atualmente, bem como as dificuldades que os futuros professores enfrentam ao levar essa abordagem para o Ensino Médio. Esses conhecimentos são levados em conta no processo de reestruturação da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura conduzidos neste trabalho.

No capítulo seguinte, apresenta-se o delineamento metodológico desta pesquisa.

4 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

Neste capítulo, tem-se como objetivo elucidar o encadeamento lógico dos estudos conduzidos neste trabalho. Por conta de suas particularidades, as metodologias de pesquisa empregadas em cada estudo são descritas nos capítulos específicos de cada estudo.

Na introdução, expôs-se que a pesquisa tem como objetivo geral:

Proporcionar o exercício da vigilância epistemológica por parte de futuros professores de Física sobre temas da Mecânica Clássica a partir da compreensão das hipóteses assumidas na teorização desse campo científico.

Os primeiros passos para alcançar o objetivo geral enunciado consistiram em identificar e analisar as principais hipóteses mobilizadas por cientistas em episódios relevantes da construção da MC, visando identificar como esses elementos podem ser integrados e abordados no ensino de Física. Assim, foi realizado um estudo bibliográfico sobre a construção da Mecânica, utilizando como referencial teórico a estrutura de análise de episódios históricos centrada no conceito de hipótese, conforme proposta por Lima e Heidemann (2023). Nesse estudo, denominado Estudo 1 e apresentado no Capítulo 5, busca-se identificar episódios históricos marcantes da Mecânica em que se testemunha o nascimento de conceitos-chave e hipóteses basilares dessa área. As seguintes questões de pesquisa balizaram o Estudo 1:

QUESTÃO DE PESQUISA 1: Quais episódios históricos relevantes são adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores?

QUESTÃO DE PESQUISA 2: Quais são as principais hipóteses cosmovisivas, ontológicas e representacionais mobilizadas nos episódios históricos considerados adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores?

Os resultados do Estudo 1 foram inicialmente aplicados em uma versão reformulada da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura, que enfatizou as hipóteses basilares da MC por meio da incorporação dos episódios históricos selecionados. O objetivo foi proporcionar a familiarização do pesquisador com o contexto didático investigado, avaliar o

impacto dessa metodologia no aprendizado dos estudantes e fornecer subsídios para o Estudo 2, fundamentado em referenciais didáticos e epistemológicos da Teoria Antropológica do Didático (TAD). Especificamente, avaliou-se o impacto da explicitação das hipóteses na consciência didática dos estudantes e na promoção da vigilância epistemológica. Essa experiência aconteceu no semestre de 2022/2, tendo contado com a participação de sete licenciandos matriculados.

Com base nos resultados do Estudo 1 e na experiência didática prévia na disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura, foram propostos, usando a acepção da TAD, um Modelo Epistemológico de Referência (MER) e um Modelo Didático de Referência (MDR) provisórios para o ensino de uma praxeologia específica da MC. Uma nova versão da disciplina foi concebida, agora com o objetivo de identificar as condições e restrições que precisam ser consideradas em uma disciplina como a Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS, quando se pretende preparar futuros professores para exercerem a vigilância epistemológica na transposição das leis desse campo científico.

A praxeologia específica mencionada se refere aos conhecimentos em torno da teoria da Queda dos Graves de Galileu, escolhida por motivos que serão explicados no Capítulo 6. A efetiva implementação na disciplina dos modelos provisórios construídos se deu por meio de um segundo estudo, desta vez empírico, de natureza exploratória, denominado Estudo 2, no qual se buscou identificar as condições e restrições (p. ex., facilitadores e obstáculos) que os estudantes manifestam explicita ou implicitamente ao realizarem as tarefas propostas no MER e MDR. O conjunto de condições e restrições é sempre relacionado a um sistema didático específico, neste caso, uma disciplina como a Mecânica Clássica para a Licenciatura, inserida num curso de formação de professores da UFRGS. Sistemas didáticos são definidos por três elementos: um grupo de estudantes (discentes da disciplina de MC), um grupo de professores/ instrutores (o(a) professor(a) da disciplina) e certo conhecimento que é objeto de estudo (a MC). A mudança temporal provém do fato de que os sistemas didáticos são abertos, isto é, seus elementos sofrem influência de fatores externos ao sistema.

No Estudo 2, buscou-se identificar as condições e restrições associadas ao exercício da vigilância epistemológica. A metodologia de ensino empregada está detalhada na Seção 6.2; constituindo-se num estudo de caso exploratório, a metodologia de pesquisa seguiu as orientações metodológicas de Robert Yin (2011), descritas na Seção 6.4. O estudo de caso contou com a participação de 11 estudantes e ocorreu ao longo de nove encontros do semestre letivo de 2024/1. Esse estudo gerou as principais evidências empíricas para um

estudo subsequente feito com o objetivo de aprimorar a transposição didática dos conteúdos de Mecânica Clássica. Assim, a questão de pesquisa que dirigiu o Estudo 2 foi:

QUESTÃO DE PESQUISA 3: Que condições e restrições precisam ser consideradas em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS quando se pretende preparar futuros professores para exercerem a vigilância epistemológica na transposição didática dos conceitos e teorias desse campo científico?

Considerando as condições e restrições identificadas no Estudo 2, foi delineado um referencial teórico-metodológico para o ensino de MC focado na preparação de professores para o exercício da vigilância epistemológica, por meio de um MER e um MDR pautados na noção de hipótese científica. Isso foi feito por meio de um último estudo, de natureza teórica, denominado Estudo 3, orientado pela seguinte questão de pesquisa:

QUESTÃO DE PESQUISA 4: Como devem ser os modelos epistemológico e didático de referência em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS para formação de professores com o objetivo de favorecer a vigilância epistemológica a partir da compreensão das hipóteses científicas que sustentam os conceitos e teorias abordados?

Como resultado do Estudo 3, emergiu um MER e um MDR para o ensino de MC, próprio para o contexto de formação de professores.

Resumidamente, esta pesquisa é guiada pela seguinte questão geral de pesquisa:

Como favorecer o exercício da vigilância epistemológica por parte de professores de Física na transposição didática dos conceitos e teorias da Mecânica Clássica?

Para respondê-la, foram realizados três estudos, dois de natureza teórica (Estudos 1 e 3) e um empírico (Estudo 2).

No próximo estudo apresentam-se a metodologia de pesquisa, resultados e conclusões do Estudo 1.

5 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO SOBRE AS HIPÓTESES BASILARES DA MC (ESTUDO 1)

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo bibliográfico sobre as hipóteses basilares da Mecânica Clássica de acordo com a nossa interpretação e o uso da estrutura de análise de episódios históricos proposta por Lima e Heidemann (2023) apresentada na Seção 2.2.

5.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Conforme já mencionado, tendo em vista o objetivo de organizar uma disciplina de Mecânica Clássica para licenciandos em Física e o referencial teórico adotado na investigação (Lima; Heidemann, 2023), as questões de pesquisa deste estudo são:

QUESTÃO DE PESQUISA 1: Quais episódios históricos relevantes são adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores?

QUESTÃO DE PESQUISA 2: Quais são as principais hipóteses cosmovisivas, ontológicas e representacionais mobilizadas nos episódios históricos considerados adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores?

Para responder a essas questões, assume-se que conhecimentos básicos são pré-requisitos para o entendimento de conceitos mais complexos na mecânica. Por isso, privilegiou-se o estudo de episódios relacionados com conhecimentos hoje entendidos como fundamentais no contexto do ensino de Física em nível médio ou superior. A análise de tais episódios é interessante porque neles se testemunha o nascimento de ideias e conceitos-chave na construção dos conhecimentos básicos da MC.

Mais precisamente, foi dado destaque para episódios relacionados com conceitos como os de “espaço”, “velocidade”, “tempo”, “massa”, “força”, “aceleração”, “energia”, “mecânica celeste” e “referenciais”, ou seja, foram analisados episódios vinculados com a construção de conhecimentos primários em detrimento de conhecimentos derivados desses conhecimentos basilares, como os vinculados com os conceitos de “centro de massa”, “torque”, “momento de inércia” e “momento angular”. Isso se justifica porque conhecimentos

primários são mais frequentemente acessados por professores de Física da Educação Básica em comparação com os derivados, que, quando abordados na Educação Básica, são de modo muito superficial. Os episódios analisados foram escolhidos para se explicitar a construção histórica de conceitos basilares da MC até a teoria da Relatividade. Assim, a ordenação temporal dos episódios segue a cronologia de concepção das ideias fundacionais da MC, ignorando os desenvolvimentos da Mecânica Relativística.

De acordo com Mazzotti (1992, p. 54), o pesquisador precisa de uma etapa de apropriação de elementos essenciais do conhecimento a ser estudado mesmo em revisões da literatura. Segundo a autora, quanto mais eficiente for essa etapa, mais funcional e focalizada será a etapa em que o estudo do material selecionado será efetivamente realizado. As primeiras leituras deste estudo forneceram uma visão abrangente ao pesquisador, permitindo a identificação de questões relevantes e dos estudos mais significativos para responder à questão de pesquisa, conferindo organicidade ao estudo bibliográfico a ser feito. Portanto, a metodologia de pesquisa do estudo bibliográfico teve duas etapas: a busca por referências e a análise das referências selecionadas.

Optou-se por consultar primeiramente artigos e livros mais recentes e, a partir destes, ir identificando outros citados nas respectivas bibliografias. Nessa etapa, a busca foi norteada pelos critérios de seleção anteriormente definidos, sendo realizada em revistas especializadas (p. ex., *American Philosophical Society*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, *Centaurus*, *Educação e Sociedade*, *History of Science*, *International Journal of Science Education*, *Isis*, *Journal for the History of Astronomy*, *Journal of the History of Philosophy*, *Nuncius*, *Physics Education*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Revista Brasileira de História da Ciência*, *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, *Science & Education*, *Scientiae Studia*, *Síntese – Revista de Filosofia*, *Studies in History and Philosophy of Science*, *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*, *The British Journal for the History of Science*, *The philosophical Review*, *Transversal: International Journal for the Historiography of Science*) usando os termos “história”, “espaço”, “velocidade”, “tempo”, “massa”, “força”, “aceleração”, “energia”, “mecânica celeste”, “gravitação” e “referenciais”, e no buscador Google Acadêmico utilizando os mesmos termos. A busca por livros ocorreu com base na bibliografia dos artigos encontrados e no Google Acadêmico.

Essa fase produziu uma lista significativa de referências (Aristóteles, 1955; Assis, 1998, 2008; Bacon, 1979; Baldwin, 1985; Berkeley, 2006; Boccaletti, 2001; Brown, 2016; Bull, 2018; Cajori, 1926; Capecchi, 2012, 2014, 2021; Campos; Ricardo, 2012; Carnot, 1786; Cindra, 2008; Clagett, 1964; Cohen, 1980, 1988; Cohen; Westfall, 2002; Correia, 2015;

D'Alembert, 1743; Da Silva; Martins, 2007; Da Silva; Peduzzi, 2012; Descartes, 1644, 1991; Drake, 1973, 1986; Dugas, 1988; Durand, 1941; Dutton, 1999; Évora, 1988; Ebeling, 2007; Epstein, 1979; Erlichson, 1992; Fix, 2019; Franklin, 1976; Fraser, 1985; Galilei, 1638, 1954, 1968, 1970; Gilbert, 1970; Guérout, 1934; Guicciardini, 1999; Heath, 1921; Henry, 2011; Herivel, 1960, 1965; Huygens, 1929; Kepler, 1992; Koyré, 1943, 1965, 1980, 1982; Kuhn, 1990; Lagrange, 1777, 1867, 1892; Lang, 1998; Livesey, 1985; Mach, 1883; Magnaghi; Assis, 2019; Martins, 2006, 2021; Matos, 1958; Matthew; Hankinson, 1993; Matthews, 2005, 2014; Maupertuis, 1746; McGuire; Tamny, 1983; Menn, 1990; Miller, 2009; Mumford, 2006; Naylor, 1980; Newton, 1934, 1959, 1978, 2002, 2016; Nicolle, 2011; Nodari, 2004; Ostermann; Cavalcanti, 2011; Panza; Malet, 2006; Paty, 2004; Peduzzi, 2008; Pisano, 2017; Porto, 2020; Ramati, 2001; Reale, 2001; Renn; Danerow, 2003; Rosa, 2012; Schneiders, 2001; Simon; Rezende, 2018; Toulmin, 1959; Turnbull, 1960; Vasconcelos, 2014; Wallace, 1994; Westfall, 1983, 1990, 1995; Whiteside, 1970; Wilson, 1974; Wise, 1955).

Os tópicos com os quais o pesquisador se familiarizou diziam respeito não apenas aos conceitos da Mecânica Clássica, mas também a conhecimentos sobre História e História da Ciência. Tais conhecimentos proporcionaram subsídios para a compreensão da influência de elementos contextuais nas hipóteses, segundo a conceitualização de Lima e Heidemann (2023), permitindo assim a organização e construção da disciplina. Com base nessas leituras e nos critérios anteriormente mencionados, os episódios históricos selecionados para o estudo foram aqueles em que os seguintes modelos, leis e equações foram concebidos:

- 1) A noção de Antiperistasis de Aristóteles;
- 2) O modelo de queda dos graves de Galileu;
- 3) A lei da Gravitação Universal de Newton;
- 4) As três Leis de Newton;
- 5) As equações de Euler-Lagrange.

O primeiro episódio já foi descrito na Seção 2.2, a título de exemplo da metodologia de análise de Lima e Heidemann (2023). Na seção seguinte, apresentam-se os resultados para os quatro episódios restantes.

Durante a análise dos episódios, buscou-se simultaneamente chamar a atenção sobre como os conhecimentos construídos influenciaram no desenvolvimento de outros eventos relevantes na Mecânica. Ressalta-se que este não é um estudo histórico propriamente dito, e sim uma análise de episódios históricos pautada majoritariamente por fontes secundárias, focada no objetivo de se identificar as hipóteses fundamentais de episódios históricos importantes da Mecânica para o delineamento de uma disciplina. Um

estudo histórico rigoroso demandaria formação específica do autor e uma imersão profunda em originais, tendo um escopo muito mais específico do que aqui se pretende alcançar. Não resulta deste estudo uma lista fechada das hipóteses e princípios da história da Mecânica: um empreendimento dessa natureza teria um inviável compromisso com uma quantidade incontável de autores e episódios históricos já que os resultados da MC podem ser derivados a partir de uma miríade de princípios. Por exemplo, a lei da alavanca pode ser derivada a partir das hipóteses sobre o círculo, conforme proposto por Aristóteles, ou sobre o centro de gravidade, conforme proposto por Arquimedes (Dijksterhuis, 1956; Magnaghi; Assis, 2019). Nesse caso, optou-se por trazer a concepção de Aristóteles porque ela é anterior à de Arquimedes e porque as hipóteses metafísicas sobre o círculo têm implicações mais profundas no desenvolvimento posterior da Física do que a hipótese sobre centro de gravidade.

Resulta deste estudo um retrato pontual sobre os fundamentos da MC, podendo ser usado por professores que gostariam de trazer elementos de história da ciência para suas aulas de Física de forma integrada, isto é, ao longo de todo o curso de MC. Na seção seguinte, apresenta-se o restante dos resultados do estudo bibliográfico.

5.2 RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados do estudo bibliográfico a partir do modelo de queda dos graves de Galileu. Esse episódio é basilar na Mecânica porque seus resultados permitiram a construção de outros conhecimentos fundamentais, como será discutido.

5.2.1 O modelo de queda dos graves de Galileu

Galileu Galilei (1564-1642), um italiano nascido em Pisa, foi uma figura emblemática no panorama científico porque marcou profundamente a transição do pensamento medieval para a modernidade. Galileu foi responsável por uma revolução sem precedentes na Física e na Astronomia. Através de suas observações e raciocínios perspicazes, desafiou crenças arraigadas na comunidade científica de sua época, dominada pelo pensamento escolástico¹¹. Seu trabalho não só influenciou o pensamento científico subsequente,

¹¹ A Escolástica é um movimento filosófico e teológico que se originou nas escolas monásticas e universidades da Europa medieval, entre os séculos XI e XV. Esta corrente é marcada pela tentativa de reconciliar a fé e a razão, utilizando a lógica e a filosofia, especialmente a de Aristóteles, para entender e explicar os ensinamentos da Igreja Católica. São Tomás de Aquino (1225-1274) foi um dos representantes da igreja mais proeminentes desta nova interpretação do pensamento grego (Matos, 1958).

possibilitando avanços em diversas áreas da Filosofia Natural, mas também pavimentou o caminho para o Iluminismo e a era da razão.

Nesta subseção, discute-se o modelo de queda dos graves de Galileu, que consistia em uma representação da queda de objetos próximos à superfície da Terra. Galileu referia-se aos graves como objetos sujeitos à ação da gravidade. Em sua obra "Duas Novas Ciências", ele rejeitou a noção aristotélica de que objetos mais pesados cairiam mais rápido do que os mais leves, ao propor que todos os "graves", independentemente do peso, caem à mesma velocidade em um vácuo. Para isso, ele se valeu de uma série de raciocínios e experimentos que serão abordados agora. Primeiro, é importante entender a epistemologia de Galileu sobre a Filosofia Natural.

Para o historiador da ciência Koyré (1980), Galileu foi um cientista de raiz majoritariamente racionalista, seguindo a linha platônica e pitagórica, a partir da qual se argumenta que a Matemática e os números são os instrumentos mais adequados para descrever a realidade. Essa posição difere significativamente do pensamento aristotélico, ao qual Galileu se opunha. Aristóteles acreditava que a base da Filosofia Natural era a observação e os sentidos e que a Matemática tem papel secundário, meramente auxiliar. Segundo Aristóteles, nem sempre a natureza se deixa descrever pela rigidez e a precisão de conceitos matemáticos. Os contemporâneos de Galileu partilhavam majoritariamente da visão aristotélica e entendiam que havia quantidades como "qualidade" e "forma" que são, por natureza, grandezas qualitativas, logo não podem ser descritas ou deduzidas pela razão matemática dos números. Assim, um empreendimento que tente construir uma Filosofia Matemática da natureza está condenado em sua essência (Koyré, 1943, p. 421-425). A "Nova Ciência" criada por Galileu, como sugere o título de um de seus mais importantes trabalhos, "*Discursos e Demonstrações Matemáticas em Torno de Duas Novas Ciências*", refere-se à superação da ciência aristotélica em favor de uma ciência que, sim, pode ser descrita por números e leis matemáticas. O maior exemplo disso é seu modelo de queda dos graves.

A matemática das razões e proporções, vista como uma ferramenta para a física, moldou o desenvolvimento de teorias nesse campo em diversos aspectos, desde Aristóteles até Newton (Martins, 2021). É notável que essa forma de fazer ciência tenha durado tanto tempo. Por privilegiar a noção de intervalos, o conceito de tempo instantâneo não surgiu na formulação das teorias até depois de Newton. Outro aspecto próprio dessa ferramenta é o uso de descrições comparativas. Assim, as relações entre grandezas físicas eram expressas comparativamente, em termos de proporções e razões, sem a necessidade de unidades absolutas. Um exemplo é a lei do pêndulo formulada por Galileu, que afirma que "os

períodos de oscilação de dois pêndulos de comprimentos diferentes estarão entre si como as raízes quadradas desses comprimentos.” Esse tipo de formulação, que compara diretamente uma característica física com outra por meio de uma proporção, era comum na época e permitia uma compreensão das relações entre grandezas sem o conceito de uma medida instantânea.

Provavelmente, o cientista mais admirado por Galileu foi Arquimedes (287-212 a.C.), considerado por muitos como o maior cientista da antiguidade. Os trabalhos desse pensador e de muitos outros como Platão, Aristóteles, Euclides e Ptolomeu só se disseminaram pela Europa ocidental ao final da Idade Média, principalmente em função da reconquista dos territórios europeus ocupados pelos árabes e por incursões dos cruzados no mundo oriental, em particular no Império Bizantino (Nicolle, 2011). Arquimedes se notabilizou como um importante matemático e filósofo natural pelo seu método sistemático de dedução dos conhecimentos a partir de princípios e suposições (Magnaghi; Assis, 2019). Possivelmente por conta da clareza e generalidade de seu método, ele foi creditado como o inventor da lei da alavanca¹², um dispositivo de relevância na construção da Mecânica que será alvo de discussões na Subseção 5.2.4. No entanto, a atribuição da invenção à Arquimedes é uma injustiça histórica com Aristóteles, que o precedeu. Enquanto Aristóteles justifica a lei da alavanca fazendo hipóteses relacionadas com propriedades do círculo, Arquimedes o faz a partir de hipóteses sobre um conceito então conhecido como “centro de gravidade” (Assis, 2008, p. 8).

O contexto de redescoberta dos textos clássicos foi marcado por um intenso processo de tradução dos originais gregos e cópias árabes, o que gradualmente ergueu o status do conhecimento científico possuído pela cambaleante sociedade europeia. Galileu fez parte dessa transformação cultural, conseguindo se libertar das amarras do pensamento escolástico, que se valia de elementos do pensamento aristotélico para conciliar a razão aos dogmas da cristandade (Rosa, 2012). A síntese galileana sobre a epistemologia grega, embasada principalmente no pensamento arquimediano e platônico, como discutido, indica que ele assumiu a hipótese cosmovisiva de que *demonstrações baseadas em suposições apropriadas podem gerar conhecimento tanto na Matemática quanto na Física*, isto é, têm reflexos tangíveis no mundo físico, não sendo meros construtos abstratos (Wallace, 1994, p. 239).

Até a época de Galileu, a Ciência da Mecânica descrevia essencialmente problemas de estática, que eram resolvidos principalmente com o princípio da alavanca. Galileu imaginou que o movimento pode surgir a partir da estática pelo emprego de forças

¹² É atribuída a ele a famosa frase: “Dê-me uma alavanca e um ponto de apoio e eu moverei o mundo”.

infinitesimais, desprezíveis matematicamente, porém suficientes para romper o equilíbrio. Como exemplo, ele cita uma esfera em equilíbrio no plano horizontal. Segundo ele, uma força mínima aplicada horizontalmente à esfera poderia movê-la não fosse as resistências externas e a inclinação do plano, que nunca era estritamente horizontal. Isso evidencia que Galileu tem consciência sobre as limitações de suas teorizações e que sua construção é uma idealização. Ele escreve que suas demonstrações são geralmente baseadas na suposição de que não há impedimentos externos (Galileu, 1968, p. 301-302). Outro aspecto importante que pode ser extraído do seu exemplo sobre a esfera no plano horizontal é a crença de que o corpo, uma vez movido, permaneceria em movimento indefinidamente, em uma espécie de “inércia horizontal”. Isso será discutido mais adiante.

Por volta de 1600, Galileu começa um extensivo programa experimental que o leva ao modelo de queda dos graves. A ferramenta crucial nesse empreendimento foi o pêndulo como um instrumento para medir intervalos de tempo, o que era feito com o auxílio da sincronização de batidas musicais¹³. Até então, nenhuma teoria da Filosofia Natural envolvia o tempo, simplesmente porque era impossível medi-lo com suficiente precisão. Segundo Drake (1986), Galileu foi capaz de deduzir a lei de queda dos corpos e assim resolver a trajetória de projéteis lançados horizontalmente por conta da acurácia desses instrumentos. Como explica Naylor (1980, p. 550), a evolução da teorização de Galileu sobre a queda dos graves veio em consequência de seus esforços para compreender a forma da trajetória de projéteis. De fato, os estudos militares tinham preponderância à época de Galileu. A ciência da balística era de especial interesse aos patronos renascentistas e lordes italianos, que conviviam em territórios fragmentados e controlados por soberanos endoutrinados pela obra “O príncipe”, de Maquiavel, que os tornava sedentos pela guerra.

A primeira hipótese diretamente relacionada ao fenômeno da queda dos graves assumida por Galileu foi uma que tem natureza cosmovisiva e representacional. Essa hipótese é melhor explicada pelo próprio Galileu (1638, p. 157):

Quando, portanto, observo uma pedra que cai de uma certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples do que aquele que sempre se repete da mesma maneira.

Ou seja, Galileu assume a hipótese que, por simplicidade, *corpos em queda livre são naturalmente acelerados no tempo, isto é, se v_y é a velocidade vertical e Δt o intervalo*

13 Galileu conseguiu deduzir empiricamente que o comprimento do pêndulo é proporcional a raiz do seu período de oscilação, porém ele pensava de forma equivocada que a relação valia independente da amplitude (Matthews, 2005, p. 218).

de tempo decorrido desde o repouso, então $v_y \propto \Delta t$ ¹⁴. O princípio de simplicidade na natureza é muito antigo, não sendo uma concepção cunhada por Galileu. Ele foi habilmente formulado pelo teólogo William Ockham (1285-1349), que enfatiza que a melhor explicação para os fenômenos é sempre aquela mais simples e econômica, tendo ficado esse princípio conhecido como Navalha de Ockham (Livesey, 1985). Sobre projéteis, Ockham defendia que, após um projétil ser lançado, a coisa que se move é a própria coisa movida, e não há necessidade de postular uma força adicional para explicar o movimento, pelo princípio da simplicidade. Essa ênfase na ausência de forças adicionais para explicar o movimento vinha em crítica aos pensadores pós aristotélicos que ainda exigiam a presença de força para sustentar o movimento “violento” dos projéteis. São exemplos notórios de defensores da chamada *força impressa* Hiparco (190-120 a.C.) (Franklin, 1976, p. 531) e Filóponos (490 a 570 d.C.) (Évora, 1988, p. 67). O próprio Galileu, por mais que usasse termos aristotélicos como “movimento natural” ou “movimento violento”, não postulava esse tipo de força.

Apesar de ter o pêndulo à disposição, medir intervalos de tempo para verificar a validade da expressão $v_y \propto \Delta t$ não era uma tarefa fácil. Por isso, em vez de medir tempos de queda, Galileu fez seus experimentos em planos inclinados com ranhuras, onde uma pequena esfera de bronze descia sem deslizar. Dessa forma, o tempo de descida podia ser reduzido consideravelmente, tornando-o mensurável. Mesmo assim, no entanto, o lado esquerdo da relação $v_y \propto \Delta t$ é uma velocidade instantânea, não podendo ser obtida usando intervalos de tempo que o pêndulo podia medir. Para contornar esse problema, Galileu pensou em uma forma de transformar a expressão usando uma conhecida regra à sua época, chamada Regra de Merton.

Muito antes de Galileu, no início do século XIV, os professores do *Merton College*, da Universidade de Oxford, conduziam estudos sobre cinemática buscando contrastar as predições de Aristóteles sobre o movimento violento. Seus estudos mostraram que essa fórmula não era adequada, pois não descrevia o movimento corretamente. Como resultado positivo da investigação, no entanto, emergiu a chamada Regra de Merton, que podia ser usada para entender mudanças uniformes na velocidade (não apenas mudanças uniformes no tempo). A Regra de Merton só foi corroborada de forma convincente posteriormente por Nicole d'Oresme (1325-1382), um bispo alemão, que se tornou diretor da Faculdade de Navarra, na Universidade de Paris (Clagett, 1964, p. 304). Oresme também estudou o problema da queda dos corpos, aplicando a Regra de Merton assumindo mudanças

14 É preciso destacar aqui que essa e outras hipóteses que enumeramos nesta análise são redigidas de forma anacrônica, já que Galileu, por exemplo, não usava $v_y \propto \Delta t$, e sim postulava suas relações em proposições pautadas pela teoria de razões e proporções.

uniformes na velocidade em relação ao tempo, mas não há evidências de que Galileu tenha citado seu trabalho e pode ser que suas conclusões tenham chegado indiretamente a ele (Mumford, 2006, p. 14)¹⁵.

Sem entrar em detalhes, a Regra de Merton usada por Galileu pode ser entendida, em linguagem anacrônica, da seguinte forma (Galileo, 1954, p. 173): “partindo do repouso, a distância percorrida por um corpo uniformemente acelerado em um intervalo de tempo t é a mesma percorrida por um corpo com velocidade constante dada pela média das velocidades inicial e final do corpo no mesmo intervalo de tempo”, isto é, o teorema da velocidade média, como é hoje chamado. Essencialmente, o teorema diz o seguinte:

$$\Delta y = \bar{v}_y \Delta t = \frac{v_y}{2} \Delta t . \quad (5.2.1.1)$$

Na equação 5.2.1.1, Δy é o deslocamento vertical e \bar{v}_y a velocidade média do objeto em queda, calculada pela metade da velocidade instantânea v_y ao final do intervalo, já que o objeto parte do repouso. Como $v_y \propto \Delta t$, segue imediatamente que $\Delta y \propto \Delta t^2$, isto é, *assumindo a hipótese representacional de que o movimento de queda livre obedece à Regra de Merton, Galileu conseguiu demonstrar a lei de queda dos graves como $\Delta y \propto \Delta t^2$* .

Com esse conhecimento, Galileu estava apenas a um passo de entender a trajetória de projéteis. Faltava-lhe a confirmação de uma suspeita manifestada por ele muito antes do desenvolvimento de suas pesquisas, segundo a qual um corpo em movimento horizontal permaneceria em movimento perpétuo nessa direção na ausência de resistências¹⁶. Segundo Drake (1973, p. 296), uma vez de posse da lei de queda dos graves, Galileu foi capaz de fazer experimentos para testar sua teoria. Assim, seus experimentos foram delineados a partir da admissão de uma hipótese ontológica e representacional de que o *movimento horizontal dos projéteis se conserva (inércia horizontal)*, isto é $\Delta x \propto \Delta t$, onde Δx é o deslocamento na horizontal. A natureza ontológica da hipótese reside no fato de que a afirmação indica uma característica intrínseca do movimento horizontal, isto é, ele é conservado. Com base nessa hipótese, Galileu projetou um experimento capaz de contrastá-la empiricamente.

15 Oresme fez contribuições relevantes à Filosofia Natural e à Matemática, e não protagonizou este episódio porque sua construção filosófica ainda estava fortemente atrelada à escolástica de seu tempo (Durand, 1941, p. 178). Ele acreditava, por exemplo, na divisão aristotélica entre o mundo lunar e supralunar.

16 Existe certa controvérsia com relação à interpretação da concepção de inércia horizontal para Galileu (Vasconcelos, 2014). Alguns autores argumentam que Galileu entendia “movimento horizontal” como movimento ao longo de uma superfície concêntrica com a da Terra. Essa superfície apenas pareceria horizontal, mas na verdade é uma esfera. Por isso, é comum a referência de que Galileu tinha um princípio de “inércia circular”. Neste estudo, prefere-se não tomar partido nas discussões porque elas não influem na construção que se pretende.

O experimento funcionava da seguinte forma: Galileu posicionava um plano inclinado de altura Δy sobre uma mesa e alinhava a parte mais baixa do plano com a borda da mesa. Neste ponto, colocava uma curva para defletir o movimento das esferas que caem plano abaixo na direção horizontal. Uma vez fora da mesa e do plano, as esferas viajavam até o solo como projéteis com velocidade inicial horizontal conhecida pela expressão $v_y \propto \sqrt{\Delta y}$, obtida a partir das fórmulas anteriores. A distância horizontal Δx percorrida pela esfera após abandonar o plano era medida pela marca deixada pela esfera de aço ao atingir o solo, que era coberto com um papel. Em sua montagem, a altura do plano podia ser regulada, de forma que Galileu podia comparar dois lançamentos com velocidades de razão conhecida. Outro aspecto fundamental é que, como em todos os lançamentos, o projétil caía uma mesma distância vertical até o solo, os intervalos de tempo para diferentes lançamentos eram iguais, pela sua lei de queda dos graves. Uma vez que todos os lançamentos percorrem trajetórias no mesmo tempo, se a hipótese de Galileu sobre a conservação do movimento horizontal estivesse correta, a razão entre as distâncias percorridas deve ser proporcional à razão entre as respectivas velocidades de ejeção dos projéteis. E de fato, os resultados de Galileu corroboraram sua hipótese.

Assim, Galileu sabia que o movimento horizontal se dava pela relação $\Delta x \propto \Delta t$, enquanto o vertical se dava pela relação $\Delta y \propto \Delta t^2$. A última hipótese assumida por Galileu para consolidar seu entendimento sobre a trajetória dos projéteis foi que *o movimento horizontal e o vertical do projétil são independentes entre si* (Naylor, 1980, p. 557-558). Juntando as duas últimas relações, vê-se que, de fato, a trajetória é parabólica. Estritamente falando, o experimento de Galileu mostra que o lançamento *horizontal* tem forma parabólica. O que dizer do lançamento oblíquo? Não foram necessários outros experimentos para completar a generalização, já que os experimentos de Guidobaldo, patrono e mentor de Galileu, sugeriam claramente a simetria da trajetória de lançamentos oblíquos em torno do seu ponto mais alto (Renn; Danerow, 2003, p. 10). A Figura 5.2.1.1 resume os elementos contextuais e as hipóteses assumidas na construção de explicações sobre a trajetória de um projétil.

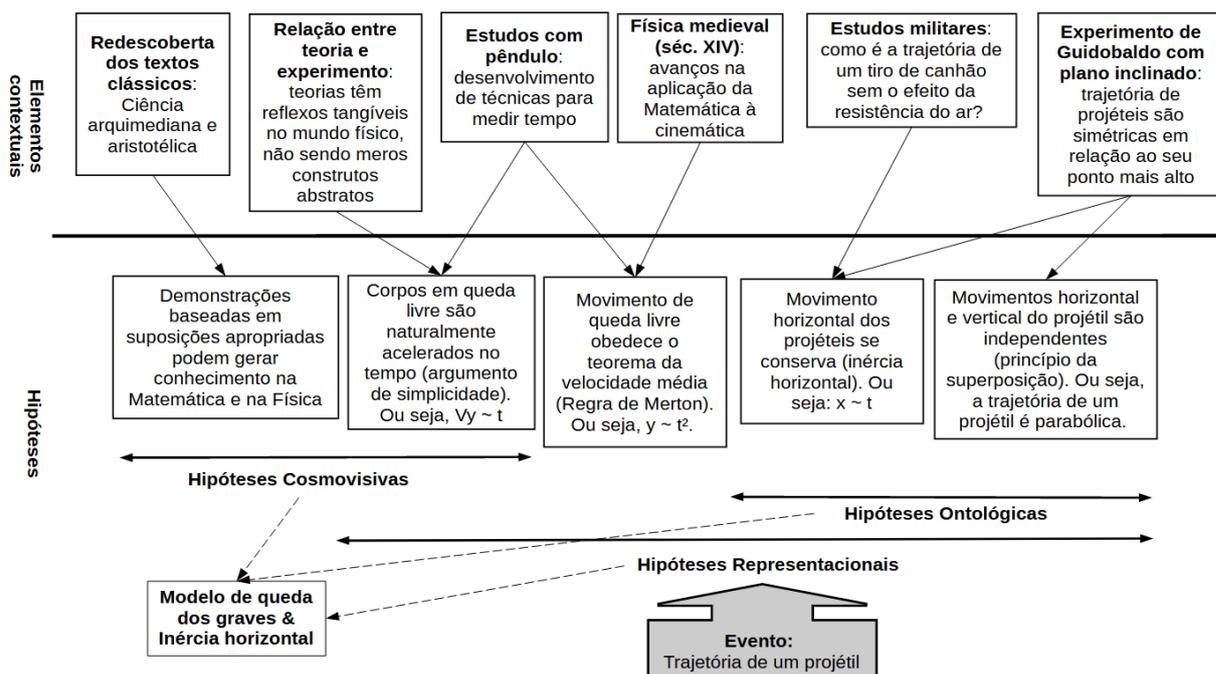


Figura 5.2.1.1: Síntese das principais hipóteses assumidas por Galileu na descrição da trajetória dos projéteis. Tal descrição utiliza essencialmente o modelo de queda dos graves e a hipótese da inércia horizontal, como destacado.

Assim, o modelo de queda dos graves de Galileu tem o mérito de produzir resultados coerentes com a realidade e ao mesmo tempo inaugurar uma “nova Ciência”, em que a Matemática tem um papel de destaque nas teorizações sobre a Filosofia Natural. Na sequência abordamos o episódio histórico que culminou com a Lei da Gravitação Universal.

5.2.2 A lei da Gravitação Universal de Newton

Formulações de leis que descrevem o fenômeno da gravidade existem desde os primórdios da Física, como discutido no episódio histórico sobre a noção de Antiperistasis. A própria palavra “gravidade” foi originada muito antes de Newton, como evidenciado pela sua origem etimológica latina “gravitâs”. Por exemplo, em sua obra *Diálogos*, Galileu usa a palavra gravidade para descrever a queda dos corpos e se pergunta sobre a sua *essência*, isto é, quais seriam suas causas (Galilei 1970, p. 302–303). Na subseção anterior, foi visto que Galileu descreveu satisfatoriamente a queda dos graves próximo à superfície da Terra. Newton, no entanto, descreveu e formulou explicações que o conduziram à lei da Gravitação Universal.

Mesmo que no Principia a teoria da Gravitação Universal seja apresentada depois das Leis de Newton, optou-se por apresentar o episódio histórico sobre gravitação antes do episódio sobre as leis de Newton porque as principais hipóteses assumidas em sua construção têm raízes na juventude de Newton, muitos antes, da escrita do Principia e da elaboração das três leis. Neste ponto, é conveniente alertar ao(à) leitor(a) que Newton é notoriamente conhecido por difundir a ideia (errônea) de que ele próprio não faz hipóteses (Da Silva; Peduzzi, 2012, p. 311). Essa noção equivocada sobre o fazer científico newtoniano ganha corpo apenas tardiamente, bem depois da primeira publicação do Principia, como será explicado. As hipóteses aqui elucidadas foram de fato concebidas por Newton, sendo fundamentais na construção de sua teoria. A seguir, analisa-se a lei da Gravitação Universal a partir de suas hipóteses basilares.

Newton (1643-1727) viveu uma época de transição entre o Renascimento e o Iluminismo e incorporou aspectos que caracterizam ambos os movimentos. Uma das características mais marcantes do Renascimento, como discutido no episódio sobre o modelo de queda dos graves de Galileu, foi a redescoberta dos textos clássicos gregos. Entretanto, muitos desses textos continham não apenas a racionalidade grega, como também elementos do pensamento oriental, como o ocultismo e o misticismo¹⁷. Por volta da época do famoso astrônomo greco-romano Ptolomeu (90-168 d.C), surge uma obra que acaba tendo profundo impacto no pensamento dos eruditos renascentistas e, por conseguinte, em Newton. Trata-se da obra *Corpus Hermeticum*, uma coleção de 17 livros, que, segundo a tradição, teriam sido escritos por uma divindade que partilha elementos do Deus grego Hermes e do egípcio Thoth (Bull, 2018). Os conhecimentos trazidos pelo livro difundiram a Alquimia e a Astrologia em todo o ocidente. Na época do Renascimento, por ser percebida como uma obra muito antiga, acabou consolidando as crenças correntes em uma *prisca theologia* ou *prisca sapientia* (Ebeling, 2007, p. 68-70). Essas crenças estão associadas com a percepção de que, em meio a todas as religiões, existe algo de verdadeiro, porém esse conhecimento foi revelado em um passado muito distante, estando atualmente perdido. Os crentes dessa ideia viam nos textos antigos as fontes mais confiáveis, pois estariam mais próximas do conhecimento revelado. Newton partilhava dessa crença. Ele buscava evidências da onipotência divina em supostas mensagens nas escrituras, e usava a geometria em sua Ciência porque entendia essa linguagem como a mais antiga, e portanto mais próxima da usada por Deus na revelação (Ramati, 2001, p. 418-422). Assim, uma hipótese cosmovisiva adotada por Newton foi a de que *a geometria é*

17 A origem dessa fusão de visões de mundo remonta ao caldo cultural gerado pelas guerras de conquista iniciadas por Alexandre, o Grande (356-323 a.C.), cujo império ficou conhecido como mundo helenístico.

a linguagem universal, pois é a linguagem de Deus. De fato, Newton via a si mesmo como um descobridor e perpetuador dessa sabedoria matemática (Guicciardini, 1999, p. 8).

Outra herança do pensamento dos antigos que teve influência nas primeiras concepções de Newton sobre as causas da gravidade é a noção de que o espaço é completamente preenchido por matéria. Como será discutido, sua concepção foi se modificando com o tempo, à medida que os estudos de Newton moldaram sua visão de mundo e suas crenças teológicas se desenvolviam. Mas ele não era o único a acreditar nisso: a crença no “universo cheio” permeava as teorias que se propunham a explicar a queda dos corpos, constituindo-se essas em teorias mecânicas da gravidade, isto é, teorias de contato. A teoria mais bem sucedida na explicação mecânica da gravidade na época de Newton - e que permaneceu com influência superior à teoria de Newton, mesmo na Inglaterra, por cerca de 50 anos após a publicação do *Principia* (Cajori, 1926, p. 348) - era a Teoria dos Vórtex, de Descartes. Resumidamente, Descartes imaginava que o espaço havia sido criado por Deus, que o teria preenchido com uma matéria dura. Todo o movimento do Universo teria sido originado a partir da rotação inicial dessa matéria dura, que gradualmente teria se esfacelado, constituindo vórtices locais. Nessa dinâmica, em função da *força centrífuga*¹⁸, que se pensava, à época de Descartes, atuar em todos os corpos que giram, as partículas maiores, mais pesadas, e as menores mais agitadas (maior movimento) tendem a descrever círculos maiores. Isso explica porque a matéria cai: quando posicionada em um ponto do vórtice sem velocidade suficiente para estar ali, a matéria circundante, dotada de velocidade compatível com a sua posição e simultaneamente impelida radialmente pela força centrífuga, toma seu lugar, empurrando-a em direção ao centro de rotação do vórtice (Descartes, 1991).

As primeiras ideias de Newton sobre a gravidade se desenvolveram durante 1664 e 1665. Em decorrência de seus estudos em Cambridge, Newton já vinha tendo contato com ideias de pensadores influentes de sua época, como o próprio Descartes. A análise de suas notas mostra que ele tinha um pensamento alinhado ao de seus contemporâneos, que compartilhavam da crença básica em um “universo cheio” e mediado por interações gravitacionais apenas pela via do contato. Assim, Newton conjecturou uma hipótese de natureza ontológica, segundo a qual *a gravidade na Terra é causada por uma corrente de éter, que se precipita do espaço em direção à Terra, impelindo os corpos para baixo. Para não se acumular, esse éter deve sair de alguma forma, porém sem atrapalhar a dinâmica descendente da matéria* (McGuire; Tamny, 1983, p. 362-363, 97r.). Segundo Westfall, (1983,

18 Força centrífuga era imaginada como a tendência dos corpos que giram em se afastar do centro de rotação. Como será discutido adiante, a força centrípeta viria a substituir esse conceito apenas mais tarde.

p. 794), apesar de Newton ter rejeitado a hipótese do éter em 1679 (antes da publicação do *Principia*), em 1719 ele voltou a evocar o éter, agora na explicação dos fenômenos luminosos. Apesar das controvérsias em torno do éter nos anos subsequentes da vida de Newton, essa hipótese teve papel crucial nos estágios iniciais da formulação da teoria da Gravitação Universal. Provavelmente os maiores frutos da hipótese do éter foram as primeiras tentativas de Newton de explicar a gravidade como uma força que decai com o quadrado da distância, como será discutido.

No período entre 1665 e 1667, Newton estava em Woolsthorpe e buscava se refugiar da peste que assolava Londres. Nessa ocasião, teria ocorrido o famoso episódio da queda da maçã em sua cabeça, o que supostamente o teria levado a “descobrir” a gravidade. A primeira versão da história, publicada por Voltaire em 1727 com base no relato de parentes de Newton, não mencionava a maçã caindo na cabeça dele, apenas suas reflexões sobre a gravidade surgidas a partir da observação da queda de uma maçã (Epstein, 1979, p. 28). A história ganhou proporções mitológicas apenas posteriormente, à medida que o mito da genialidade de Newton foi sendo construído. De acordo com Herivel (1965, p. 65-66) e Martins (2006, p. 178) o episódio da maçã teria resultado em uma mudança de concepção em Newton sobre a *extensão* da ação da gravidade. Ele passou a fazer a hipótese simultaneamente cosmovisiva e ontológica de que *a mesma força responsável por atrair a maçã pode ser responsável por manter a Lua em sua órbita*. É uma hipótese cosmovisiva na medida em que afirma a universalidade da gravidade, superando a dicotomia céu-Terra existente desde os primórdios da Grécia; ao mesmo tempo, é ontológica pois afirma que a ação da gravidade existe sob a forma de uma força.

A hipótese de universalidade das leis da Física pode parecer óbvia para parâmetros modernos, mas os predecessores de Newton não foram capazes de chegar a essa conclusão. Como visto, Galileu descreveu o movimento de queda dos graves, porém ele imaginava que sua aplicação era apenas nas proximidades da Terra. Já o movimento dos orbes celestes era *natural*, isto é, circular e uniforme. Previamente à história da maçã, Newton já tinha a hipótese do fluxo de éter como a causa da gravidade. Martins (*idem*, p. 185) explica que, a partir dessa hipótese, Newton concluiu que a intensidade da gravidade deveria cair com o quadrado da distância. Essa conclusão é coerente, já que, se o éter for entendido como um fluido em precipitação radial no sentido do centro da Terra, o fluxo de éter através da superfície de uma esfera imaginária é inversamente proporcional ao quadrado de seu raio. Para testar sua estimativa, Newton teria deduzido a expressão da

aceleração centrífuga, isto é, a lei v^2/r ¹⁹, e com isso estimado a tendência da Lua em se afastar da Terra (Cohen, 1983, p. 260-264). Na ocasião, Newton não obteve bons resultados porque se baseou em dados imprecisos sobre o diâmetro da Terra. Mesmo com esses problemas, seus cálculos foram mais animadores para os planetas. Isso só foi possível, no entanto, porque Newton teve acesso - e utilizou em seus cálculos - uma lei que passou a funcionar quase como uma regra de bolso para os cientistas de sua época. Trata-se da - hoje popularmente conhecida - “lei dos períodos”, ou 3ª Lei de Kepler. Por sua importância na mudança conceitual da comunidade científica sobre a estrutura do cosmos, discute-se a constituição das leis de Kepler em maiores detalhes.

Johannes Kepler (1571-1630) foi um astrônomo e matemático alemão que viveu antes de Newton e concebeu um sistema planetário inédito até sua época. Um sistema que rompeu com o paradigma platônico e substituiu as órbitas circulares por elípticas. Como Kepler fez isso? Segundo Westfall (1977, p. 6-11), Kepler chegou em seus impressionantes resultados da seguinte forma. Primeiramente, ele tentou ajustar os dados da órbita de Marte a um círculo, desistindo após dois anos de tentativas frustradas²⁰. Os dados eram precisos o suficiente para que Kepler admitisse que o planeta se movia em uma órbita com velocidade variável – e ele aceitou essa evidência, já um sinal de sua rejeição à perfeição do movimento uniforme. Ao empregar os mesmos métodos para a órbita da Terra, teve constatação semelhante, e acabou chegando à conclusão de que a velocidade da Terra é inversamente proporcional à distância ao Sol, isto é, $v \propto R^{-1}$. Esse resultado é rigorosamente incorreto, pois vale apenas no periélio e afélio da órbita (Boccaletti, 2001, p. 12), mas Kepler o considerou válido ao longo de toda a trajetória. Apesar disso, sua obtenção desencadeou os eventos que o fariam chegar nas suas famosas leis. É importante destacar que tal resultado não foi meramente extraído dos dados. A investigação de Kepler sobre a gravidade estava impregnada de teorizações, sendo dirigida por concepções prévias e profundas especulações filosóficas, como a de Newton. O resultado obtido apenas reforçava sua crença prévia de que o Sol, sendo a fonte de toda a luz e calor, deve ser também a fonte de todo movimento no Universo. Kepler imaginava que do Sol emanavam eflúvios magnéticos, que seriam responsáveis por manter os planetas em suas órbitas. A baixa velocidade orbital dos planetas mais distantes era, para ele, uma evidência de que essa força diminuía com a distância, *exatamente como na alavanca* (Wilson, 1974, p. 258).

19 O historiador da Ciência Herivel (1960) demonstrou que Newton deduziu a expressão cerca de dez anos antes de Christiaan Huygens (1629-1695), que a teria publicado somente em 1673, na obra *Horologium Oscillatorium*. Newton não reivindicou para si o crédito da descoberta.

20 Kepler trabalhava com os dados de Tycho Brahe, que possuíam um erro máximo de quatro minutos de arco. Copérnico trabalhava com um erro de cerca de dez.

De fato, o Universo, para Kepler, é um Universo mecânico, regido por leis matemáticas concebidas por Deus.

A partir de argumentos geométricos simples e usando a lei de velocidades, Kepler deduziu a lei das áreas (2ª Lei de Kepler). Essa lei forneceu, pela primeira vez, uma forma de investigar o movimento planetário com uma única órbita. Até então, os modelos planetários, inclusive o de Copérnico, utilizavam dezenas de epiciclos e deferentes para descrever o movimento dos planetas do sistema solar²¹. Seu argumento principal era que o uso da segunda lei não demandava a supervisão de uma inteligência superior (Deus) que seria necessária, por exemplo, caso o movimento dos planetas fosse dependente de círculos, epiciclos e excêntricos, nos quais os planetas girassem em torno de pontos imateriais que também se moveriam. Assim, Kepler abandona definitivamente as tentativas de ajustar dados às órbitas circulares e começa a experimentar com diferentes órbitas. Ao voltar a analisar a órbita de Marte, agora tentando ajustar uma elipse, ele percebeu que, dessa forma, a distância do planeta ao Sol variava de forma contínua, como uma função seno. A variação contínua sugeria uma ação puramente física e matemática, dispensando a ação constante e a supervisão de uma inteligência. Assim, Kepler descarta as outras órbitas propostas - dentre elas a de um ovoide - e chega à conclusão de que as órbitas dos planetas são elipses, com o Sol em um de seus focos (1ª Lei). As duas leis aparecem em seu livro *Astronomia Nova*, publicado em 1609, e representaram a superação do paradigma platônico e da figura do círculo na Astronomia.

Newton e muitos outros cientistas consideraram equivocadamente as leis de Kepler como empíricas, como provindas de um mero palpite (Turnbull, 1960, p. 436). Entretanto, o trabalho de Kepler foi balizado por teorias, como evidenciado. Segundo o próprio Kepler, sua construção

“[...] estava exatamente de acordo com as [...] observações. E quando o fato foi estabelecido, fui posteriormente levado, uma vez embasado nos princípios, a buscar a causa do assunto que revelei [...] da maneira mais hábil e lúcida possível. Se as causas que estabeleci como princípios não fossem boas, elas nunca teriam resistido a uma investigação de tal exatidão. Se alguém pensa que a obscuridade desta apresentação surge da perplexidade da minha mente, eu devo apenas reconhecer-me culpado em não estar disposto a deixar nada sem ser testado [...]” (Kepler, 1992, p. 591)

Foi somente em 1618, dez anos depois da obra *Astronomia Nova*, que a “lei dos períodos” (3ª Lei) foi publicada por Kepler, no seu trabalho *Harmonice mundi*. A 3ª Lei é enunciada da seguinte forma: o quadrado do período (T) de revolução do planeta em

²¹ Segundo Peduzzi (2008, p. 75), o modelo heliocêntrico de Copérnico utilizava 48 círculos, enquanto o geocêntrico de Ptolomeu “apenas” 40.

torno do Sol é proporcional ao cubo de sua distância média (R) ao astro, isto é, $T^2 \propto R^3$. A abordagem usada por Kepler na obtenção dessa lei parece ter sido, de fato, mais empírica (essencialmente por tentativa e erro), e o próprio Kepler não dá detalhes sobre como chegou nessa lei (Miller, 2009, p. 80). Talvez por sua feição empírica, ou, mais provavelmente, por seu caráter disruptivo e revolucionário, as leis de Kepler tiveram diferentes níveis de aceitação. Com certeza, a mais usada foi a terceira lei, pois ela tinha correspondência direta com os dados e era frequentemente usada, como mencionado, como regra de bolso, inclusive por Newton.

De acordo com Westfall (1983, p. 143), ainda em 1666, ao continuar seus estudos sobre a gravidade, Newton teria empregado a terceira lei de Kepler em conjunto com a equação da força centrífuga para estimar a força que mantém os planetas em suas órbitas. Com isso, ele deduziu que a força gravitacional deveria cair com o quadrado da distância e os dados astronômicos concordaram com sua previsão. Anacronicamente isso pode entendido da seguinte forma: pela sua recém-obtida equação da *força centrífuga*, o equivalente da força sofrida pelo planeta seria $F \propto v^2/R$, onde (v) é a velocidade do planeta, supondo órbita circular de raio (R). Nesse caso, $v = 2\pi R/T$. Usando a 3ª Lei, resulta $F \propto 1/R^2$. Essa confirmação fortaleceu sua crença na validade da fórmula, porém, em função dos resultados incorretos obtidos para o movimento da Lua, Newton permaneceu incerto com relação à validade dessa proposição para todo o cosmos. Os eventos narrados até agora aconteceram antes da publicação do *Principia*. Como descrito, Newton usou resultados que haviam sido obtidos por Kepler quase 50 anos antes. Foi apenas após a publicação por Huygens da equação da aceleração centrífuga, em 1673, que diversos cientistas passaram a especular, assim como Newton, que a gravidade seria um efeito cuja ação diminui com o inverso do quadrado da distância.

A concepção comum no meio acadêmico, já na época de Kepler, era a de que todos os planetas tinham uma tendência centrífuga. Tal força deveria ser contrabalanceada por outra força, de tendência centrípeta, de forma que existisse um equilíbrio capaz de manter o planeta na órbita (Westfall, 1995, p. 148). Entretanto, em 1679, Robert Hooke (1635-1703) supõe, de forma revolucionária, que o movimento circular é uma combinação de dois movimentos: um inercial (tangente) e outro atrativo (radial) para o centro (centrípeto). Newton já havia aceitado a concepção inercial, porém a ideia de que o movimento orbital dispensava a força centrífuga lhe era completamente nova (Erichson, 1994, p. 223). Segundo consta, Hooke teria incitado Newton a determinar a trajetória de um corpo que se desvia de sua trajetória inercial em função da ação de uma força centrípeta que depende do

inverso do quadrado da distância. Assim, vê-se que tanto os resultados de Kepler, quanto a proposição de Hooke, foram fundamentais para que Newton consolidasse a hipótese representacional de que *a força gravitacional entre dois corpos é centrípeta e pode ser expressa como inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles*.

Em 1680, Newton se envolveu em debates sobre o aparecimento de um cometa nos céus. Suas correspondências evidenciavam que Newton ainda não atribuía a lei do inverso do quadrado aos cometas, como se esses corpos seguissem leis diferentes dos planetas (Westfall, 1995, p. 154-155). Ou seja, 14 anos depois do mitológico episódio da maçã, Newton ainda não havia chegado na Gravitação Universal. Tal evento motivou Newton a buscar dados sobre cometas e a estudar seu movimento com mais atenção. Em 1682, aparece um cometa que viria a ser chamado de cometa Halley. Em 1684, Edmond Halley (1656-1742) perguntou a Newton como seria a trajetória de um planeta sujeito a uma força central, em direção ao Sol, que decaísse com o quadrado da distância, isto é, a mesma pergunta que Hooke fez poucos anos antes. Em resposta, Newton afirma imediatamente que a trajetória seria uma elipse, indicando já ter resolvido o problema sem ter publicado. Em 1687, surge a primeira edição do *Principia*.

Não é preciso ressaltar a importância e o significado da publicação do *Principia* para o contexto científico. Cabe apenas destacar alguns aspectos que influenciaram Newton na proposição de algumas ideias centrais da teoria da Gravitação Universal, bem como alguns resultados que encorajaram ou possibilitaram a publicação da obra por Newton. Como visto, Kepler pensava, assim como Newton, que o Sol deveria ser a *causa* do movimento dos planetas. Sua explicação, no entanto, era baseada nos mencionados eflúvios magnéticos. Kepler simpatizava com a teoria de William Gilbert (1544-1603), que, inspirado na atração magnética entre ímãs na Terra, propôs que a interação entre o Sol e os planetas fosse também uma interação magnética de natureza recíproca. Gilbert concebia a Terra como um grande ímã e, rejeitando a ação à distância, imaginava que a força magnética seria mediada por uma espécie de fluido sutil. Talvez o aspecto mais importante da construção de Gilbert seja a noção de reciprocidade entre as forças de interação gravitacional, o que soa como um prelúdio à terceira lei de Newton. É importante notar, no entanto, a seguinte diferença: para Gilbert, as forças são recíprocas e opostas, porém não são iguais. O corpo mais massivo exerceria uma força maior sobre o menos massivo (Gilbert, 1958). Kepler e Galileu ressaltaram o argumento de Gilbert quando tentaram defender o modelo heliocêntrico copernicano, o que provavelmente conferiu alguma notoriedade às ideias desse pensador (Baldwin, 1985, p. 155), ao ponto que é razoável imaginar que Newton as conhecia. Assim, pode ser que as discussões de Gilbert e Kepler tenham influenciado na hipótese

representacional, admitida por Newton em sua Teoria da Gravitação Universal, segundo a qual *a força gravitacional é atrativa, instantânea e surge em pares de mesma direção, porém de sentidos opostos*.

Outro ponto importante que merece destaque é o papel do pêndulo na confirmação experimental da teorização de Newton. Boulos (2006) argumenta que o crédito dado ao *Principia* deriva principalmente da demonstração dada por Newton de que a mesma força que mantém a Lua em sua órbita é responsável pela queda dos objetos na superfície da Terra, dado que essa força diminui com o quadrado da distância. Isso foi feito estimando a queda da Lua em direção ao centro da Terra em um intervalo de tempo e comparando com quanto deveria ser a queda de um corpo posicionado na superfície da Terra, considerando a devida mudança na ação da gravidade. No *Principia*, é mostrado que os corpos na superfície da Terra deveriam cair cerca de cinco metros em um segundo para que a asserção fosse verdadeira. Newton aponta que esse é de fato o caso, conforme os experimentos de Huygens com o pêndulo demonstraram²² (Matthews, 2014, p. 34). Assim, o experimento de Huygens teve papel fundamental na confirmação da teorização de Newton, pois forneceu a evidência experimental crucial que faltava para destravar o conhecimento acumulado por Newton desde 1666.

Por fim, um aspecto que permitiu a operacionalização da teoria da Gravitação Universal foi o desenvolvimento do teorema das cascas esféricas (Cohen; Westfall, 2002, p. 169). Esse teorema tem origem no desenvolvimento de novas técnicas matemáticas, algumas delas desenvolvidas pelo próprio Newton, dentre elas o cálculo diferencial e integral. O teorema das cascas esféricas permitiu a Newton tratar a interação de sistemas gravitacionais complexos de forma simplificada ao assumir a hipótese representacional que *os astros aproximadamente esféricos, com distribuição radial de matéria, podem ser considerados como objetos pontuais localizados em seus centros*. A Figura 5.2.2.1 resume os elementos contextuais e as hipóteses assumidas na construção da lei da Gravitação Universal.

22 Em 1673, Huygens construiu o primeiro relógio de pêndulo confiável para medida do tempo. A partir daí, o erro de medida do tempo do relógio diminuiu de aproximadamente meia hora por dia para alguns segundos no espaço de uma década. Com isso, o tempo passou a ser usado de forma confiável e finalmente passou a fazer parte das investigações dos fenômenos naturais (Wise, 1995).

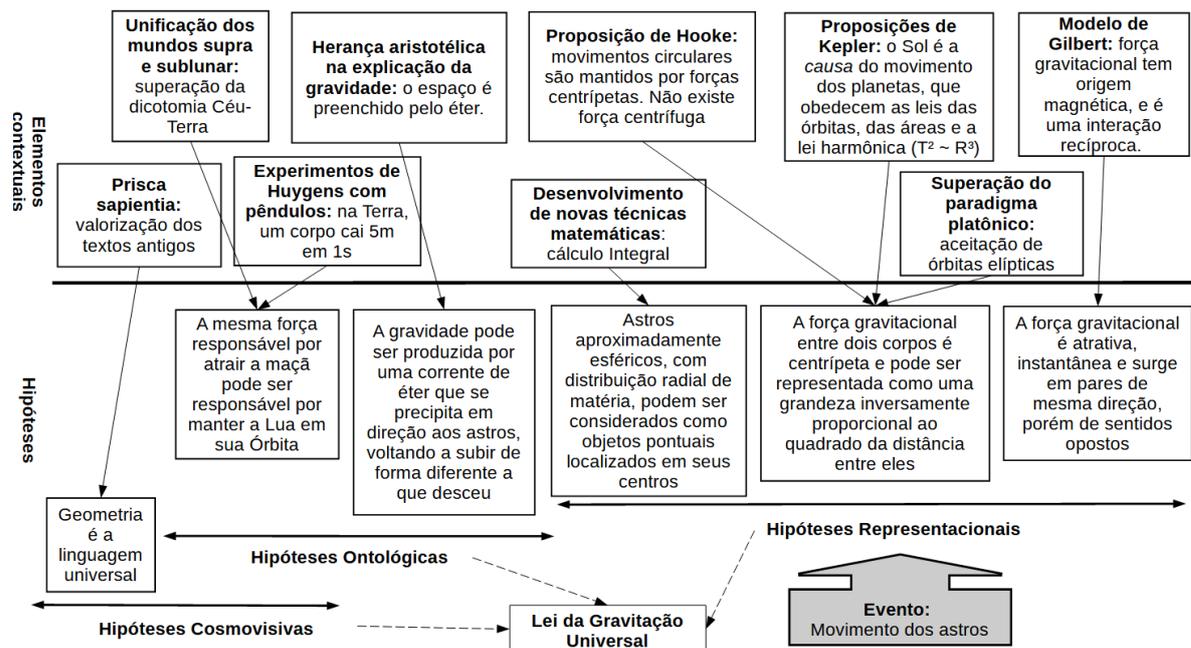


Figura 5.2.2.1: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção da lei da Gravitação Universal. O evento a ser descrito pela lei é o movimento dos astros.

Antes de iniciar a discussão sobre o próximo episódio, é interessante destacar a posição final de Newton sobre as causas da gravidade. Vários historiadores da Ciência entendem que Newton não acreditava na possibilidade de ação à distância (Koyré, 1965; Cohen, 1980). Entretanto, conforme mencionado, Newton abandonou a concepção do éter, passando a aceitar a possibilidade do vácuo. Assim, até hoje se debate o que ele realmente pensava sobre o mecanismo da gravidade (Henry, 2011; Brown, 2016). Pelo que parece, esse ponto foi intencionalmente deixado em aberto por Newton, como se pode evidenciar em uma carta endereçada a Berkeley, escrita três anos após a publicação do *Principia*, em que Newton escreve o seguinte:

“[...] Que a gravidade possa ser inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo possa atuar sobre um outro à distância no vácuo sem a mediação de qualquer outra coisa pela qual sua ação e força possam ser transportadas de um para outro, é para mim um absurdo tão grande que eu acredito que nenhuma pessoa que tenha uma faculdade competente de pensamento em assuntos filosóficos possa jamais cair nele. A gravidade deve ser causada por um agente que atua constantemente de acordo com certas leis, mas se esse agente é material ou imaterial, eu deixei à consideração de meus leitores” (Newton 1959, vol. 3, p. 253–254).

5.2.3 As três Leis de Newton

As três leis enunciadas por Newton diferem significativamente das leis que se apresentam hoje nos livros didáticos, tanto no aspecto matemático, quanto no conceitual. Como mencionado na Subseção 5.2.2, Newton acreditava em uma *prisca sapientia*, o que o levou a desenvolver grande parte de sua obra em termos geométricos, além de enunciar suas leis usando a teoria das razões e proporções. Do ponto de vista conceitual, a formulação original das leis traz elementos que são tipicamente ignorados no ensino, como “força inata” e “espaço absoluto”, construções essas fundamentais para a teorização newtoniana. Para compreender como Newton estruturou suas leis, resume-se a seguir a estruturação da obra *Principia*.

Newton começa com o capítulo *Definições*, onde explica o que se deve entender por conceitos como quantidade de matéria, quantidade de movimento, força inata, força impressa, força centrípeta, espaço e tempo absolutos. No capítulo seguinte, intitulado *Axiomas ou Leis do Movimento*, são expostas as três leis, bem como alguns corolários, como a regra da composição de forças, a conservação do momentum e do centro de gravidade. Depois de expor as três leis, ainda no segundo capítulo, Newton afirma que estabeleceu os princípios até então enunciados “da forma como foram aceitos pelos matemáticos” e “confirmados por uma abundância de experimentos”. Como evidência disso, narra os estudos de Galileu como se ele tivesse usado a primeira e segunda lei para derivar a forma parabólica da trajetória dos projéteis. Da mesma forma, argumenta que, “[...] com a Lei III, Sir. Wren, Dr. Wallis e Mr. Huygens, os maiores geômetras de nossos tempos, determinaram separadamente as regras do impacto e reflexão de corpos duros [...]” (Newton, 2016, p. 61-62). Em seguida, Newton mostra como seus próprios experimentos com pêndulos confirmam a validade de suas leis. O restante da obra, dividida em livros I, II e III, contém, além da teoria da Gravitação Universal, diversas aplicações. A seguir, discutem-se os fundamentos das três leis de Newton.

Newton figura dentre os primeiros cientistas a defender um sistema compreensivo de causalidade regendo os fenômenos físicos. No âmago desse sistema, encontra-se o conceito de força. Entretanto, conforme mencionado, nota-se que Newton assumia a existência de dois tipos de força. Uma seria a *força interna*²³ (*vis insita*), responsável pela conservação do movimento, enquanto a outra seria a *força externa*²⁴ (*vis impressa*), responsável pela sua mudança. Esse aspecto é claramente formulado por Newton nas definições III e IV do *Principia* (Idem, p. 40-41): “A *vis insita*, ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, no que depende dele, mantém seu estado

23 Comumente referida como *força inata*.

24 Ou força impressa.

presente, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta” e “Uma força impressa é uma ação exercida sobre um corpo a fim de alterar seu estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme em uma linha reta”. Um aspecto contextual importante dessa formulação é a ruptura com o paradigma aristotélico de que forças são associadas com velocidade. Newton inovou ao relacionar forças com *mudanças* na velocidade. Outro ponto a ser notado é que as definições de Newton sobre força interna e externa são incompatíveis, pois uma força anula a outra: a força interna é a *causa* da manutenção do movimento, enquanto a externa é a *causa* da sua mudança. De acordo com Capecchi (2021, p. 38-39), Newton nunca conseguiu unificar os dois tipos de força e a incompatibilidade permaneceu. Assim, pode-se dizer que Newton adotou a hipótese cosmovisiva e ontológica de que as causas das mudanças nos movimentos são as forças internas e externas. O elemento cosmovisivo subjacente à hipótese é a noção de que toda mudança de movimento requer uma causa anterior, e não finalística. O elemento ontológico se refere à existência dessas forças.

O conceito de força interna permite compreender o verdadeiro significado atribuído por Newton à sua chamada lei da inércia, enunciada da seguinte forma: “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças impressas²⁵ sobre ele” (Newton, 2016, p. 53). Primeiramente, observa-se que o enunciado de Newton carrega elementos contextuais, visíveis, por exemplo, nas palavras “força impressa” e “estado de movimento”. Conforme mencionado, no *Principia*, Newton atribui a Galileu as duas primeiras leis de movimento. Entretanto, foi visto no segundo episódio histórico que Galileu tinha uma noção aristotélica de movimento, separando-o em “natural” e “violento”, por exemplo. Além disso, sua concepção de movimento livre de força era associada com uma espécie de inércia circular. A conceitualização de Newton sobre inércia incorpora a síntese de uma longa evolução, marcada por avanços e retrocessos, das tentativas de descrição dos movimentos dos corpos (Menn, 1990, p. 216-217). Para melhor compreender a formulação newtoniana, ilustra-se a seguir algumas das principais ideias relacionadas ao entendimento moderno de inércia.

Um dos primeiros conceitos surgidos após a Antiperistasis aristotélica que aborda o movimento sem causa aparente é o de “força impressa”. A expressão era usada por Hiparco (190-120 a.C.), um famoso astrônomo da antiguidade, em suas tentativas de descrever movimentos de projéteis. Hiparco discordava de Aristóteles sobre o mecanismo da

25 A tradução do texto é “imprimida”, porém a expressão “impressa” é a mais comum. Por isso, em todos os casos, usou-se a versão mais difundida.

Antiperistasis. Ele imaginava que o movimento de um projétil era mantido por uma *força impressa* no corpo, que permanece com ele após seu lançamento e se extingue gradualmente (Franklin, 1976, p. 531). A teoria de Hiparco foi estudada e expandida por João Filóponos (490 a 570 d.C.), que chegou a conceber um movimento sem resistência, isto é, no vácuo (Evora, 1988, p. 67). Avançando no período medieval, ocorre uma mudança conceitual na descrição do movimento, que agora passa a ser mantido por um *ímpeto*. O ímpeto seria uma espécie de força impressa com a propriedade de *conservação*. Ou seja, a *causa* do movimento é um ímpeto, possuído pelo corpo como uma força interna, que só é modificado por causas externas, como a ação da gravidade ou o arrasto com o ar. O crédito a essa mudança é devido a Jean Buridan (~1300-1358), um erudito francês. Koyré (1965) mostra que a teoria de Buridan passou a ser difundida em diferentes versões no continente europeu e personalidades como Galileu, Descartes e Newton a conheciam.

Descartes propôs princípios semelhantes à primeira lei de Newton e a noção de ímpeto. Esses princípios estão expressos em suas chamadas primeira e segunda lei da natureza, onde se afirma, respectivamente, que “[...] cada coisa permanece no estado, tanto quanto lhe é possível; e que qualquer coisa que se mova tenta se mover para sempre” e “[...] todo movimento é reto em si mesmo [...]” (Descartes, 1644, p. 54-56). Ou seja, a primeira lei é um enunciado de conservação do movimento, enquanto a segunda especifica a direção do movimento (linha reta). Segundo Descartes, a causa do movimento e de sua conservação seria uma lei divina, instituída desde a criação do Universo (Dutton, 1999, p. 55-56).

Inicialmente, Newton tinha uma concepção de inércia próxima a de Buridan, isto é, a de que um corpo requer a agência de uma força interna para permanecer em movimento (Westfall, 1983, p. 144). A concepção de “estado de movimento” sofre uma significativa transformação ao longo do período de Aristóteles para Descartes e Newton. De acordo com Aristóteles, todo movimento é considerado uma mudança e requer uma explicação causal. No entanto, para reconhecer que o movimento retilíneo pode persistir sem uma causa, é necessário considerar o movimento como um estado, ao invés de uma mudança. Essa proposição é introduzida por Descartes e posteriormente adotada por Newton (Martins, 2012, p. 298-299). Após estudar a obra de Descartes, Newton passou a conceber que o movimento poderia se manter sem força, isto é, *sem uma causa*, de forma que a força inata surgiria apenas quando o *estado de movimento*²⁶ do corpo fosse alterado, resistindo a essa mudança (Idem, p. 294-295). A influência de Descartes na formulação da primeira lei de Newton é notória. Assim, pode-se dizer que Newton assumiu a hipótese cosmovisiva e

26 Nota-se, portanto, que a expressão “estado de movimento” na primeira lei de Newton vem de Descartes.

ontológica de que *o movimento retilíneo, com velocidade constante, ocorre sem causas; a resistência à mudança, no entanto, é causada pela força interna*. A cosmovisão é explícita na afirmação de que movimentos podem ocorrer sem causa, enquanto o elemento ontológico se manifesta no reconhecimento da existência de forças internas aos corpos, que reagem frente a mudanças no seu estado de movimento.

No *Principia*, Newton afirma que as grandezas tempo, espaço, lugar e movimento são conceitos “bem conhecidos de todos”, e por isso, em vez de explicá-los, gostaria de apenas clarificar essas quantidades, ao classificá-las em absolutas e relativas, verdadeiras e aparentes, matemáticas e vulgares (Toulmin, 1959, p. 11). Por um lado, “vulgares” significa, para Newton, grandezas acessíveis aos nossos sentidos, que podem ser identificadas e quantificadas, isto é, algo relativo e aparente. Por outro lado, “matemáticas” carrega a conotação de verdadeiro e absoluto. Ao investigar as relações entre a Filosofia Natural e a Teologia Natural no pensamento de Newton, Correia (2015) analisa sua concepção sobre o espaço e o tempo, concluindo que, para Newton, o espaço e o tempo decorrem da própria existência de Deus, sendo indissociáveis, porque Deus é eterno em relação ao tempo e onnipresente em relação ao espaço. Assim, o espaço e o tempo são absolutos, constituindo o que Newton chama de *Sensorium Dei*, ou sensorio divino. Compativelmente com suas crenças teológicas, Newton pensava que o espaço absoluto teria uma descrição geométrica em três dimensões, sendo homogêneo, isotrópico e tendo extensão infinita em todas as direções; o tempo, também absoluto, seria uma grandeza matemática, caracterizada por um fluxo contínuo e homogêneo, determinável pelo cálculo dos fluxões (Idem, p. 379-380; Newton, 2016, p. 44-51). Espaço, tempo, movimento e repouso *absolutos* seriam os referenciais do espaço, tempo, movimento e repouso *relativos*, ao qual temos acesso por meio dos sentidos. Nas palavras de Newton:

[...] O espaço constitui uma disposição do ser enquanto ser. Não existe nem pode existir ser algum, que não tenha alguma relação com o espaço, de uma forma ou de outra. Deus está em toda a parte, as inteligências criadas estão em algum lugar, o corpo está no espaço que ocupa, sendo que qualquer coisa que não estivesse nem em nenhum lugar nem em algum lugar, na realidade não existiria. Daqui se infere que o espaço constitui um efeito decorrente da própria existência do ser, já que, quando se postula algum ser postula-se também o espaço para ele. O mesmo pode ser afirmado sobre a duração: com efeito, ambos constituem disposições do ser ou atributos, segundo os quais dominamos quantitativamente a presença e a duração de qualquer coisa que exista individualmente. Assim a quantidade da existência de Deus era eterna, em relação à duração e infinita em relação ao espaço no qual ele está presente [...] (Newton, 1978, p. 136).

Assim, pode-se afirmar que Newton assume a hipótese cosmovisiva e ontológica que *o espaço e tempo são absolutos: o tempo é matemático e flui de forma uniforme; o espaço, preenchido por Deus, é constante e infinito. Só temos acesso às suas respectivas quantidades relativas*. A cosmovisão é explícita tendo em vista a justificativa teológica, enquanto a sua natureza ontológica se infere a partir da descrição do tempo como algo matemático e do espaço como o *Sensório Dei*.

As noções de espaço e tempo absolutos foram criticadas por alguns pensadores contemporâneos de Newton, notoriamente o bispo irlandês George Berkeley (1685-1753) e o filósofo alemão Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716). A objeção de Berkeley era a de que “seria suficiente, para determinar o movimento e o repouso verdadeiros [...], considerar o espaço relativo, ao invés do espaço absoluto [...]” (Berkeley, 2006, p. 133). Berkeley considerava a noção de espaço infinito e tempo eterno, indissociáveis de Deus, como absurda e potencialmente herética. Já a objeção de Leibniz é embasada na sua conclusão que um espaço absoluto violaria o *princípio da razão suficiente*²⁷. A argumentação é a seguinte: assumindo a uniformidade do espaço, isto é, que ele é igual em todos os pontos, não haveria razão suficiente para que a orientação e distribuição de matéria em uma região seja diferente da distribuição em outra. Se o espaço fosse absoluto, haveria um ponto de referência, de forma que Deus estaria dispondo a matéria de forma arbitrária no universo quando se considera as distâncias em relação a esse ponto, violando o princípio da razão suficiente, o que é um absurdo (Assis, 1998, p. 105-106). Ou seja, Leibniz também defendia a noção de espaço e tempo relativos. A questão da natureza do espaço permaneceu alvo de discussões filosóficas, mas foi somente no início do século XX que a questão foi examinada à luz de novas perspectivas (Mach, 1883), abrindo caminho para a Teoria da Relatividade.

Como mencionado ao final da Subseção 5.2.2, Newton não ousou fazer sugestões sobre as causas da gravidade no *Principia*. No Escólio Geral da segunda edição, já com seus 71 anos de idade, Newton afirma, em resposta às críticas à primeira edição²⁸, que ele não faz hipóteses²⁹ na derivação dos fenômenos gravitacionais, tendo derivado sua lei puramente a partir do fenômeno, isto é, da empiria (Newton, 1934, p. 547). Essa afirmação é sabidamente falsa não apenas aos leitores da Subseção 5.2.2, mas também os contemporâneos de Newton, que encontram na primeira edição da sua obra *Óptica*, sobre

27 Esse princípio pode ser entendido como: “Nada acontece sem uma razão pela qual ela deva ser de uma maneira em vez de outra”.

28 As maiores críticas sobre o trabalho de Newton vêm principalmente dos cartesianos, que o acusam de introduzir obscuridades na Filosofia Natural ao não explicar o mecanismo da gravidade. Essa crítica não é justa sobre vários aspectos, como apontado na Subseção 5.2.2 e será desenvolvido aqui.

29 Por suas implicações epistemológicas, o enunciado “não faço hipóteses” (em latim: *hypotheses non fingo*) é bastante debatido na literatura e tem implicações importantes na compreensão do fazer científico, como é discutido no corpo do texto.

fenômenos luminosos, um emaranhado de hipóteses explícitas, como a *elasticidade do éter* e a interação das *partículas* de luz (Newton, 2002). A síntese Newtoniana sobre o fazer científico se consolidou gradualmente ao longo de sua vida, tendo a razão aliada à experimentação um papel cada vez mais proeminente. Na nova ciência inaugurada por Newton, as hipóteses como explicações causais para os fenômenos só são válidas quando dizem respeito à experiência possível (Da Silva; Peduzzi, 2012, p. 317). Afinal, o que se pode dizer sobre o fazer científico de Newton?

É possível afirmar que, ao menos em suas publicações, o pensamento newtoniano se contrapõe à metodologia hipotético-dedutiva racionalista, tipicamente associada à Descartes. Como se depreende pelas justificativas teológicas para a conservação do movimento e da teoria dos Vórtex descrita na Subseção 5.2.2, a epistemologia cartesiana é fortemente calcada em hipóteses metafísicas, a partir das quais Descartes desenvolve sua ciência. Para Newton, no entanto, o fazer científico depende fortemente da empiria. Em suas próprias palavras, a Filosofia Natural consistiria em “[...] descobrir a estrutura e as operações da natureza, e em reduzi-las, tanto quanto possível, a regras ou leis gerais – estabelecendo essas regras através de observações e experimentos [...]” (Westfall, 1995, p. 67). As ideias de Newton ressonam com a argumentação do seu compatriota Francis Bacon (1561-1626), contemporâneo de Descartes e um de seus maiores críticos. Entretanto, a síntese newtoniana tem características próprias.

Segundo Bacon, o debate científico vinha sendo contaminado por pressupostos metafísicos e teológicos, senso comum, credices. Sua filosofia rejeita a especulação e a criatividade, pois essas interferem negativamente na razão. O cientista deveria se despir de concepções prévias na investigação da natureza e se ater aos fatos, do contrário restaria apenas uma percepção distorcida da realidade (Bacon, 1779, p. 6). O método baconiano é baseado no princípio da indução, por meio do qual se argumenta que o conhecimento é obtido partindo-se de fatos concretos e particulares, que por meio de um processo de generalização, consolidam-se na forma de leis (Ostermann; Cavalcanti, 2011, p. 29-34). Newton certamente conheceu a tese baconiana e incorporou alguns de seus elementos, mas sua síntese epistemológica tem características próprias.

Segundo Newton, é a partir dos fenômenos que se obtém o conhecimento, por um processo de indução que se desenvolve em duas etapas, sendo uma a *análise* e outra a *síntese*, nessa ordem. Na análise, parte-se do fenômeno/efeito, e a partir deles, investigam-se as causas que atuam na natureza, isto é, obtém-se os princípios gerais. Em seguida, na síntese, procede-se na ordem inversa, utilizando-se dos princípios e causas gerais para explicar outros fenômenos que são dependentes das mesmas causas, demonstrando assim

as explicações (Newton, 2002, p. 292). Cohen e Westfall (2002, p. 148) explicam que a concepção de Newton sobre hipóteses é a de que elas são úteis apenas como guias na elaboração de experimentos ou como ideias na concepção de teorias, *mas não são partes das teorias*. Assim, seria incorreto rotular Newton como um empirista-indutivista na acepção de Bacon, já que sua epistemologia favorece um claro diálogo entre concepções teóricas, observações e experimentos. Como será discutido em seguida, parte da referida etapa de síntese na elaboração da mecânica newtoniana, assim como exposta no *Principia*, foi realizada com experimentos com pêndulos. A partir desses experimentos, Newton derivou princípios gerais para o restante das interações mecânicas, como a conservação do movimento. Cabe aqui, portanto, destacar uma hipótese de natureza cosmovisiva assumida por Newton, fruto de suas convicções epistemológicas. Para Newton, *os efeitos das interações entre corpos são generalizáveis; por isso, as variações de movimento de qualquer corpo são explicadas pelas mesmas leis identificadas nas colisões entre pêndulos (conservação do movimento dos corpos)*. A seguir, explicam-se os experimentos conduzidos por Newton e que o levaram a conceber as outras duas leis do movimento.

A valorização da empiria como instrumento do fazer científico é um fenômeno do renascimento. Conforme mencionado na Subseção 5.2.1, pouco antes desse período os pensadores europeus se encontravam em um relacionamento passional com o pensamento grego clássico, notadamente a doutrina platônica e aristotélica, que desprezavam a experimentação. Com o tempo, o papel da experimentação na Ciência cresceu em importância e o pensamento escolástico foi sendo questionado³⁰. Os experimentos com projéteis de Galileu e a teorização de Bacon anteriormente mencionados são evidências desse aspecto. Ao longo do século XVII, foram feitos diversos experimentos envolvendo colisões buscando responder à pergunta: *o que se conserva durante a interação entre dois corpos?* O interesse nesse questionamento tem relação com a teorização dominante na época, isto é, a teoria de movimento de Descartes. Recordar-se que o Universo de Descartes é cheio, de forma que todas as interações, inclusive as gravitacionais, são de contato (Teoria do Vórtex). Assim, a investigação das colisões era a pesquisa de fronteira da Física na época. Destacam-se nesse empreendimento os experimentos de John Wallis (1616-1703), que estudou colisões perfeitamente inelásticas, e de Christiaan Huygens, que investigou colisões elásticas entre corpos duros.

Wallis tinha uma lei de conservação diferente da lei de Descartes, que, por ainda não utilizar somas vetoriais, considerava o momentum uma grandeza absoluta, isto é, sempre

³⁰ Observa-se que Newton ainda teve sua formação pelo currículo medieval do *trivium* e *quadrivium*, o que reflete a importância do pensamento aristotélico ainda em sua época (Whiteside, 1970, p. 6).

positiva. Wallis fazia essa distinção, defendendo que o sentido do movimento precisa ser considerado na lei de conservação (Porto, 2020, p. 10). Sua lei de conservação do momentum é quase a mesma de hoje, exceto que ele mencionava o *peso* em vez da *massa* dos corpos na colisão. Além disso, conforme mencionado, sua análise é restrita aos processos inelásticos. Já Huygens acreditava, como Descartes, que o momentum não deveria ter sinal. A solução encontrada por ele para contornar o problema foi considerar o momentum como o produto da massa pela velocidade ao quadrado (Huygens, 1929, p. 72). Como se pode notar, essa expressão difere da forma contemporânea de enunciar a energia cinética de um corpo apenas pelo fator $\frac{1}{2}$. Assim, compreende-se como Huygens chegou à conclusão correta de que essa quantidade se conservava para a colisão entre corpos duros, tipicamente elástica. Newton acompanhou o interesse manifesto pela comunidade científica no fenômeno das colisões e isso teve impacto na justificativa das suas outras duas leis, como se explica na sequência.

No *Principia*, Newton cita os trabalhos de Wallis e Huygens e relata experimentos com pêndulos realizados por ele próprio para investigar as colisões entre os corpos. De fato, o pêndulo irá mais uma vez desempenhar um papel importante na construção da mecânica newtoniana. No episódio da Gravitação Universal, os resultados de experimentos com pêndulos conduzidos por Huygens foram utilizados por Newton como evidências empíricas cruciais para unificação da mecânica terrestre com a celestial. Agora, ele será o aparato que proporciona os meios de corroborar as leis de Newton (Matthews, 2014, p. 32-34). Os experimentos com pêndulos realizados por Newton fazem parte do referido processo de análise, no qual se intenta a elucidação das causas e princípios gerais que regem os fenômenos (nesse caso, a interação de contato entre corpos). Newton conclui - em linguagem moderna - que, em um choque frontal entre dois corpos A e B , as variações das quantidades de movimento de cada corpo durante a colisão são sempre iguais e opostas, isto é, $\Delta p_A = -\Delta p_B$. Ou seja, Newton passa a admitir como princípio geral de interações instantâneas entre os corpos a conservação do momentum (Newton, 2016, p. 64). Esse seria, portanto, um dos resultados da etapa de análise. A segunda lei foi enunciada por Newton como “A mudança de movimento é proporcional à força motora impressa, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é impressa”³¹ (Idem, p. 54), de forma que, em linguagem próxima à de Newton, pode-se escrever algo como $F \propto \Delta p$. Tendo em vista as já explicadas concepções de Newton sobre a natureza do espaço, a segunda lei se trata de uma hipótese representacional, que pode ser formulada da

31 Nota-se que Newton não definiu força como taxa de variação do momentum. Sua Matemática é essencialmente geométrica e faz uso da teoria das razões e proporções, assim como Galileu. Conforme apresentado na Subseção 5.2.2, Newton entendia a geometria como a linguagem universal.

seguinte forma: *A variação do movimento de um corpo em relação ao espaço absoluto é proporcional à força externa nele aplicada.*

Por fim, a terceira lei pode ser entendida como uma consequência da conservação do momentum. As duas últimas relações mencionadas resultam imediatamente que $F_A = -F_B$. Esse resultado é enunciado na forma da terceira lei como “A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas” (Idem, p. 54). Cabe destacar dois aspectos que estão implícitos na definição de Newton. O primeiro é o fato de que essas interações são supostas instantâneas, por serem de contato. Da fato, como discutido na Subseção 5.2.2, até mesmo a força gravitacional era entendida como instantânea para Newton. Outro ponto a ser mencionado é que as forças do par ação e reação são de mesma *natureza*, constituindo-se em forças externas. Assim, a hipótese representacional associada a terceira lei de Newton pode ser enunciada da seguinte forma: *a interação entre dois corpos é instantânea; dessa interação surge um par de forças de mesma natureza, direção, porém de sentidos opostos.*

A Figura 5.2.3.1 sintetiza as hipóteses e elementos contextuais mencionados nesta subseção. Na sequência, elucida-se o episódio histórico que culminou na construção da Mecânica Analítica, representada pela equação de Lagrange.

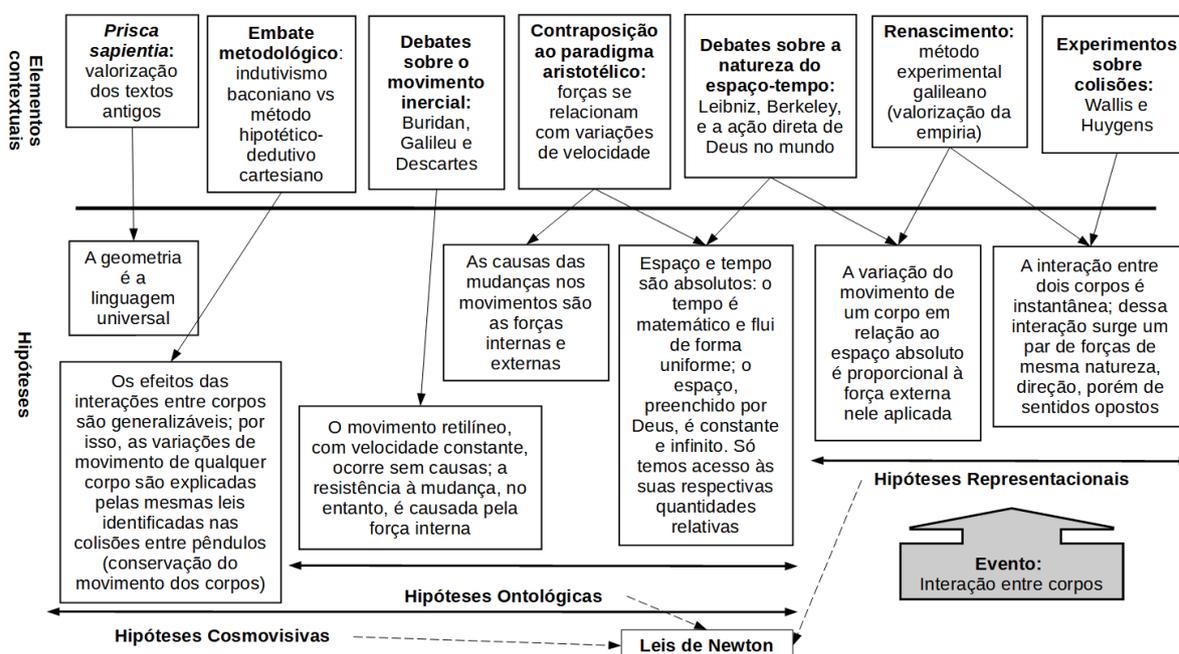


Figura 5.2.3.1: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção das Leis de Newton. O evento a ser descrito pela lei é a interação entre corpos.

5.2.4 As equações de Euler-Lagrange

Apesar de a Mecânica ter tido um avanço significativo com o aporte newtoniano, ainda estava muito distante daquilo que se entende atualmente como “leis de Newton”³². O ápice desses desenvolvimentos foi a estruturação da chamada Mecânica Analítica. O ator principal da nova formulação é Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), que, em 1788, a expôs em seu trabalho intitulado *Mécanique Analytique*, 101 anos depois do *Principia*. A obra de Lagrange foi bem-sucedida em unificar duas ciências até então distintas: a estática (Ciência do equilíbrio) e a dinâmica. Até aproximadamente Galileu, a Mecânica foi a ciência da *estática*. A partir dele, as tentativas de descrever os movimentos eram associadas à *dinâmica*, um termo cuja difusão se deve à Leibniz (Capecchi, 2021, p. 161).

Um elemento fundamental, até então desnecessário na estática, mas que permitiu o desenvolvimento da dinâmica, foi a conceitualização da noção de tempo instantâneo, facilitada pela introdução do pêndulo como instrumento para medidas temporais precisas. Com a invenção do cálculo por Newton e Leibniz e o seu subsequente desenvolvimento, o tempo passou a ser visto na mecânica não apenas como um intervalo (Δt), mas também como um tempo instantâneo (t) ou diferencial (dt) (Paty, 2004, p. 10). Entretanto, poucos matemáticos dominavam o cálculo, de forma que sua invenção não implicou imediatamente em uma ampla utilização.

Na virada do século XVIII, os trabalhos de Galileu, Huygens e Newton ainda pareciam obras desconexas, como se não fossem construções de uma mesma disciplina (Dugas, 1988, p. 269). Foi apenas de forma gradual que seus resultados foram reinterpretados e unificados. Nessa época, muitos cientistas expressavam desapontamento com a mecânica, que carecia de princípios simples e gerais. Essa sensação disparou uma série de esforços no sentido de unificar a Mecânica. Apesar da concepção newtoniana de “força” permanecer dominante nas tentativas de reformulação, seu sentido original foi modificado – eliminando, por exemplo, a noção de força interna - e enquadrado em uma abordagem cujo enfoque é baseado no conceito trabalho/energia (Pisano, 2017, p. 175). Praticamente todas as formulações alternativas tinham em comum o esforço de unificar a mecânica sob a égide do cálculo diferencial, sendo as mais bem sucedidas nesse sentido as de Leonhard Paul Euler (1707-1783) e Jean le Rond D'Alembert (1717-1783) (Guicciardini, 1999, p. 259).

Enquanto a construção de Euler era essencialmente analítica (Martins, 2021, p. 217), a de D'Alembert ainda envolvia muitos elementos geométricos, além de ser extremamente

³² Por exemplo, a equação $F=ma$ nunca foi escrita por Newton, surgindo somente 65 anos depois da publicação do *Principia*. Essa expressão foi concebida por Leonhard Euler (1707-1783) na esteira da evolução subsequente da Mecânica em um artigo intitulado *Descoberta de um novo princípio da mecânica* (Euler, 1750).

intrincada, de forma que, provavelmente, poucos eruditos contemporâneos seus conseguiam acompanhar suas deduções (Fraser, 1985, p. 32). O método “analítico” (associado à análise matemática) consistia na decomposição, calcada em princípios, de um problema complexo/geral em suas partes mais simples; já o método “sintético” (associado ao método geométrico) consistia em avançar na solução do problema a partir do mais simples e particular para o mais complexo/geral (Heath, 1921, p. 371). Como será visto, a construção de Lagrange promoveu a matematização completa da Mecânica, dispensando o método sintético em favor do analítico. Por isso, pode-se afirmar que uma hipótese cosmovisiva assumida por Lagrange é a de que *a análise matemática é a linguagem mais adequada para descrever fenômenos naturais*.

O século XVIII foi o século do Iluminismo, um século de grande efervescência e novidade, tendo a Ciência alcançado um alto prestígio. De fato, a Filosofia Natural passou a ganhar contornos do que hoje se entende por Ciência, iniciando um processo de valorização da razão nunca antes visto na história (Schneiders, 2001). Um reflexo disso é o fato de que, no continente europeu, a mecânica newtoniana não era tão respeitada como a de Descartes, tendo enfrentado severa resistência por conta de sua feição religiosa e metafísica (Panza; Malet, 2006). Entretanto, mesmo no continente surgiam tentativas de formulação da Mecânica calcada em princípios metafísicos. Talvez a formulação mais influente tenha sido concebida por Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759). Em 1746, Maupertuis publicou seu princípio da dinâmica, que ficou conhecido como *Princípio de Maupertuis*, um princípio de mínima ação. Esse princípio segue proposições filosóficas, comuns à época, segundo as quais os movimentos têm propriedades finalísticas e tudo na natureza ocorre da forma mais simples possível. Maupertuis almejava, por meio de sua construção, provar a existência de Deus (Da Silva; Martins, 2007, p. 626). Apesar de perder muitos seguidores a partir do século XVII, a noção de causa final ainda existia, especialmente por ter sido defendida por filósofos importantes como Leibniz (Guérault, 1934). Segundo o princípio de Maupertuis, quando ocorre qualquer mudança na natureza, a quantidade de *ação* necessária para essa mudança é a menor possível (mínima ação). Essa ideia é considerada um princípio de economia, associada à noção de que Deus não comete excessos. A *ação*, para Maupertuis, é entendida como o produto do momentum dos corpos pelo espaço percorrido por eles (Maupertuis, 1746).

Até 1760, Lagrange trabalhava em uma formulação da Mecânica com base no princípio de mínima ação de Maupertuis. Um dos motivos que fizeram Lagrange abandonar esse princípio foi o fato de que sua aplicação é limitada apenas a certos casos, e em condições específicas. Mesmo que algumas situações fossem corretamente descritas, a

formulação também era muito criticada por diversos cientistas pelo seu teor metafísico, um aspecto que passaria a ser renegado no século das luzes. De fato, Lagrange não tinha nenhum interesse em harmonizar o princípio de mínima ação de Maupertuis com a existência de Deus. Por exemplo, ele não se envolvia nos infundáveis debates entre a noção defendida pela Igreja da ação contínua de Deus no mundo e a concepção deísta da criação, que reconhece a evolução do universo independente da intervenção divina. Sobre o princípio de Maupertuis, Lagrange diz:

[...] essas aplicações são muito restritivas para serem usadas para estabelecer a verdade de um princípio geral. Elas também possuem algo vago e arbitrário, o que só pode tornar incerta a consequência que se poderia deduzir para a precisão do próprio princípio. [...] Eu o vejo não como um princípio metafísico, mas como um resultado simples e geral das leis da mecânica. (Lagrange, 1997, p. 183)

No excerto destacado, evidencia-se a abstenção de Lagrange em incorporar elementos metafísicos em suas teorizações. Isso acontece de fato no trabalho de Lagrange. Pode-se afirmar, portanto, que Lagrange assumia a hipótese cosmovisiva, segundo a qual o *fazer científico deve ser livre de considerações metafísicas*.

As evidências mostram que, por volta de 1760, Lagrange já tinha elementos suficientes para abandonar a formulação de Maupertuis, avançando na direção da Mecânica que seria apresentada em 1788 no *Mécanique Analytique*. Na obra, Lagrange expõe o princípio de Maupertuis, da conservação da *vis viva* e muitos outros resultados obtidos pelos cientistas ao longo do século XVIII, como meras *consequências matemáticas* do seu novo princípio, rejeitando qualquer interpretação metafísica. O elemento contextual crucial que fez Lagrange trocar o enfoque de sua pesquisa foi seu estudo sobre o Método das Variações, hoje chamado de Cálculo Variacional. Outros matemáticos além dele, como o próprio Euler, já vinham trabalhando nesse tipo de problema. Em 12 de Agosto de 1755, Lagrange escreve a Euler para informá-lo que havia conseguido avançar na solução de problemas isoperimétricos (determinação de máximo e mínimos). Nessa carta, Lagrange já usa o famoso operador δ (Lagrange, 1892, p. 140), que indica uma variação virtual, isto é, feita num tempo fixo. Na época, Lagrange ainda adotava o princípio de Maupertuis e o desenvolvimento do cálculo das variações era a ferramenta para sua aplicação. O Método das Variações de Lagrange foi publicado entre 1760-1761 no segundo volume do *Miscellanea Taurinensia* (Lagrange, 1867, p. 335-362).

Ao aplicar o método ao princípio de Maupertuis e fazendo uso do princípio de conservação da *vis viva*³³, Lagrange chegou em uma equação que envolve o somatório de dois termos, um relacionado a um enunciado muito antigo da estática, chamado *princípio ou lei do trabalho virtual*, e outro conhecido hoje como *Princípio de D'Alembert* (Lagrange, 1867, p. 365-368). Apesar de reconhecer ambos os princípios, Lagrange só os aceita explicitamente como princípios fundamentais da Mecânica no ano de 1764, em um manuscrito intitulado *Teoria sobre a libração da Lua*, que seria publicado apenas em 1777 (Lagrange, 1777). Antes de explicar o que são os princípios, discute-se a concepção de Lagrange sobre as causas do movimento.

A noção de causalidade é um princípio racional do pensamento segundo o qual se afirma que todo fenômeno tem uma causa. Tipicamente, a causalidade está associada à existência de leis de caráter necessário. Por exemplo, o fenômeno da queda dos corpos (gravidade) é causada por algum agente, que deve ser descrito por alguma lei. Assim, a lei exprime matematicamente a relação causal. D'Alembert abjeta a ideia de que as causas dos fenômenos precisam ser conhecidas para se fazer Ciência. Bastaria, segundo ele, conhecer os efeitos das causas. Nesse sentido, mantendo a ordem temporal, os efeitos das causas podem ser entendidos como as *causas* dos efeitos seguintes. D'Alembert buscava com isso extirpar as obscuridades metafísicas da Mecânica. Não se trata de negar a existência das causas, mas sim em reconhecer que não se pode, nem se faz necessário, conhecê-las. Na Mecânica, o efeito das causas é a própria mudança no movimento. Assim, pode-se dizer que, para D'Alembert, a causalidade na Física é diferencial, no sentido matemático: o estado do sistema físico em um instante (t) é a causa da variação no seu estado subsequente ($t+dt$), estando essas informações engendradas na própria forma das equações diferenciais que descrevem o sistema. Diz-se, portanto, que a causa dos movimentos é *imane*ntes às próprias equações que o descrevem (Paty, 2004, p. 28). Lagrange adotou o mesmo ponto de vista conceitual fundamental de D'Alembert, admitindo assim a hipótese cosmovisiva e ontológica de que *a causa dos movimentos é imane*ntes às equações (*causalidade diferencial*) que os descrevem.

Conforme mencionado, Lagrange baseou sua Mecânica no princípio do trabalho virtual (estática) e no princípio de D'Alembert (dinâmica). A seguir, explica-se o princípio da estática. Em um livro intitulado *History of Virtual Work Laws: A History of Mechanics Prospective*, Capecchi (2012) traça um panorama sobre a utilização e concepção das

33 Ou seja, o que foi feito foi a imposição de variações nulas na integral $\delta \int \vec{p} \cdot d\vec{s} = 0$ (princípio de Maupertuis) e na expressão da energia mecânica $\delta \left(\frac{p^2}{2m} + U \right) = 0$ (conservação da energia).

leis/princípios de trabalho virtual³⁴ existentes na Mecânica desde a Grécia antiga. Por aproximadamente dois mil anos, entre Aristóteles e Galileu, essa lei não sofreu alterações estruturais significativas, variando apenas a forma como é chamada. Pode ser considerada, portanto, o baluarte da estática. Antes de explicar como ela surgiu, apresenta-se sua formulação moderna: *um sistema mecânico com N corpos estará em equilíbrio se, e somente se, o somatório do produto escalar entre a força externa resultante (\vec{F}_i) sobre o i-ésimo corpo e seu respectivo deslocamento virtual ($\delta \vec{s}_i$) é nulo; o produto no somatório é chamado de trabalho virtual.* Ou seja (Cindra, 2008, p. 7):

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i \cdot \delta \vec{s}_i = 0 \quad (5.2.4.1)$$

As forças de reação associadas aos vínculos não entram na expressão, pois o trabalho virtual associado é sempre nulo. Um deslocamento virtual pode ser definido como um deslocamento infinitesimal possível de um elemento do sistema que seja compatível com os vínculos em um intervalo de tempo nulo, isto é, $dt=0$. Nessa situação, em vez de $d\vec{s}_i$, escreve-se $\delta \vec{s}_i$. Para obter o deslocamento virtual, tipicamente se trabalha com as equações de vínculos disponíveis. De maneira geral, supondo que $\{f_j(\vec{s}, t)=0\}_{j=1}^m$ sejam equações de vínculo do sistema³⁵, sendo $\delta \vec{s} = (\delta s_{1x}, \delta s_{1y}, \dots, \delta s_{Nz})$, tem-se, pelo diferencial total das funções: $\nabla f_j \cdot \delta \vec{s} = 0$, para $j=1, \dots, m$ (Idem, p. 5-6). Substituindo as expressões na equação 5.2.4.1, tem-se a solução de todos os problemas da estática. A seguir, mostra-se como esse princípio remonta a Aristóteles.

Em um tratado sobre o funcionamento de máquinas intitulado *Mechanica* (Problemata Mecânica), Aristóteles explica³⁶ que o funcionamento de todas as máquinas pode ser reduzido ao funcionamento da alavanca, que, por sua vez, tem suas propriedades notáveis derivadas a partir do círculo. Segundo Aristóteles:

É estranho que um grande peso possa ser movido por uma pequena força, e isso também quando um peso maior está envolvido. Pois o mesmo peso que um homem não pode mover sem uma alavanca, ele rapidamente move ao aplicar a alavanca. Agora, a causa original de todos esses fenômenos é o círculo; e isso é natural, pois de forma alguma é estranho que algo notável resulte de algo mais notável (Aristóteles, 1955, p. 331-333).

O excerto indica o elevado grau de comprometimento de Aristóteles com o paradigma platônico de adoração do círculo. A argumentação utilizada por ele para derivar a relação

34 Comumente, refere-se também como leis/princípios de deslocamento/velocidade virtual. Matematicamente, as formulações são equivalentes.

35 Nesse caso, trata-se de um vínculo holônomo, pois a restrição depende das coordenadas e do tempo.

36 Discute-se se a autoria do trabalho é de Aristóteles ou de seus seguidores (Renn; Damerow; McLaughlin, 2003, p. 46).

entre a força aplicada e o braço da alavanca é um tanto confusa, mas segue os seguintes raciocínios, sintetizados e descritos na linguagem moderna para facilitar a compreensão: a) os braços de uma alavanca descrevem arcos de círculos, digamos, de raio r_1 e r_2 ; b) a razão entre as velocidades das extremidades é proporcional à razão entre os raios, isto é: $v_1 v_2^{-1} \propto r_1 r_2^{-1}$ ³⁷; e c) o movimento/velocidade de cada braço sofre uma força de resistência inversamente proporcional à sua distância ao centro, isto é, $F \propto r^{-1}$. A Figura 5.2.4.1 (a) representa a associação dos círculos com a alavanca.

Segundo Aristóteles, o surgimento de uma força ocorre porque a construção da alavanca obriga os corpos a descreverem trajetórias que são “não naturais” para os corpos terrenos, isto é, a trajetória circular, reservada apenas para os astros perfeitos do mundo supralunar (Capecchi, 2014, p. 44). Quanto mais longe do centro o braço da alavanca, mais retilíneo é o segmento de arco descrito pelo ponto na extremidade do braço, de forma que, conforme o raciocínio elucidado, $v_1 v_2^{-1} \propto F_2 F_1^{-1}$. Anacronicamente, o resultado pode ser escrito como: $F_1 v_1 - F_2 v_2 = 0$. Lembrando que $v = ds/dt$ e usando o deslocamento virtual $ds = \delta s$ ³⁸, tem-se: $F_1 \delta s_1 - F_2 \delta s_2 = 0$. Essa equação é matematicamente equivalente à equação 5.2.4.1 quando se considera o sistema como os dois corpos na extremidade dos braços da alavanca³⁹.

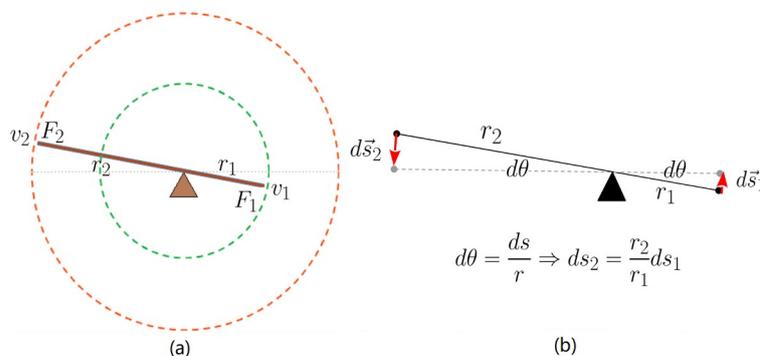


Figura 5.2.4.1: Diagrama representando uma alavanca. a) os círculos retratam as trajetórias ditas "não naturais", que seriam a causa para o surgimento do aparecimento de forças nas extremidades da alavanca; b) diagrama usado para obter a equação de vínculo.

A validade da construção aristotélica pode ser atestada substituindo a equação de vínculo mostrada na Figura 5.2.4.1 (b): como resultado, obtém-se a equação que descreve

37 De fato, na época já se sabia calcular comprimentos de arcos de círculos, o que permitia estimar a rapidez do movimento ao longo do arco. De forma anacrônica, sabe-se que $v = \omega r$. Como a haste da alavanca é rígida, as velocidades angulares dos braços são iguais. Disso resulta imediatamente a relação de proporcionalidade.

38 Nesse caso, o deslocamento possível é igual ao deslocamento virtual porque o vínculo é escleronômico (independe do tempo), como se vê pela Figura 5.2.4.1 (b).

39 Nota-se que o sinal negativo decorre do fato de que um dos deslocamentos virtuais na extremidade da alavanca tem sentido oposto à força aplicada pela alavanca. Ainda, a expressão já considera o produto escalar, pois as forças exercidas pela alavanca têm a mesma direção dos deslocamentos.

o equilíbrio em uma alavanca (a expressão ficou conhecida desde os primórdios como *lei da alavanca*), isto é, $F_1 r_1 = F_2 r_2$. Lagrange sabia que a relação usada por ele advinha dos gregos. É de se imaginar que ele pudesse ter ficado desconfortável em admitir um princípio cujas origens têm fundamentação na recém-superada Física aristotélica. Talvez por isso ele tenha se preocupado em mostrar outras formulações do mesmo princípio, porém mais modernas, como o princípio de composição de forças, e das “velocidades virtuais” (Lagrange, 1997, p.11). Lagrange explica que, apesar de equivalentes, a formulação que mais lhe parece geral é o princípio das velocidades virtuais⁴⁰ (equivalente à equação 5.2.4.1).

O princípio da dinâmica utilizado por Lagrange foi o *Princípio de D’Alembert*. Trata-se de um método de decomposição de movimentos dos corpos em três partes, que seriam os movimentos impressos, reais e destruídos. O movimento impresso é o movimento que os corpos do sistema têm antes de interagirem; o movimento real é o movimento que os corpos realmente executam, em função das forças de ação mútua (forças de vínculo). Se esses movimentos fossem os únicos impressos, os corpos manteriam os movimentos sem interferir uns com os outros. Por fim, o movimento destruído é a componente restante do movimento, e representa o movimento perdido em função das interações entre os corpos (D’Alembert, 1743, p. 50-51). A partir desses movimentos e de complicadas relações geométricas, D’Alembert conseguia, associando variações de movimento à segunda Lei de Newton⁴¹, resolver inúmeros problemas da dinâmica.

Entretanto, o que Lagrange chama de *Princípio de D’Alembert* não o é de fato. Sua interpretação do princípio aproveitou apenas a noção de “movimento perdido”, ainda que em uma versão reformulada. A ideia de Lagrange foi imaginar que um sistema dinâmico pode ser trazido ao repouso (equilíbrio) por forças aceleradoras de módulos iguais, porém sentidos contrários às forças sofridas por cada elemento do sistema em razão das interações mútuas. Em suas palavras:

Se movimentos são impostos a tantos corpos que eles [os movimentos] são forçados a serem modificados pela sua interação, é claro que esses movimentos podem ser vistos como consistindo daqueles que os corpos realmente seguiriam e outros movimentos que são destruídos, o que implica que esses movimentos devem ser tais que os corpos nos quais apenas eles são impostos estejam em equilíbrio. [...] No entanto, a dificuldade de determinar as forças que devem ser equilibradas, bem como as leis de equilíbrio entre essas forças, muitas vezes torna a aplicação desse princípio

40 Recebe o nome de “velocidades” e não “deslocamentos” virtuais em referência à formulação concebida por John Bernoulli (1667-1748), um matemático suíço que, segundo Lagrange, teria sido o primeiro a reconhecer a generalidade do princípio na estática.

41 D’Alembert fazia isso sem usar o conceito de força, que era considerado por ele como uma grandeza obscura. A Física de D’Alembert buscava eliminar conceitos que não pudessem ser claramente definidos.

[de D'Alembert] incômoda e difícil. [...] Para evitar a decomposição dos movimentos que esse princípio exige, será suficiente estabelecer diretamente o equilíbrio entre as forças e os movimentos resultantes, mas considerando-os na direção oposta. Se imaginarmos que sobre cada corpo é impresso o movimento que ele deve seguir na direção oposta, fica claro que o sistema estaria em repouso. (Lagrange, 1997, p. 179-180)

Os movimentos opostos, referidos por Lagrange, seriam proporcionados por uma força aceleradora fictícia, de módulo $-m_i \vec{a}_i$, onde m_i é a massa e \vec{a}_i a aceleração do i -ésimo corpo do sistema devido às interações mútuas com outros corpos (ou seja, sua aceleração real). Dessa forma se \vec{F}_i é a força externa sofrida pelo i -ésimo corpo, a expressão $\vec{F}_i - m_i \vec{a}_i$ representa a força responsável por mantê-lo em equilíbrio no sistema⁴². Em suma, Lagrange faz uma hipótese representacional de que *sistemas dinâmicos podem ser concebidos como estáticos quando sujeitos a forças fictícias que se opõem a sua tendência real de movimento*. Assim, ao reduzir o problema da dinâmica à estática, Lagrange pôde aplicar o princípio do trabalho virtual expresso na equação 5.2.4.1, isto é:

$$\sum_{i=1}^N (\vec{F}_i - m_i \vec{a}_i) \cdot \delta \vec{s}_i = 0 \quad (5.2.4.2)$$

Ainda em 1759, próximo à data em que desenvolveu a Matemática resultante da equação 5.2.4.2, Lagrange escreve a Euler, comentando sobre sua pesquisa em conexão com atividades de professor na Escola Real de Artilharia de Turing: “*Eu escrevi elementos de mecânica e de cálculo diferencial e integral para o uso dos meus alunos, e acredito que desenvolvi, tanto quanto é possível, a verdadeira metafísica dos seus princípios*” (Lagrange, 1892, p. 173).

Com a equação 5.2.4.2, Lagrange deduziu a forma invariante da equação diferencial de movimento (Lagrange, 1997, p. 230)

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\partial V}{\partial q_i} \quad i=1, \dots, n \quad (5.2.4.3)$$

Na equação 5.2.4.3, $\{q_i\}_{i=1}^n$ é o conjunto de coordenadas generalizadas de um sistema físico com n graus de liberdade. As quantidades T e V são funções escalares que denotam o que posteriormente seria chamado de energias cinética e potencial do sistema. A versão homogênea dessa equação é conhecida como Equação de Euler-Lagrange, em referência às contribuições de Euler no desenvolvimento do cálculo variacional. Na Física, ela ocorre quando o sistema é conservativo. A Figura 5.2.4.2 sintetiza

⁴² Ressalta-se que essa expressão não é zero porque a aceleração fictícia não é resultante da força externa, e sim das interações mútuas entre os corpos.

as hipóteses e elementos contextuais pertinentes para a construção das equações de Euler-Lagrange.

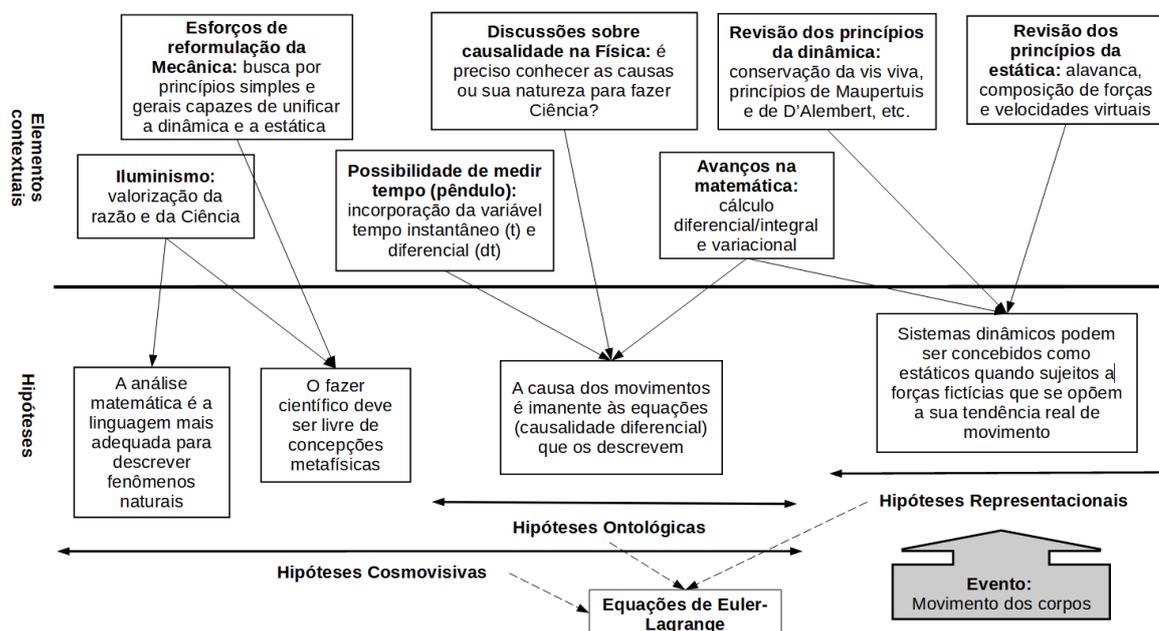


Figura 5.2.4.2: Síntese das principais hipóteses assumidas na construção das Equações de Euler-Lagrange. O evento a ser descrito pela lei é o movimento dos corpos.

5.3 CONCLUSÃO DO ESTUDO 1

A primeira questão de pesquisa que norteou este estudo foi:

QUESTÃO DE PESQUISA 1: Quais episódios históricos relevantes são adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores?

Com base no estudo bibliográfico, identificou-se que esses episódios são: “A noção de Antiperistasis de Aristóteles” (Seção 2.2); “O modelo de Queda dos Graves de Galileu” (Subseção 5.2.1); “A lei da Gravitação Universal de Newton” (Subseção 5.2.2); “As três Leis de Newton” (Subseção 5.2.3); e “As equações de Euler-Lagrange” (Subseção 5.2.4). A análise desses episódios históricos, à luz do referencial teórico-metodológico de Lima e Heidemann (2023), permitiu responder à segunda questão de pesquisa que norteou este estudo, isto é:

QUESTÃO DE PESQUISA 2: Quais são as principais hipóteses cosmovisivas, ontológicas e representacionais mobilizadas nos episódios históricos considerados adequados para serem abordados em uma disciplina de MC para formação inicial de professores?

As respostas a essa questão estão sumarizadas nas Figuras 2.2.1.1, 5.2.1.1, 5.2.2.1, 5.2.3.1 e 5.2.4.2. Após a realização do Estudo 1, os seus resultados foram aplicados em uma versão reformulada da disciplina de Mecânica Clássica para a licenciatura. Essa versão reformulada foi pautada na ênfase das hipóteses basilares na construção da MC, tendo incorporado todos os episódios históricos descritos neste capítulo e permeando as discussões na disciplina do início ao fim. O objetivo principal foi adquirir experiência prática na disciplina, coletar as primeiras impressões sobre o impacto de uma metodologia de ensino centrada nas hipóteses basilares no aprendizado dos estudantes e proporcionar subsídios para a implementação de um estudo empírico posterior (Estudo 2), pautado por referenciais didáticos e epistemológicos da TAD. Em particular, avaliou-se o impacto da explicitação das hipóteses na construção da Mecânica Clássica na tomada de consciência didática dos estudantes e na promoção da vigilância epistemológica. Essa etapa intermediária foi crucial para motivar a continuação dos estudos subsequentes, que fundamentam a tese defendida neste trabalho.

A implementação é narrada em detalhes no Apêndice A na forma de um relato de experiência, não tendo se constituído em um estudo propriamente dito. O(a) leitor(a) interessado(a) pode consultar o referido apêndice para obter detalhes sobre a experiência. Para manter a exposição concisa, apresenta-se a seguir os principais resultados obtidos a partir dessa aplicação.

As evidências indicaram que, após a disciplina os licenciandos passaram a valorizar alguns aspectos da natureza da ciência, principalmente: a) a natureza hipotética do conhecimento científico; b) a complexidade do fazer científico; e c) a consciência de que o conhecimento a ser ensinado deve minimamente remeter à sua essência, isto é, ao conhecimento original. O último aspecto é o mais próximo da noção de vigilância epistemológica. De fato, a compreensão da noção de hipótese pelos estudantes parece ter sido um fator correlacionado com o desenvolvimento de conhecimentos essenciais para o exercício da vigilância epistemológica. Entretanto, foi verificado em diversas situações que, dispor dos conhecimentos não garante a sua mobilização no processo de transposição didática. Os licenciandos tinham uma predisposição para a abertura da consciência didática ao proferir explicações aos seus pares (p. ex., em diálogos com colegas durante as aulas ou

respondendo às perguntas do pesquisador), evidenciando conhecimentos necessários para realizar a vigilância epistemológica. Mesmo assim, quando confrontados com situações hipotéticas de docência (p. ex., ao elaborar um plano de aula ou reagir a uma pergunta hipotética de um estudante do Ensino Médio), predominava o fechamento da consciência didática. Em aula, durante a disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura, os licenciandos tinham atitudes mais alinhadas com o paradigma de questionamento do mundo; no exercício (hipotético) da profissão docente, regrediam ao paradigma de visita às obras.

Em suma, o ensino com base nas hipóteses basilares da MC pautado por discussões em torno de episódios históricos munuiu os licenciandos com conhecimentos necessários para a realização da vigilância epistemológica, mas os futuros professores tinham dificuldade de mobilizar esses conhecimentos no processo de transposição didática.

Conforme será explicado no capítulo seguinte, dentre os cinco episódios históricos levantados neste capítulo, apenas um foi escolhido para fazer parte do estudo empírico (Estudo 2), sendo a base de um MER e MDR provisórios. No estudo teórico (Estudo 3), os cinco episódios são parte da construção de um MER e um MDR próprios para a formação de professores no âmbito da disciplina de MC. No capítulo seguinte, narra-se o Estudo 2.

6 ESTUDO EMPÍRICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE CONDIÇÕES E RESTRIÇÕES (ESTUDO 2)

No estudo exploratório exposto neste capítulo, tem-se o objetivo de identificar condições e restrições que precisam ser consideradas em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS, focada na preparação de futuros professores para exercerem a vigilância epistemológica na transposição das leis desse campo científico. Evidentemente, as condições e restrições emanam dos diferentes níveis de codeterminação em que a disciplina está inserida, conforme discutido na Seção 6.1.

Para concretizar os objetivos enunciados, investigou-se, a partir da implementação de um MER e de um MDR provisórios, as condições e restrições que os estudantes manifestam explícita ou implicitamente ao realizarem as tarefas propostas. A questão de pesquisa que dirigiu este estudo foi:

QUESTÃO DE PESQUISA 3: Que condições e restrições precisam ser consideradas em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS quando se pretende preparar futuros professores para exercerem a vigilância epistemológica na transposição didática dos conceitos e teorias desse campo científico?

Conforme explicado na Seção 2.1, um MER é uma representação do que estudar. Por isso, a base para a construção do MER provisório foi tomada como os elementos que emergiram do estudo bibliográfico realizado no capítulo anterior. Tratando-se da construção de um modelo provisório que, a partir dos resultados deste estudo, é aperfeiçoado no Estudo 3, optou-se por selecionar uma praxeologia específica, associada a um único episódio histórico. As condições e restrições identificadas na implementação desse modelo serão generalizadas e consideradas no processo de construção de um MER mais amplo, que abrange uma parte significativa dos saberes de MC a partir das praxeologias subjacentes a todos os episódios históricos abordados no estudo bibliográfico. O MDR, sendo um modelo de como estudar, também pode ser analisado quanto à sua efetividade, condições e restrições de implementação.

O episódio histórico escolhido para basear a construção do MER e MDR provisórios foi o retratado na Subseção 5.2.1 (“O modelo de queda dos graves de Galileu”). Alguns fatores influenciaram a escolha desse episódio. Ambientado no período histórico do

Renascimento, que testemunhou mudanças epistemológicas significativas, este episódio é particularmente interessante para evidenciar a contribuição de diversos atores no desenvolvimento científico. A era de Galileu pode ser entendida como um ponto de inflexão na história da ciência, com sua influência sendo decisiva tanto na assimilação ou substituição de conhecimentos antigos, quanto no incentivo à construção de novas teorias, assim como na adoção de novos métodos científicos. Assim, embora o episódio relacionado à teoria da Queda dos Graves seja pontual, sua compreensão exige um olhar para o passado distante e, ao mesmo tempo, permite entender o desenrolar de eventos futuros na Física, o que torna esse episódio histórico basilar no campo da MC.

6.1 A DISCIPLINA DE MECÂNICA CLÁSSICA PARA A LICENCIATURA

O contexto da disciplina onde serão desenvolvidas as novas praxeologias é influenciado por vários níveis de codeterminação que atuam de maneira interdependente. Entretanto, o nível mais importante é o institucional, que abrange as políticas e diretrizes que regulamentam a disciplina. Esse nível inclui o currículo oficial, as regulamentações nacionais e as normas da própria Universidade. O que diz a legislação sobre a formação de professores no Brasil?

Historicamente, os documentos oficiais sobre formação de professores no Brasil oscilam entre uma formação mercadológica e uma integrada. De fato, essas políticas públicas são, desde os anos 70 do séc. XX, caracterizadas por uma feição de governo, não de Estado (Cachapuz; Neto; Silva, 2020). De forma resumida, destacam-se dois momentos na história recente. O primeiro momento foi a aprovação do Plano Nacional de Educação (PNE) em 2014, que deflagrou uma nova fase de políticas públicas educacionais no Brasil (Dourado, 2015). Com a Resolução CNE/CP nº 2/2015 (Brasil, 2015), foram estabelecidas as diretrizes para a formação continuada. Essa resolução preconiza uma formação de professores humanista, vinculada com diferentes visões de mundo, pautada em preceitos de integração entre os conhecimentos teóricos e práticos, alinhando princípios gerais e fundamentos do saber com conhecimentos gerais da educação. No entanto, nos últimos anos, os esforços para aprimorar a formação de professores - conforme preconizado pela Resolução de 2015 - enfrentaram retrocessos com a Resolução CNE/CP nº 2/2019 (Brasil, 2019)⁴³. Tal documento parte do conjunto de dispositivos que integram a Base Nacional Comum para a Formação Inicial de Professores da Educação Básica (BNC-Formação), está

43 Essa resolução foi substituída em julho deste ano (portanto após a condução dos estudos descritos neste trabalho) pela resolução CNE/CP nº 4/2024 (Brasil, 2024). Estudos ainda estão sendo realizados para avaliar os impactos da nova resolução nas licenciaturas, mas isso demonstra o cenário de instabilidade educacional no país.

alinhado a uma lógica de mercado, promovendo uma formação voltada para a adaptação rápida às demandas do sistema educacional, que podem mudar constantemente. Em vez de um desenvolvimento profundo das capacidades pedagógicas, a nova resolução enfatiza o desenvolvimento de “competências” focadas na performance em exames padronizados, como o IDEB, o que restringe a autonomia docente e limita a educação a resultados mensuráveis. Neste trabalho, em consonância com a posição crítica da comunidade acadêmica (Massoni et al., 2020), defende-se os preceitos da Resolução de 2015. Atualmente, uma nova resolução atendendo essas críticas está em discussão para implementação em até dois anos.

Especificamente sobre a disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS, essa é uma disciplina de quatro créditos, totalizando 60 horas-aula, recomendada para o quarto semestre do curso de Licenciatura em Física, antes da conclusão das Físicas Gerais. Conforme já apresentado na introdução, os conteúdos abordados são: formulação vetorial da mecânica newtoniana; forças conservativas e forças centrais; sistemas de partículas: centro de massa, leis de conservação; oscilações; noções sobre o formalismo lagrangiano e hamiltoniano. Concomitantemente a essa disciplina, os estudantes cursam as seguintes: Física experimental III, Física Geral III, História da educação: história da escolarização brasileira e processos pedagógicos, Métodos computacionais aplicados à licenciatura e Psicologia da educação: a educação e suas instituições. No primeiro semestre do curso de Licenciatura, existe uma disciplina, chamada Introdução à Física, que tem uma abordagem histórica semelhante à que se pretende adotar. Os licenciandos vêm se manifestando de forma muito favorável à existência dessa disciplina.

A seguir, descrevem-se o MER e o MDR provisórios empregados na disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura de 2024/1.

6.2 MER E MDR PROVISÓRIOS ASSOCIADOS À PRAXEOLOGIA DA QUEDA DOS GRAVES

A construção pretendida nesta seção tem como principal objetivo preparar para o exercício da vigilância epistemológica, o que ficará evidente ao longo da explicação dos MER e MDR provisórios construídos. Para a construção do MER, recorre-se a uma expansão dos resultados do estudo bibliográfico exposto na Subseção 5.2.1. Nesse estudo, foram levantadas as principais hipóteses basilares associadas à construção da teoria da queda dos graves. Do ponto de vista da TAD, pode-se argumentar que o quadro de hipóteses (considerando os elementos contextuais e as hipóteses em si) representa o bloco

teórico da praxeologia em torno dos conhecimentos relacionados à teoria da queda dos graves. O quadro de hipótese evidencia não apenas a teoria subjacente - contendo os discursos que geram, explicam ou justificam as tecnologias do bloco teórico - como também as tecnologias em si.

Por exemplo, considerando o quadro de hipóteses na Figura 5.2.1.1, pode-se afirmar que os elementos contextuais “*Estudos com pêndulo: desenvolvimento de técnicas para medir tempo*” e “*Relação entre teoria e experimento físico: teorias têm reflexos tangíveis no mundo físico, não sendo meros construtos abstratos*” fazem parte de um discurso que gera, explica ou justifica tecnologias contidas na hipótese assumida por Galileu de que “*corpos em queda livre são naturalmente acelerados no tempo (argumento de simplicidade). Ou seja, $v_y \sim t$* ”. Tal hipótese contém elementos tecnológicos como “queda livre” (movimento de queda sem resistência do ar) e “naturalmente acelerados” (velocidade muda a uma taxa constante). Simultaneamente, a hipótese como um todo é entendida como parte integrante e fundamental da teoria de Galileu. Nesse sentido, o quadro de hipóteses representa as teorias e tecnologias do bloco teórico como intimamente relacionadas e indissociáveis. Tanto os elementos contextuais quanto as hipóteses contém elementos diretamente associados às teorias e aos discursos tecnológicos da praxeologia.

Para que a praxeologia seja completa, é necessário explicitar seu bloco prático. Isso não foi feito no estudo bibliográfico e precisa ser elucidado. O bloco prático contém as técnicas e os tipos de tarefas relacionadas à praxeologia. Entretanto, para que os tipos de tarefas sejam adequados para o contexto de formação de professores é preciso considerar as condições e restrições presentes na disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS. Em outras palavras, faz-se necessário considerar aspectos ecológicos e econômicos do sistema didático no qual a praxeologia em questão será desenvolvida.

A experiência didática anterior, descrita no Apêndice A, permitiu a identificação de alguns fatores ecológicos da disciplina. Como explicado no início do capítulo, a disciplina tem apenas quatro créditos, impondo um desafio significativo ao professor na hora de selecionar os conhecimentos a serem abordados. Ainda, os licenciandos têm compromisso simultâneo com cinco outras disciplinas, às quais precisam prestar provas e entregar atividades, o que restringe substancialmente o tempo extraclasse disponível. A própria disciplina tem provas e trabalhos previstos, adicionando mais carga de estudo. A preocupação com notas e avaliações é um fator que não pode ser desprezado, condicionando significativamente a dedicação dos licenciandos na realização das atividades. Fora as limitações de tempo e preocupação com notas, há poucos fatores limitantes. Condições favoráveis são a flexibilidade, do ponto de vista metodológico, das abordagens

possíveis de serem implementadas com o intuito de melhorar a relação de ensino-aprendizagem. De fato, o ambiente acadêmico da Universidade, em particular no entorno do Instituto de Física, é um espaço profícuo para a condução de estudos empíricos.

Uma vez que se pretende orientar os licenciandos no sentido de proporcionar conhecimentos para o oferecimento de situações pertinentes ao Ensino Médio, faz-se necessário uma análise de fatores econômicos e ecológicos desse ambiente. Os principais fatores ecológicos das aulas de Física no contexto do Ensino Médio brasileiro são, na maioria das instituições desse nível educacional, a falta de tempo e o baixo nível acadêmico dos estudantes (Angoti; Bastos, 2016; Da Silva, 2017; Silva et al., 2018). Embora os professores enfrentem o desafio de cobrir uma vasta quantidade de conteúdos em um curto espaço de tempo, é possível incorporar reflexões sobre a razão de ser das praxeologias em estudo, mesmo que em um nível mais superficial do que o ideal. Essa abordagem permite que os educadores não apenas transmitam o conhecimento essencial, mas também estimulem os estudantes a questionarem e compreenderem os fundamentos do que estão aprendendo. As tarefas propostas podem considerar essa realidade, promovendo a motivação e a eficiência nas estratégias de ensino de Física no nível médio, aprimorando as práticas em relação ao modelo tradicional (Bastiel, Holz e Sauerwein, 2022).

Assim, não se tem a expectativa de que, por exemplo, estudantes de Física na Educação Básica precisem dominar a teoria das razões e proporções de Galileu para calcular o deslocamento de um bloco que desliza sobre um plano inclinado. Tampouco se tem a intenção de que construam profundos conhecimentos para formularem explicações para os fenômenos da natureza baseadas em conceitos como o éter ou a mediação de Deus sobre o universo. No primeiro caso, o ensino da técnica seria incompatível com as condições e restrições anteriormente mencionadas, sendo economicamente inviável; no segundo caso, o estudante empregaria conceitos que não são válidos cientificamente, embora o tenham sido em algum momento da história. Por isso, as tarefas propostas aos estudantes no Ensino Médio devem demandar a utilização de técnicas cuja apropriação: demande pouco tempo; envolva raciocínios não-alheios à Matemática escolar usual; deixem explícitas o caráter fundacional dos conhecimentos e, ao mesmo tempo, evidenciem suas limitações. Em outras palavras, o(a) professor(a) deve ter em seu repertório didático um conjunto de tarefas de aplicação pontual, porém com alto poder generativo. Por fim, um aspecto fundamental é que, em todos os momentos, o(a) professor(a) deve ser capaz de responder a pergunta: *qual é a razão de ser da tarefa executada pelo(a) estudante?* (Chevallard, 2022, p. 185).

Na sequência, desenvolve-se os blocos práticos das praxeologias em questão associadas ao MER provisório em construção, levando em conta, em alguma medida, esses fatores. Cabe destacar que, embora os livros didáticos já propõem técnicas, tipos de tarefas e técnicas específicas de cada conteúdo aqui discutido, geralmente não tratam o arcabouço teórico sob a perspectiva das hipóteses fundamentais. Essa abordagem limitada dificulta a aquisição de conhecimentos necessários para a prática da vigilância epistemológica. Por conta disso, considera-se essencial a elucidação desses elementos.

A partir do quadro de hipóteses da queda dos graves de Galileu (Figura 5.2.1.1), construiu-se a Tabela 6.2.1, que relaciona diretamente o bloco prático com o teórico dessa praxeologia. O bloco prático é representado pela coluna “Tipo de tarefa”, enquanto o teórico pelas colunas “Elemento contextual” e “Hipótese”. O bloco prático não conta com uma coluna “técnica” porque essas são, em grande parte, idênticas às usadas pelo modelo epistemológico dominante. Por fim, observa-se na Tabela 6.2.1 que um tipo de tarefa pode estar associado a mais de um elemento do bloco teórico. Essa construção visa explicitar a razão de ser de cada tipo de tarefa que se propõe. Assim, a Tabela 6.2.1 é uma representação do MER provisório, que elucida a praxeologia relacionada com o modelo de queda dos graves de Galileu.

Tabela 6.2.1: MER provisório elucidando a praxeologia em torno da teoria da queda dos graves no topos dos licenciandos.

Elemento contextual	Hipótese	Tipo de tarefa
Redescoberta dos textos clássicos: Ciência arquimediana e aristotélica	Demonstrações baseadas em suposições apropriadas podem gerar conhecimento na Matemática e na Física	Questionar concepções epistemológicas
Relação entre teoria e experimento: teorias têm reflexos tangíveis no mundo físico, não sendo meros construtos abstratos	Corpos em queda livre são naturalmente acelerados no tempo (argumento de simplicidade). Ou seja, $V_y \sim t$	Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento
Estudos com pêndulo: desenvolvimento de técnicas para medir tempo		Identificar e explicar as nuances relacionadas à medida do tempo e sua utilização na Física.
Física medieval (séc. XIV): avanços na aplicação da Matemática à cinemática	Movimento de queda livre obedece o teorema da velocidade média (Regra de Merton). Ou seja, $y \sim t^2$.	Descrever quantitativamente o movimento de queda livre
Estudos militares: como é a trajetória de um tiro de canhão sem	Movimento horizontal dos projéteis se conserva	Discutir o papel das idealizações na

o efeito da resistência do ar?	(inércia horizontal). Ou seja: $x \sim t$	construção de teorias
Experimento de Guidobaldo com plano inclinado: trajetória de projéteis são simétricas em relação ao seu ponto mais alto	Movimentos horizontal e vertical do projétil são independentes (princípio da superposição). Ou seja, a trajetória de um projétil é parabólica.	Descrever quantitativamente o movimento de projéteis

No que segue, possíveis tarefas relacionadas com cada tipo de tarefa são apresentadas. Cabe esclarecer que a concepção das tarefas dos tipos designados na Tabela 6.2.1 pertence ao *topos* do licenciando, que mobilizará esses conhecimentos no processo de transposição didática. Essas tarefas são colocadas apenas a título de exemplo, já que um número infinito delas podem ser criadas em cada caso, a depender da criatividade e objetivos do(a) professor(a).

- 1) **Questionar concepções epistemológicas:** “Em que medida os fenômenos da natureza podem ser apreendidos pela linguagem humana? Qual linguagem é a mais apropriada para descrever fenômenos naturais? De maneira geral, como os cientistas produzem conhecimento?”
- 2) **Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento:** “Dentre as possíveis alternativas, qual melhor descreve a velocidade de queda de corpos próximos à superfície da Terra? a) $v_y = t^2$; b) $v_y = t$; c) $v_y = \sqrt{t}$; d) $v_y = 2t$. Justifique tendo em vista o pensamento de Galileu”.
- 3) **Identificar e explicar as nuances relacionadas à medida do tempo e sua utilização na Física:** “O tempo é uma dimensão fundamental, na qual os eventos ocorrem em uma sequência ordenada. Por que não se usava o tempo na descrição de fenômenos da natureza à época de Galileu? Como e por que se media o tempo? Quais eram as principais dificuldades envolvidas? Qual a diferença entre tempo (t) e intervalo de tempo? Por que não é possível estudar a queda livre dos corpos usando pêndulos? Como Galileu resolveu esse problema?”.
- 4) **Descrever quantitativamente o movimento de queda livre:** “Qual é a distância percorrida por um corpo que, partindo do repouso, aumenta sua velocidade uniformemente até 20 m/s em 5 s? A aceleração deste corpo é maior ou menor do que a da gravidade? Que distância um corpo em queda livre percorre em 1 s?”
- 5) **Discutir o papel das idealizações na construção de teorias:** “Que situação hipotética foi usada por Galileu para argumentar em favor da inércia? Segundo ele,

porque não se observa a conservação do movimento no dia a dia? Que componente do movimento dos projéteis seria conservada?”.

- 6) **Descrever quantitativamente o movimento de projéteis:** “Um projétil é lançado horizontalmente do alto de um prédio de 40 m de altura com velocidade de 5 m/s. a) Quanto tempo o projétil demora para tocar o solo? b) Qual a distância horizontal percorrida? c) determine a equação que descreve o formato da trajetória do projétil”.

Nota-se que a realização dessas tarefas evoca necessariamente alguma técnica, bem como os elementos contextuais e hipotéticos do bloco teórico, conforme explicitado na Tabela 6.2.1. Por exemplo, o tipo de tarefa 1) problematiza a própria capacidade da Física em representar fenômenos naturais, seja por meio da linguagem, seja por meio de relações matemáticas; as tarefas dos tipos 2) e 5) são parecidas em natureza, já que explicitam como o saber é apoiado em postulados, nesses casos, especificamente os postulados de simplicidade e de conservação do movimento em uma situação ideal (sem resistência do ar). O tipo de tarefa 3) gera muitas tarefas possíveis, pois o conceito de tempo em si é muito abstrato e portanto de difícil apreensão. A falta de enfoque no significado desse conceito pode ser um empecilho ao entendimento posterior do significado de tempo absoluto e relativo. Por fim, os tipos de tarefas 4) e 6) são aplicações usuais dos conhecimentos relacionados a essa praxeologia, evocando técnicas associados a cálculos algébricos e soluções de equações de primeiro e segundo grau; se fossem desvinculadas dos elementos do bloco teórico, as tarefas seriam facilmente identificáveis com o paradigma de visita as obras, desprovidos de razão de ser.

Com isso, considera-se como completa a construção do MER provisório. Sendo este um modelo de referência sobre “o que estudar”, ele provê os elementos necessários, mas não suficientes para a realização da vigilância epistemológica. A questão seguinte, de importância equivalente, é respondida pelo MDR provisório: “como estudar?”. Neste estudo, adota-se o esquema herbatiano como MDR para planejar e analisar as atividades didáticas desenvolvidas (vide Seção 6.3). As três principais dialéticas de estudo serão consideradas neste modelo provisório, completando assim a cronogênese, mesogênese e topogênese da investigação. A seguir, descreve-se a metodologia de ensino.

6.3 METODOLOGIA DE ENSINO

Nesta seção, apresenta-se a metodologia de ensino empregada na disciplina de forma resumida. Um relato circunstanciado, incorporando os detalhes dessa metodologia, está disponível no Apêndice D.

Evidentemente, a dialética das perguntas e respostas não admite, no MDR adotado, uma estrutura rígida, na qual o tipo de perguntas e respostas, bem como sua sequência, são previamente definidas. Entretanto, a atividade didática pode se beneficiar de um modelo a ser seguido (assim como o MER é um modelo ideal da praxeologia). Tal modelo é inspirado na construção proposta por Ruiz-Olarría (2015), que argumenta que as praxeologias a serem ensinadas e as praxeologias para o ensino podem ser construídas com os licenciandos por meio da busca por respostas às mesmas questões que guiaram a construção do MER. Essas questões são trazidas explicitamente no contexto de ensino e orientam os gestos didáticos descritos a seguir.

Inicialmente, os licenciandos foram expostos a discussões introdutórias sobre a natureza da ciência, com ênfase no papel das hipóteses no desenvolvimento do conhecimento científico. Isso levou à apresentação de uma questão geradora, a partir da qual outras questões foram derivadas. A Tabela 6.3.1 apresenta um panorama da metodologia de ensino empregada.

A aplicação se deu ao longo de nove encontros, paralelamente à discussão de outros tópicos que fazem parte da súmula da disciplina. A Tabela 6.3.1 informa os temas abordados em cada aula, as questões norteadoras (iniciando pela questão geradora Q0) e as tarefas solicitadas. O estudo da questão Q0 iniciou por um texto elaborado especialmente para a disciplina contendo uma narrativa dos cinco episódios históricos abordados. Daqui em diante, chama-se esse texto de texto da disciplina (Weber; Heidemann, 2024). O texto da disciplina resulta de adaptações a partir dos resultados do estudo bibliográfico (expostos nas Subseções 2.2.1, 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4), dos quais foram removidas menções a elementos do referencial teórico de hipóteses ou sobre a TAD. Resumidamente, pediu-se que os estudantes realizassem uma tarefa prévia à aula, que consistiu na leitura do texto da disciplina, antes da discussão do tópico em aula. Os licenciandos deveriam extrair elementos teóricos e práticos (respostas às Q1 e Q2), correspondendo ao bloco teórico da praxeologia de Queda dos Graves e os tipos de tarefas. Esses elementos foram incorporados num portfólio *online*, ao qual os estudantes podiam ter acesso irrestrito para interagir por meio de comentários, porém sem permissão de edição de conteúdo. Os textos da disciplina foram a principal *media* à disposição dos estudantes para construção de respostas às questões, embora a utilização de outros materiais tenha sido incentivada. O portfólio, identificado como o *milieu* da investigação, reunia as tarefas realizadas e as respostas dos estudantes, sendo um testemunho do processo de estudo⁴⁴.

44 Uma versão anônima do portfólio é acessível por este link: http://www.if.ufrgs.br/gpef/mc_licenciatura/Portfolio_Anonimo_Milieu_Queda_dos_Graves.pdf. Último Acesso: 30/09/2024.

Na sequência, levando em conta os elementos teóricos e práticos, os licenciandos construíram tarefas (resposta à Q3) adequadas ao nível de Ensino Médio. Por fim, em resposta à questão Q4, sugeriu-se a criação de um diagrama, inspirado nos mapas comumente utilizados nos PEP (Winsløw et al., 2013; Barquero et al., 2018), no qual ficam evidentes as perguntas formuladas e respectivas respostas. Esse diagrama é doravante denominado diagrama Q-R. Nesse diagrama, os licenciandos foram orientados a formular uma questão geradora (Q_0) que, ao ser respondida por meio de uma ramificação de perguntas (Q_1, Q_2, \dots) e respostas (R_1, R_2, \dots) derivadas, tivesse o potencial de esclarecer o maior número possível de conhecimentos relacionados ao modelo de Queda dos Graves. Assim formulado, o diagrama Q-R elucida o processo de construção da praxeologia como uma sucessão de respostas obtidas a partir de questionamentos prévios, tendo assim o potencial de servir de inspiração para uma transposição didática mais reflexiva, alinhada com a noção de vigilância epistemológica. Diagramas Q-R construídos pelos licenciandos são mostrados na seção de resultados. A totalidade dos diagramas Q-R produzidos encontram-se no portfólio.

Tabela 6.3.1: Panorama da metodologia de ensino empregada.

Aula	Temas abordados	Questões norteadoras	Tarefas solicitadas
1	Debates com os estudantes sobre o papel da Mecânica Clássica no Ensino Médio e alternativas para seu ensino.	Q0 – Como ensinar a teoria da queda dos graves destacando o caráter hipotético-dedutivo da ciência e a razão de ser do conhecimento?	Leitura do texto da disciplina sobre a praxeologia da queda dos graves.
2	Teoria das razões e proporções na antiguidade.		
3	Ciência grega.	Q1 – Quais elementos contextuais e hipotéticos (elementos teóricos) foram assumidos por Galileu na construção de sua teoria? Q2 – Quais tipos de tarefas (elementos práticos) podem ser úteis, no contexto do Ensino Médio, para evidenciar o caráter hipotético-dedutivo do conhecimento?	Extração de elementos teóricos e práticos do texto da disciplina. Envio dos elementos por um formulário online.
4	Força impressa e física do impetus. Redescoberta dos textos clássicos e movimento renascentista.		
5	Discussão sobre os elementos teóricos e práticos extraídos do texto. Física de Galileu: aplicações da	Q3 – Que tarefas específicas podem dar sentido a um único par de elementos teóricos e práticos?	Construção de duas tarefas relacionadas com a praxeologia da

	teoria das razões e proporções;		queda dos graves. Envio das tarefas por um formulário online.
6	Física de Galileu: movimentos natural, violento e neutro;		
7	Discussão sobre as tarefas construídas. Física de Galileu: queda dos graves	Q4 – Quais questões problemáticas que, no contexto do Ensino Médio, explicitam a razão de ser do conhecimento relacionado à queda dos graves?	Construção do diagrama QR
8	Elaboração do diagrama QR em aula.		
9	Discussão sobre os diagramas QR construídos e o material no portfólio.	Resposta à Q0	-

A seguir, descreve-se de forma sucinta o encadeamento dos temas abordados (segunda coluna da Tabela 6.2.1). As exposições orais realizadas na primeira aula foram centradas em discussões sobre o caráter hipotético-dedutivo do conhecimento científico, e como esse aspecto é frequentemente ignorado no ensino da Física, em particular na construção de Galileu (Q0). Argumentou-se que, para conhecer as hipóteses basilares do conhecimento científico, faz-se necessário entender o passado. Guiados pelas questões Q1 e Q2, buscou-se, até a quarta aula, trazer elementos da ciência antiga, como a teoria das razões e proporções e as contribuições dos cientistas do mundo helenístico e árabe. Concomitantemente a essas aulas, os estudantes deviam realizar a tarefa de leitura. Nas aulas 5 e 6, discutiram-se aspectos centrais da teoria de Galileu, conectando com os elementos teóricos e práticos extraídos pelos licenciandos. Nessa semana, iniciou-se o questionamento sobre como trazer essas discussões para o Ensino Médio, na forma de tarefas (Q3). As tarefas criadas pelos licenciandos foram discutidas na semana seguinte, buscando avaliar sua adequação ao nível médio e seu potencial para ilustrar o caráter hipotético do conhecimento. Por fim, guiados pela questão Q4, solicitou-se a construção do diagrama Q-R, explicando que essa seria uma forma de representar os conhecimentos estudados. Ao final da aplicação, na aula 9, retomou-se a questão Q0 com os licenciandos, que agora dispunham de mais conhecimentos para respondê-la. Mais informações sobre a metodologia, como o topus das posições de licenciando e professor estão descritas em maiores detalhes no Apêndice D.⁴⁵

⁴⁵ Os slides utilizados nos nove encontros se encontram neste link: http://www.if.ufrgs.br/gpef/mc_licenciatura/Slides_Queda_dos_Graves.pdf. Último Acesso: 30/09/2024.

A seguir, elucida-se a metodologia de pesquisa empregada no Estudo 2.

6.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Pela natureza da questão de pesquisa que motivou este estudo exploratório, optou-se por conduzir a pesquisa no contexto de aulas de Física, em nível de graduação, de uma turma do primeiro semestre letivo de 2024, da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os estudantes eram todos do curso noturno de Licenciatura em Física. Conforme será explicado, esse contexto é propício para a realização de um estudo de caso, seguindo as orientações metodológicas de Robert Yin (2005, 2011).

Tomou-se a turma como o caso e seus estudantes como unidades de análise, de forma que o estudo se caracteriza como um estudo de caso único incorporado. Considerou-se que as interações da turma de estudantes, objeto da investigação realizada, constituem um fenômeno contemporâneo em seu contexto real de ocorrência, com fronteiras entre o fenômeno e seu contexto não claramente definidas. Nesse sentido, a turma de estudantes fornece o ambiente natural e autêntico para a exploração do ensino de Física, constituindo-se um caso profícuo para investigar a questão de pesquisa formulada. Além disso, os estudantes são unidades de análise adequadas, pois seus comportamentos, percepções e interações no ambiente de aprendizagem fornecem uma rica fonte de dados para entender o fenômeno sob investigação, conforme sugerido por Yin. Desse modo, a metodologia de estudo de caso de Yin foi considerada adequada para a investigação.

Todos os participantes da pesquisa assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido (disponível no Apêndice C), informando que a pesquisa ocorre respeitando princípios éticos, dentre eles o de não divulgação das suas identidades, e o uso das suas imagens apenas para fins acadêmicos. Por isso, em vez de nos referirmos pelos seus nomes, usaremos a denominação Estudante 1, Estudante 2, etc.

Na subseção seguinte, apresentam-se os instrumentos de coleta de dados utilizados no Estudo Exploratório.

6.4.1 Instrumentos de coleta de dados

Segundo as orientações metodológicas de Yin, a coleta de dados deve incluir o uso de uma multiplicidade de fontes de evidência, cada uma servindo como complemento da outra, buscando-se desenvolver linhas convergentes de investigação por meio de um

processo de triangulação. Nesta pesquisa, foram utilizados os seguintes instrumentos de coleta de dados: a) caderno de campo; b) gravações de áudios das discussões em sala de aula; c) questionários respondidos nas tarefas; d) portfólio; e) diagramas Q-R construídos pelos(as) estudantes; e f) entrevista semiestruturada com gravação de vídeo. O roteiro da entrevista se encontra no Apêndice E.

As entrevistas semiestruturadas foram realizadas após o término das atividades. Com o objetivo de identificar condições e restrições, as entrevistas visavam avaliar as impressões dos participantes sobre o MER e MDR provisórios construído, os percalços durante a execução das atividades, as maiores dificuldades e também as suas impressões gerais sobre a factibilidade da proposta. As entrevistas foram conduzidas com 10 participantes da pesquisa, individualmente. A flexibilidade proporcionada por esta modalidade de entrevista se mostrou benéfica para a natureza exploratória do trabalho. Com um roteiro de perguntas preestabelecido, mas não imutável, foi possível explorar profundamente as perspectivas e experiências dos participantes, adaptando as questões conforme as peculiaridades das respostas e a dinâmica da conversa. Cada participante teve a oportunidade de expressar suas vivências, percepções e compreensões em suas próprias palavras, o que permitiu a obtenção de *insights* valiosos.

A combinação de diferentes abordagens e métodos de coleta de dados permitiu a construção de uma imagem mais completa e robusta do caso em estudo, contribuindo significativamente para a qualidade e profundidade dos dados coletados, e, conseqüentemente, para a riqueza e robustez das análises e conclusões.

Na subseção seguinte, ilustra-se a metodologia de análise de dados empregada.

6.4.2 Metodologia de análise dos dados

A metodologia de análise de dados proposta por Yin compreende várias etapas, incluindo examinar, categorizar, tabular, testar e combinar os dados quantitativos e qualitativos coletados para esclarecer as proposições teóricas em investigação (Yin, 2002, p.109). Yin (2011) reconhece que esse não é um procedimento linear, sugerindo que o pesquisador pode precisar alternar entre as etapas conforme necessário, até que as evidências possam ser utilizadas da maneira adequada para responder às questões de pesquisa. Essas etapas incluem compilação, desconstrução, reconstrução, interpretação e conclusão. A seguir, elucida-se como essas etapas foram aplicadas neste estudo.

A fase de compilação envolveu uma revisão detalhada de todos os dados obtidos a partir das diferentes fontes de evidências ao longo da pesquisa. Isso proporcionou ao pesquisador uma visão ampla das informações disponíveis, possibilitando a organização dos registros. Depois, o pesquisador selecionou trechos de evidências que poderiam ser úteis para responder à questão de pesquisa formulada. Esses trechos foram incorporados em uma matriz de análise qualitativa, destinada a facilitar o acesso e a verificação rápida das informações. Assim, todos os dados coletados foram compilados. Para todos os dados, foram usadas planilhas eletrônicas que permitiam a filtragem por colunas. Editores de texto eletrônicos também foram usados para organizar os dados. Ao concluir esta etapa, o pesquisador possuía um banco de dados onde os elementos relevantes para responder às questões de pesquisa foram armazenados.

Por exemplo, após a realização da atividade que envolvia a extração de elementos teóricos do texto da disciplina, foi construída uma tabela contendo os elementos teóricos identificados pelos estudantes. A tabela apresentava cinco colunas principais: 1) números correspondentes aos licenciandos; 2) transcrições dos elementos teóricos extraídos pelos licenciandos; 3) elementos teóricos sintetizados pelo pesquisador, que agrupou as expressões semelhantes da coluna 2; 4) um número que identifica cada elemento teórico sintetizado pelo pesquisador; e 5) a correspondência entre os elementos da coluna 2 e suas classificações, conforme os números da coluna 4.

Seguindo a etapa de compilação, ocorreram as etapas de desconstrução e reconstrução dos dados. Na desconstrução, fragmentos ou pedaços de dados que eram de interesse para a análise foram extraídos do banco de dados. Isso foi feito através da criação de marcadores que classificam os fragmentos de evidência, tornando mais fácil consultar e comparar com outras evidências durante fases posteriores da análise. Neste estudo, cada excerto foi classificado com marcadores qualitativos específicos, que indicam: a) o(s) estudante(s) referenciado(s) pela evidência; b) a origem da evidência (por exemplo, resposta à questão 1); c) o construto ao qual a evidência se refere (por exemplo, se a evidência se referia a algum elemento do MER provisório ou não) d) a evidência em si; e e) o tipo de evidência, que pode ser positiva (+1), negativa (-1) ou inconclusiva (0). Uma evidência foi considerada positiva/negativa (+1)/(-1) quando os excertos indicavam/não indicavam alinhamento com o referencial teórico adotado. Por exemplo, sobre a atividade envolvendo os elementos teóricos, o Estudante 3 escreveu: "*Representação da queda de objetos na superfície da terra*". O excerto elucida o objeto da teoria da queda dos graves, e não um elemento teórico. Assim, esse excerto foi marcado com (-1). Já a Estudante 1 escreveu, na mesma atividade: "*Corpos em queda livre são naturalmente acelerados no*

tempo". Esse excerto foi marcado com (+1), pois descreve uma hipótese assumida por Galileu que faz parte do bloco teórico da teoria da queda dos graves. A evidência foi considerada inconclusiva (0) quando era confusa ou pouco clara. Por exemplo, na mesma atividade anteriormente ilustrada, o Estudante 6 escreveu: "A velocidade dos objetos se altera de maneira proporcional". Esse excerto é confuso, pois não especifica a que variável a velocidade é proporcional. Um exemplo de desconstrução aconteceu após o envio dos elementos teóricos por meio do questionário. Cada elemento teórico sugerido pelos estudantes (alguns estudantes enviaram mais de 10 elementos teóricos) foi classificado pelo tipo de evidência (+1, -1 ou 0) e pelo seu construto (qual elemento praxeológico do MER provisório era compatível).

A etapa de reconstrução, que se segue à desconstrução, envolve a criação de diferentes dimensões de análise. Aqui, os dados são reorganizados para oferecer uma nova perspectiva sobre algum aspecto de interesse. Esse processo teve o objetivo de organizar os dados de maneira a fundamentar conclusões que pudessem dar suporte às proposições teóricas. De acordo com Yin, essa fase é crucial para o sucesso do pesquisador, cuja tarefa é criar uma narrativa argumentativa, fundamentada nas evidências coletadas, que suporte as conclusões alcançadas. Por exemplo, uma dimensão de análise criada foi o nível de compatibilidade dos elementos teóricos sugeridos pelos estudantes com o MER provisório. Isso demandou a reconstrução pela aglutinação dos construtos semelhantes, o que permitiu uma visão holística sobre os dados coletados.

Em todo o processo de análise de dados, seguindo as recomendações de Yin, foi feito um esforço para encadear as evidências, estabelecendo uma ligação clara entre elas e as conclusões alcançadas. Sempre que possível, o pesquisador baseou cada conclusão em mais de um dado; por esse motivo, foram estabelecidos vários planos de análise, que permitiram a triangulação das evidências. Por exemplo, com frequência a performance dos estudantes nas diferentes atividades era notadamente correlacionada, corroborando as impressões obtidas em uma dimensão de análise. Por fim, o pesquisador se esforçou para manter a imparcialidade, baseando-se nas fontes de evidência para construir conclusões e minimizando interpretações tendenciosas que poderiam apoiar uma concepção prévia que não correspondesse aos dados coletados.

A seguir, apresenta-se os resultados.

6.5 RESULTADOS

Dos 13 estudantes matriculados na disciplina, 11 participaram da pesquisa, já que dois estudantes evadiram logo nas primeiras semanas. Assim, a pesquisa contou com 11 participantes, sendo oito homens e três mulheres, com média de idade de 28,1 anos e desvio padrão de 14,5 anos⁴⁶. Nem sempre os 11 participantes realizavam as tarefas propostas. Por conta disso, alguns instrumentos de coletas de dados proporcionaram informações referentes a um subconjunto desse universo.

O caderno de campo foi utilizado em todas as aulas observadas. No total, o pesquisador observou nove encontros, totalizando 18 horas-aula de imersão em campo. Nem sempre foi possível acompanhar as discussões que ocorreram na sala de aula, muitas vezes, com falas simultâneas, de forma que foi frequente o uso do gravador de voz⁴⁷, possibilitando assim a transcrição de trechos que sem ele teriam se perdido. Os questionários forneceram a maior quantidade de informações ao pesquisador, pois era por meio dos questionários que os estudantes entregavam as respostas às questões Q1, Q2 e Q3. O primeiro questionário foi entregue na primeira semana, contendo os elementos teóricos e práticos que os estudantes associaram à praxeologia; o segundo questionário foi entregue na segunda semana, contendo as tarefas. Na terceira semana, os estudantes entregaram o diagrama Q-R via plataforma Moodle.

Após a tarefa de leitura sobre o episódio histórico da Queda dos Graves, nove participantes responderam individualmente ao questionário eletrônico onde se solicitava que listassem elementos teóricos e práticos associados à praxeologia mobilizada por Galileo para representar a Queda de Graves. Como resultado, foram gerados 63 elementos teóricos e 46 elementos práticos. O agrupamento dos elementos semelhantes permitiu sua aglutinação em 14 elementos teóricos e 22 elementos práticos.

Conforme exposto na Tabela 6.5.1, os elementos teóricos que emergiram da análise foram rotulados de um a 14 na ordem da frequência (número entre parênteses precedendo os respectivos enunciados) com que surgiram nos questionários. Os elementos teóricos de um a 13 foram redigidos pelo pesquisador para sintetizar elementos teóricos semelhantes propostos pelos estudantes. O último elemento teórico (14^o) é a transcrição *ipsis litteris* da escrita da Estudante 7, a única que mencionou esse elemento teórico em questão.

46 Dois participantes tinham idades mais avançadas. Excluindo esses dois participantes, a média de idade seria 21,7 com desvio padrão 2,2.

47 Os excertos de voz foram gravados por meio de um programa de celular e posteriormente salvos no computador onde os dados referentes à pesquisa foram armazenados.

Tabela 6.5.1: Elementos teóricos evocados pelos estudantes. A primeira coluna é o rótulo atribuído ao elemento teórico e o número entre parênteses precedendo o enunciado informa o número de vezes que o elemento foi evocado.

TAG	Elementos teóricos (Bloco teórico da praxeologia)
1	(9) A Matemática tem um papel de destaque nas teorizações sobre a Filosofia Natural (inauguração de uma “nova ciência”).
2	(7) A melhor explicação para os fenômenos é sempre aquela mais simples e econômica (navalha de Ockham).
3	(6) Todos objetos, independentemente do peso, caem à mesma velocidade.
4	(6) Os movimentos horizontal e vertical do projétil são independentes entre si, acontecendo simultaneamente. Isso implica uma trajetória parabólica.
5	(6) Um corpo em movimento horizontal permaneceria em movimento perpétuo nessa direção na ausência de resistências (Inércia horizontal/circular).
6	(5) Crença na existência do vácuo.
7	(4) Corpos em queda livre (sem resistência) são naturalmente acelerados no tempo.
8	(4) A distância percorrida por um corpo uniformemente acelerado em um intervalo de tempo t é a mesma percorrida por um corpo com uma velocidade constante dada pela média das velocidades inicial e final do corpo no mesmo intervalo de tempo.
9	(4) A Filosofia Natural pode descrever a realidade por meio de representações simplificadas (modelos).
10	(4) O conhecimento pode ser construído a partir do racionalismo e de observações.
11	(2) Graves são objetos sujeitos à ação da força da gravidade.
12	(2) Uma força mínima aplicada horizontalmente a uma esfera poderia movê-la não fossem as resistências externas e a inclinação do plano.
13	(2) O intervalo de tempo pode fazer parte das descrições dos fenômenos naturais (pêndulo surge como instrumento de medida de intervalos de tempo).
14	(1) “Nos lançamentos oblíquos, a trajetória é simétrica”.

Como se nota pela frequência entre parênteses, após a leitura do material didático, todos os nove respondentes ao questionário evocaram o elemento teórico rotulado com o número um. Por exemplo, o Estudante 8 enunciou esse elemento da seguinte forma: “*Uma ‘nova ciência’ é inaugurada, em que a Matemática tem um papel de destaque nas teorizações sobre a Filosofia Natural*”; já a Estudante 7, referindo-se ao mesmo elemento teórico, escreveu “*A Ciência pode ser descrita por números e leis matemáticas (liberdade*

das amarras do pensamento escolástico). Por exemplo, o uso da geometria para explicar movimento”. Esses excertos indicam que os estudantes compreenderam que a Ciência galileana pertence a uma nova classe, pautada principalmente pelo emprego da Matemática, o que é compatível com a hipótese “Demonstrações baseadas em suposições apropriadas podem gerar conhecimento na Matemática e na Física” (ver Tabela 6.2.1).

O segundo elemento teórico, evocado por sete estudantes, foi o princípio da simplicidade, aludido no MER pela hipótese “Corpos em queda livre são naturalmente acelerados no tempo (argumento de simplicidade) (ver Tabela 6.2.1). Ou seja, $v_y \sim t$ ”. Sobre isso, a Estudante 1 escreveu: “*Influenciado pela navalha de Ockham, a explicação [de Galileu] para os fenômenos é sempre aquela mais simples e econômica*”. Os elementos teóricos rotulados com 3, 4 e 5 foram evocados, cada um, por seis estudantes. A seguir, a título de exemplo, explicita-se um enunciado para cada um deles: 3º - “*Todos os ‘graves’ (objetos sujeitos a ação da gravidade), independentemente do peso, caem à mesma velocidade em um vácuo*” (Estudante 4); 4º - “*Movimentos horizontal e vertical são independentes, e acontecem simultaneamente em um lançamento oblíquo*” (Estudante 6); e 5º - “*O corpo uma vez movido, permaneceria em movimento indefinidamente (Inércia Horizontal)*” (Estudante 1). Como nos casos dos elementos teóricos 1 e 2, um exame da Tabela 6.2.1 mostra que os elementos teóricos 3, 4 e 5 levantados pelos estudantes são compatíveis com o MER proposto.

Por outro lado, alguns elementos teóricos do MER não foram evocados com tanta frequência quanto os explicitados no parágrafo anterior. É o caso, por exemplo, do 14º enunciado teórico, compatível com o elemento contextual “Experimento de Guidobaldo com plano inclinado: trajetória de projéteis são simétricas em relação ao seu ponto mais alto” (ver Tabela 6.2.1), o qual foi citado apenas pela Estudante 7. Outros elementos teóricos significativos que foram pouco evocados (apenas por dois estudantes cada), foram os elementos 13º, 12º e 11º. Por exemplo, o Estudante 12 expressou o 13º elemento escrevendo “*Introdução do tempo, na explicação dos fenômenos, medido em intervalos, com pêndulos como ferramenta de medição*”. No MER, esse enunciado corresponde ao elemento contextual “Estudos com pêndulo: desenvolvimento de técnicas para medir tempo” (ver Tabela 6.2.1). Para exemplificar os enunciados referentes aos outros elementos teóricos pouco citados, podem ser citados: 12º - “*O movimento pode surgir a partir da estática através da aplicação de forças infinitesimais, desprezíveis matematicamente, porém suficientes para romper o equilíbrio*” (Estudante 12); e 11º - “*Graves são objetos sujeitos à ação da gravidade*” (Estudante 7). Novamente, a análise comparativa com a Tabela 6.2.1

mostra que os elementos teóricos 12 e 11 levantados pelos estudantes são compatíveis com o MER proposto.

Durante o processo de análise e aglutinação dos elementos teóricos, foi possível identificar os primeiros possíveis percalços dos estudantes. A análise evidenciou que dois estudantes produziram enunciados vagos ou incompatíveis. O Estudante 3 gerou 10 enunciados teóricos, sendo que dois deles foram incompatíveis com a proposta, a saber: “*Representação da queda de objetos na superfície da terra*” e “*Objetos não caem com velocidade proporcional a sua massa*”. No primeiro enunciado, o estudante descreve o objeto da praxeologia, não seus elementos teóricos; no segundo, o enunciado é colocado como a negação de um fenômeno, e não na sua afirmação, o que era incomum nas ciências naturais à época de Galileu (e ainda hoje). O Estudante 6 produziu nove enunciados, sendo dois deles colocados de forma vaga e imprecisa, como: “*A velocidade dos objetos se altera de maneira proporcional*”. Esses enunciados não foram aglutinados em nenhum elemento teórico, tendo sido excluídos da análise.

Nas entrevistas individuais, perguntou-se aos estudantes se tiveram dificuldades para identificar elementos teóricos do material estudado e se a explicitação desses elementos os auxiliou a compreender melhor a teoria sobre queda dos graves. Quatro estudantes avaliaram a tarefa como fácil e quatro afirmaram ter tido dificuldades no início, mas a tarefa se tornou gradualmente mais fácil com o tempo. Apenas o Estudantes 11 e 12 disseram que a tarefa foi difícil. A Estudante 7 descreveu o processo de identificar elementos teóricos como: “[...] *é como se tu tivesse fazendo um resuminho, tipo um highlights. Achei legal, pra mim funciona*”. Sobre a identificação dos elementos teóricos no texto, a Estudante 10 afirmou:

Eu senti que eu não fui capaz de identificar todos os elementos teóricos que estavam contidos ali... quando a gente trazia isso pro grande grupo eu via que não tinha só a minha visão sobre a leitura do texto... às vezes eu interpretava alguma coisa no texto e eu via que outra pessoa interpretou com outras palavras e aquilo fazia sentido da mesma forma, sabe. Eu achava essa parte da discussão bem importante.

Sobre a compreensão da teoria da queda dos graves, oito estudantes relataram que a explicitação dos elementos teve impacto positivo e dois disseram não ter gostado. Dentre os que gostaram, o relato mais comum é sintetizado pela fala do Estudante 4:

Eu acho que ajudou, porque essa questão da separação auxilia tu pegar um assunto complexo e dividir ele em partes. Entendendo cada parte, tu entende ele melhor no todo, né? Ai tu entende como as partes se relacionam. Achei bem válido essa ideia.

Os Estudantes 3 e 11 relataram não ter gostado de realizar a tarefa. Para o Estudante 11, a atividade foi muito trabalhosa; o Estudante 3 preferia que os elementos teóricos fossem explicados diretamente pelo professor e não extraídos no coletivo. Três estudantes relataram que, apesar do esforço cognitivo envolvido no processo de extração de elementos teóricos ter sido maior do que simplesmente responder perguntas sobre o texto, esse esforço valeu a pena, pois sentiram que tinham um conhecimento mais sólido após a leitura.

Os elementos práticos que emergiram da análise foram rotulados de um a 22. Como feito nos elementos teóricos, os tipos de tarefas de números entre um e nove foram redigidas pelo pesquisador para sintetizar tipos de tarefas semelhantes. Já os tipos de tarefas de números 10 à 22 são transcrições das respostas dos próprios estudantes. No total, os nove respondentes do questionário produziram 46 elementos práticos. Mesmo que o número de elementos práticos tenha sido menor do que teóricos, a sua aglutinação em itens semelhantes foi mais difícil. Isso ocorreu porque os estudantes foram originais nos tipos de tarefas propostos, que vão bastante além do material didático sugerido. Os tipos de tarefas concebidos pelos estudantes são expostos por ordem da frequência na Tabela 6.5.2.

Tabela 6.5.2: Elementos práticos evocados pelos estudantes. A primeira coluna é o rótulo atribuído ao elemento prático e o número entre parênteses precedendo o enunciado informa o número de vezes que o elemento foi evocado.

TAG	Elementos práticos (Tipos de tarefas da praxeologia)
1	(3) Debater o papel do contexto histórico, conhecimentos disponíveis, e das concepções individuais do cientista no desenvolvimento de suas teorias.
2	(3) Analisar a origem, construção lógica, e fenômenos guiados pelo princípio de simplicidade.
3	(3) Analisar quantitativamente os movimentos horizontal e vertical de projéteis (usar o modelo $\Delta x \propto \Delta t$ e, respectivamente, $\Delta y \propto \Delta t^2$).
4	(2) Discutir o conceito de inércia horizontal.
5	(2) Discutir a proporcionalidade entre velocidade e tempo durante a queda livre dos corpos.
6	(2) Explorar a ideia de vácuo e movimento infinito.
7	(2) Realizar experimentos para obter relações entre grandezas mensuráveis.
8	(2) Discutir as modelagens criadas para interpretar a realidade, levando em consideração que esses modelos não são a realidade, mas uma aproximação aceitável.
9	(2) Questionar a presença de força para manter o movimento.
10	(1) Questionar porque objetos mais pesados caem mais rápido.
11	(1) Estudar o movimento dos corpos, utilizando o plano inclinado.

12	(1) Analisar as proporções: $\Delta x \propto \Delta t$ e $\Delta y \propto \Delta t^2$.
13	(1) Discutir o avanço da tecnologia promovido por cientistas durante seus estudos e experimentos.
14	(1) Visualizar as contribuições de Galileu para a construção do “método científico” como ele é hoje.
15	(1) Questionar os elementos da teoria do Aristóteles.
16	(1) Analisar, comparativamente, o tempo de alcance de uma posição x e y de objetos sendo lançados na vertical, horizontal e em oblíquo decomposto.
17	(1) Discutir a diferença entre os experimentos que são delineados desconsiderando ou considerando alguns fatores - idealizados - dos experimentos reais.
18	(1) Analisar a decomposição de movimentos em horizontal e vertical.
19	(1) Propor a discussão de como eram feitos os cálculos ou deduções sem as ferramentas da Matemática atual.
20	(1) Analisar o movimento acelerado a partir da regra de Merton.
21	(1) Mostrar diversos lançamentos oblíquos reais (balístico, esportivo, ...) que descrevem a trajetória parabólica, observando as relações de alcances e ângulos.
22	(1) Comparar as explicações aristotélicas e galileanas para o movimento dos corpos, destacando qual delas é mais simples e eficaz na explicação do fenômeno.

Pode-se afirmar que os tipos de tarefas propostos pelos estudantes podem abranger uma ampla gama de tarefas, envolvendo debates, discussões, questionamentos, análise, experimentos, reflexões, e visualização de mídias sobre o tema da queda dos graves. Como deveria ser, os tipos de tarefas propostos pelos estudantes têm natureza bastante geral e os enunciados os sintetizam bem. Nota-se que os tipos de tarefas propostas foram muito além das sugeridas na Tabela 6.2.1, que foram apenas as seis seguintes: Questionar concepções epistemológicas; Descrever quantitativamente o movimento de queda livre; Descrever quantitativamente o movimento de projéteis; Discutir o papel das idealizações na construção de teorias; Identificar e explicar as nuances relacionadas à medida do tempo e sua utilização na Física; Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento.

Comparando os seis tipos de tarefas propostas no MER, percebe-se que quatro deles estão representados na proposta dos estudantes. O tipo de tarefa “Questionar concepções epistemológicas” é compatível com o tipo de tarefa 2, evocado por três estudantes. Por exemplo, o Estudante 6 escreve: “*Analisar a construção lógica do princípio de simplicidade*”.

O tipo de tarefa “Descrever quantitativamente o movimento de projéteis” se compara com o tipo de tarefa 3, sugerida por três estudantes. Por exemplo, o Estudante 8 escreve: *“Descrever, quantitativamente, os movimentos parabólicos/oblíquos utilizando cálculos geométricos e trigonométricos”*. O tipo de tarefa “Descrever quantitativamente o movimento de queda livre” é comparável com o tipo de tarefa 5, sugerida por dois estudantes. Por exemplo, o Estudante 12 escreveu: *“Analisar como a velocidade do corpo em queda livre muda conforme o tempo passa”*. Já o tipo de tarefa “Discutir o papel das idealizações na construção de teorias” é comparável com o tipo de tarefa 17, proposta unicamente pelo Estudante 8, conforme transcrito. Os dois últimos elementos (“Identificar e explicar as nuances relacionadas à medida do tempo e sua utilização na Física” e “Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento”) não são compatíveis com nenhum tipo de tarefa proposto pelos estudantes.

No entanto, cabe destacar que os estudantes tiveram maiores dificuldades de compreender o que era esperado deles nesta parte da atividade em relação à anterior. Quatro estudantes (quase a metade dos respondentes) produziram tipos de tarefas inadequadas. Dos 46 elementos práticos produzidos, 12 foram considerados inadequados. Alguns estudantes enunciaram os tipos de tarefas como elementos teóricos, outros como objetivos de aprendizagem e outros como equações. Por exemplo, a Estudante 1 enunciou elementos contextuais, que pertencem ao bloco teórico da praxeologia: *“Transposição do pensamento medieval para a modernidade, era da razão e iluminismo”* ou *“Uso da experimentação para construir o modelo da queda dos graves”*. Já o Estudante 4 escreveu frases descritivas do tipo: *“Galileu postulava que os movimentos horizontal [...]”* e *“Segundo ele, uma força mínima aplicada horizontalmente [...]”*. O Estudante 6 acabou enunciando os objetivos de aprendizagem, como se vê pelas suas respostas: *“Compreender as relações de proporcionalidade no movimento de queda livre”* e *“Entender o papel da Matemática no estudo da natureza”*. Por fim, o Estudante 11 enunciou como tipo de tarefa a equação de movimento em si e o elemento teórico *“O acréscimo mais simples na velocidade de um corpo em queda livre é aquele que se repete da mesma maneira”*. Por conta desses aspectos, os referidos excertos foram excluídos do portfólio e não fizeram parte do repertório à disposição dos estudantes para a construção das tarefas na atividade seguinte.

De fato, durante as entrevistas, seis estudantes descreveram o processo de elaboração dos tipos de tarefa como confuso ou sem sentido. Dentre os que relataram ter entendido o processo e o considerado útil, estão os Estudantes 1 e 6, que, conforme descrito acima, não demonstraram ter compreendido a tarefa. Todos os participantes que demonstraram atitudes negativas sobre a elaboração dos tipos de tarefa relataram que

esses elementos tiveram papel meramente burocrático, não tendo servido efetivamente para a elaboração das tarefas seguintes.

Após a elaboração dos elementos teóricos e práticos pelos estudantes, eles foram compilados e organizados no portfólio. Os estudantes tiveram acesso à mesma lista aqui apresentada (inclusive com as frequências). Isso permitiu que o professor realizasse discussões em sala de aula com os estudantes, visando: a) munir o MER proposto em grupo pelos estudantes com elementos (teóricos e práticos) do MER de referência; b) uniformizar a apreensão de elementos do MER proposto pelos estudantes. Assim, em aula foram enfatizados tópicos relacionados com elementos teóricos evocados com menor frequência. Por exemplo, para reforçar a compreensão sobre o papel da possibilidade de medição de intervalos de tempo na formulação da teoria Galileana, abordou-se as técnicas usadas (ou possivelmente usadas) por Galileu com a clepsidra e o ritmo cardíaco. Para destacar a necessidade de argumentos de simetria em lançamentos oblíquos, pontuou-se que Galileu tinha uma lei de “queda (dos graves)”, não de subida depois descida, como ocorre num lançamento oblíquo.

Talvez o aspecto mais discutido com os estudantes tenha sido o tipo de tarefa “Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento”, que não apareceu no MER proposto pelos estudantes. O diálogo a seguir, entre o professor e dois estudantes, exemplifica a natureza das discussões conduzidas em sala de aula:

Professor: “[...] *na Ciência, nós vamos além da experimentação: o Galileu viu que o período do pêndulo dependia da amplitude, mas ele acreditava que não poderia depender*”.

Estudante 2: “Tá mas se o experimento mostrava que não era esse o caso...?”

Professor: “*Ele abandonava suas ideias e aceitava o resultado do experimento? Não! Ele não acreditava no resultado do experimento e afirmava que o problema devia ser a resistência do ar.*”

Estudante 6: “*Assim fica fácil né [risos]. Mas como ele vai provar a hipótese sem o experimento?!*”

Professor: “*Em ciências factuais, como a Física, não ‘provamos’ uma hipótese, nós a corroboramos [...]. Se o experimento não corrobora a hipótese do Cientista, ele não a abandona assim, pelo menos não imediatamente [...]*”.

Em geral, os estudantes se mostraram bastante interessados em questões relacionadas ao fazer científico. Explicando sobre o princípio da simplicidade e economia, que guiou Galileu na formulação da lei da queda dos graves, o professor foi interrompido pelo disparo do Estudante 3: “*Como tu [o cientista] pode fazer uma hipótese que é pro resto do Universo...?*”. O professor explica que elementos contextuais e individuais podem

influenciar. No caso de cientistas contemporâneos à Galileu, a noção do papel de Deus onipresente no Universo foi uma justificativa comum para postular a generalidade das leis da Física, citando o Princípio de Fermat como exemplo. O seguinte diálogo sucedeu:

Estudante 3: *“Ah, pára que foi daí que ele [Fermat] tirou essa hipótese então? É genial isso! [...] Mas qual a função prática de ensinar o caráter hipotético-dedutivo da Ciência?”*

Professor: *“Para que eu compreenda como se faz ciência e possa exercer minha cidadania. Para que eu não incorra no negacionismo... Não caia em fake news e deixe de tomar vacinas, por exemplo.”*

Estudante 4: *“A ideia é colocar isso dentro do discurso do professor em sala de aula?”*

Professor: *“É basicamente isso. Mas fazer o possível em cada realidade [...]”.*

Estudante 4: *“É porque já nem tem tempo para a Física, imagina ainda ensinar sobre a Ciência”.*

De fato, os estudantes se mostraram particularmente preocupados sobre a questão do tempo disponível na Educação Básica, e muitos concordaram com o comentário do Estudante 4. O tipo de discussão exemplificado pelos diálogos precedentes foi bastante comum durante as aulas, sendo que os estudantes que mais interagiam nos debates eram os estudantes 3, 4, 6 e 8.

Quanto ao bloco prático da praxeologia da queda dos graves, a única dificuldade dos estudantes foi com relação às tarefas e tipos de tarefas envolvendo a teoria das razões e proporções. Por exemplo, após as respostas ao questionário, o professor resolveu um exemplo em aula, relacionado a um enunciado de Galileu sobre o movimento dos pêndulos. O exemplo envolvia mostrar que o enunciado é compatível com a lei do período do pêndulo para pequenas oscilações, expressa na forma moderna. Após indicarem que haviam entendido, foi solicitado aos estudantes que resolvessem um problema semelhante, agora envolvendo o movimento de um bloco sobre um plano inclinado (ver Figura 6.5.1). Na tarefa, os estudantes deviam provar um enunciado expresso na linguagem das razões e proporções, mas em notação moderna, como no exemplo do professor.

principalmente usar da criatividade para poder encontrar uma ligação entre o que eles fizeram e eu tava criando”.

Depois de elucidar elementos teóricos (bloco teórico) e práticos (tipos de tarefas) da praxeologia sobre a queda dos graves, foi solicitado que os estudantes construíssem tarefas que fossem adequadas ao Ensino Médio, completando assim o bloco prático da praxeologia. Conforme explicado anteriormente, os estudantes deviam especificar, para cada tarefa, qual era a dimensão teórica, dimensão prática, a relação entre os elementos das duas dimensões e os procedimentos didáticos envolvidos. Onze estudantes realizaram a atividade, cada um produzindo duas tarefas, totalizando 22 tarefas. Em razão do grande volume de informações, a seguir são ilustrados apenas duas tarefas produzidas e em seguida o resultado da análise.

Uma das tarefas produzidas pelo Estudante 12 (a tarefa 12.2 no portfólio) se encontra na Tabela 6.5.3.

Tabela 6.5.3: Tarefa produzida pelo Estudante 12. Os números antes dos enunciados do bloco teórico e Tipo de tarefa correspondem aos elementos teóricos e práticos listados na primeira coluna das Tabelas 6.5.1 e 6.5.2.

Bloco teórico	9 - A Filosofia Natural pode descrever a realidade por meio de representações simplificadas (modelos).
Tipo de tarefa	8 - Discutir as modelagens criadas para interpretar a realidade, levando em consideração que esses modelos não são a realidade, mas uma aproximação aceitável.
Tarefa	Em um pêndulo simples cuja massa do fio que suspende um corpo que esta oscilando, a massa do fio pode ser desprezada? Por quê?
Relação entre o bloco teórico e o tipo de tarefa	A tarefa propõe a discussão sobre o uso de modelos para representar a realidade, mas deve ser enfatizado que o modelo não é a realidade, mas uma aproximação idealizada, onde alguns fatores devem ser observados assim como alguns são desprezados. No entanto, a análise dos dados colhidos na experimentação são uma boa aproximação da realidade indicada pela Matemática.
Procedimentos	Realizar dois experimentos com pêndulos simples, trocando apenas o material do fio, exemplo um fio de nylon e um fio de aço, o fio de aço com diâmetro levemente superior ao nylon, para reforçar as diferenças de massas entre eles, coletar os dados e analisar para verificar o quanto a massa do fio influenciou nos dados obtidos.

A tarefa proposta é de natureza qualitativa e se insere no contexto de um experimento em que dados precisam ser coletados. Trata-se de uma atividade de cunho fechado, na qual os experimentos a serem realizados são listados previamente. Conforme indicado pelo Estudante 12 na Tabela 6.5.3, a tarefa é, de fato, do tipo 8 (“Discutir as

modelagens criadas para interpretar a realidade, levando em consideração que esses modelos não são a realidade, mas uma aproximação aceitável”). Ainda, tanto a tarefa quanto o tipo de tarefa são compatíveis com o elemento teórico sinalizado (“A Filosofia Natural pode descrever a realidade por meio de representações simplificadas (modelos)”). Por conta disso, inferiu-se que este estudante concebeu uma tarefa munida de razão de ser, na acepção da TAD. Outro exemplo ilustrativo é a tarefa realizada pela Estudante 1 (a tarefa 1.2 no portfólio), reproduzida na Tabela 6.5.4.

Tabela 6.5.4: Tarefa produzida pela Estudante 1. Os números antes dos enunciados do Bloco teórico e Tipo de tarefa correspondem aos elementos teóricos e práticos listados na primeira coluna das Tabelas 6.5.1 e 6.5.2.

Bloco teórico	3 - Todos objetos, independentemente do peso, caem à mesma velocidade.
Tipo de tarefa	10 - Questionar porque objetos mais pesados caem mais rápido.
Tarefa	Vamos fazer um experimento mental. Se soltarmos uma bolinha de papel e outra de gude ao mesmo tempo, na vertical, ou seja, em queda, o que acontece? Há uma diferença no tempo de queda entre elas? Por que isso acontece? E se não houvesse a resistência do ar, como seria o tempo de queda das bolinhas?
Relação entre o bloco teórico e o tipo de tarefa	A atividade articula as dimensões teórica e prática em relação ao estudo da queda dos corpos. Buscando entender como os alunos percebem o movimento de queda e sua aproximação ao pensamento de Galileu.
Procedimentos	A atividade começa com a proposta do experimento mental. Após, os alunos terão que escrever em uma folha suas ideias, que serão discutidas em uma roda. Em seguida apresentar uma breve apresentação sobre Galileu, seus feitos e como ele descrevia a queda dos corpos.

A tarefa está no contexto de uma atividade teórica (experimento mental), tem natureza qualitativa e recorre ao diálogo com conhecimentos prévios do aluno sobre o movimento cotidiano de queda. Se trata de uma tarefa aberta, sem resposta “certa”. A tarefa é do tipo 10, isto é, “Questionar porque objetos mais pesados caem mais rápido”. Seu propósito é o de confrontar a experiência sensível da queda de objetos, que é tipicamente a de que objetos mais pesados caem mais rápido, com a hipótese 3 de que “Todos objetos, independentemente do peso, caem à mesma velocidade”. Uma vez que a articulação entre elementos teóricos e práticos foi feita corretamente, considerou-se que a estudante tinha clareza sobre a razão de ser da tarefa.

Alguns elementos teóricos e práticos foram usados com maior frequência pelos estudantes na construção das tarefas. Dentre os elementos teóricos, os mais evocados foram os elementos 3 (seis vezes), 4 (cinco vezes) e 9 (quatro vezes). Assim, muitas das

questões elaboradas foram relacionadas com as hipóteses de independência da massa dos objetos na sua velocidade de queda, independência das componentes horizontal e vertical do movimento e da possibilidade de descrever fenômenos reais usando representações simplificadas. Já os tipos de tarefas mais usados foram os de número 10 (cinco vezes), 8 (quatro vezes) e 7 (três vezes). Ou seja, a maior parte das tarefas envolveu questionamentos sobre o porquê de objetos mais pesados caírem mais rápido, discussões sobre possíveis modelagens como ferramentas de descrição da realidade e a proposição de experimentos para relacionar grandezas mensuráveis, como alcance de projéteis, tempo de queda, etc. Um dado interessante que emergiu da análise foi que, na maior parte dos casos, os elementos teóricos e práticos de uma tarefa em particular não foram concebidos pelo autor da respectiva tarefa. Dentre as 22 tarefas produzidas, 15 tinham essa característica para os elementos teóricos e 19 para os elementos práticos. Isso confirma o depoimento dos entrevistados: a maioria dos estudantes usou a contribuição de algum colega na construção das tarefas, indicando que o portfólio online foi efetivamente usado pelos estudantes.

Uma dificuldade muito clara dos estudantes na etapa da produção das tarefas foi em conceber tarefas objetivas, capazes de dar sentido a um elemento teórico e(ou) prático específico. Isso suscitou diversas intervenções do professor com os participantes da pesquisa, já que, se deixados livres, os estudantes tendiam a criar tarefas extremamente abertas. Por exemplo, o Estudante 5 sugeriu a tarefa: “*Explique como a teoria da queda dos graves pode ser aplicada em um contexto contemporâneo, considerando tanto aspectos físicos quanto filosóficos*”. Esse tipo de questão não tem conexão óbvia com um saber específico da Física, dificultando ou impossibilitando sua classificação como elemento praxeológico, seja ele pertencente ao bloco prático, ou teórico. Sem a correção inicial do professor, teria sido impossível classificar as tarefas adequadamente.

Nas entrevistas, as maiores dificuldades relatadas pelos estudantes foram em conceber tarefas: a) que correspondessem, simultaneamente, aos respectivos elementos teóricos e práticos (conforme visto, essa foi uma dificuldade de quase todos os estudantes); b) adequadas ao nível médio (quatro estudantes); e c) qualitativas. A fala da Estudante 1 exemplifica os itens a) e b):

Era muito difícil! Difícil a parte de linkar os elementos [teóricos e práticos] um com o outro. Não era só botar um elemento ali, a gente tinha que relacionar os dois juntos, né [...] E também foi difícil deixar num nível que seja coerente com o Ensino Médio. Mas é um desafio que a gente tem que ter né... nessa etapa da graduação a gente ainda não viu muita coisa, sobre como montar tarefas, metodologias, etc. e eu acho que a gente deveria ver.

A dificuldade em elaborar tarefas adequadas para o nível médio pode ser evidenciada também na fala da Estudante 10:

Muitas vezes eu pensava em uma pergunta que poderia ser usada em sala de aula, mas... tipo, ou ela [a pergunta] era muito trivial ou muito complexa! Sabe, criar uma pergunta que pudesse fazer os estudantes pensar e depois falar sobre aquilo. Então pra mim essa foi uma dificuldade: pensar em questões que fossem adequadas para o nível médio. Que conseguissem incitar uma discussão mas que não fosse tão elaborado.

Dada a formação prévia dos estudantes - todos tendo passado pelo “ensino tradicional” - já se esperava que houvesse dificuldades na produção de tarefas qualitativas, que pudessem dar sentido a elementos teóricos de cunho filosófico. A conversa com o Estudante 6 exemplifica esse ponto:

Estudante 6: “*Eu achei difícil trazer alguns elementos teóricos sem cálculos*”.

Pesquisador: “*Um exercício precisa ter cálculos?*”.

Estudante 6: “*Não sei, é que tipo, eu até vi ali [no Portfólio] alguns colegas que propuseram exercícios sem contas, depois que eu vi isso eu me liguei que dava para fazer*”.

Todos os estudantes responderam que os elementos teóricos, listados explicitamente no quadro como na Tabela 6.5.1, foram uma boa fonte de inspiração na concepção das tarefas. Eles foram “*um guia das coisas importantes e que não podem faltar*” (Estudante 7), “*dão um norte [...] de como construir a pergunta*” (Estudante 2), ajudam a “*saber até onde vai a abordagem conceitualmente*” (Estudante 8) e “*formam praticamente um sistema que tu vai linkar um no outro para que faça sentido para o aluno*” (Estudante 4).

Uma vez consolidado o MER associado com a praxeologia da queda dos graves, constituído pelos elementos teóricos, práticos e as respectivas tarefas, os participantes da pesquisa ainda realizaram um diagrama Q-R e preencheram um quadro com questões hipotéticas de estudantes do ensino médio. Ao todo, 10 estudantes realizaram a tarefa.

Novamente, em razão da grande quantidade de dados, discute-se em detalhes a análise feita apenas para um estudante e a seguir o resultado geral é apresentado. A Figura 6.5.2 é uma versão modificada do diagrama Q-R produzido pela Estudante 10. Para facilitar a apresentação do resultado, foram inseridos, na Figura 6.5.2, retângulos identificando as questões Q0, Q1,..., Q5 e as respostas R1, R2,...,R8. A questão geradora do diagrama é Q0 - *Como Galileu explicava o movimento dos corpos?* Como respostas a essa questão (R1 e R2), a estudante fez referência direta aos elementos teóricos 3 e 4 (ver Tabela 6.5.1), respectivamente:

- R1 - *Todos os corpos, independente do peso, caem à mesma velocidade.*

R2 - (2.2) *Os movimentos horizontal e vertical do projétil são independentes entre si, acontecendo simultaneamente.*

Nota-se que a resposta R2 é antecedida pelo número (2.2), que é uma referência à identificação das tarefas produzidas pelos estudantes, como as representadas nas Tabelas 6.5.3 e 6.5.4. Conforme explicado na seção sobre a metodologia de pesquisa, os estudantes deviam vincular algumas tarefas concebidas pelo grupo no diagrama em pontos que lhes parecessem mais convenientes. Nesse caso, a Estudante 10 escolheu apontar uma das tarefas concebidas pelo Estudante 2, a saber:

Tarefa (2.2): *Na Mecânica Aristotélica o movimento violento e natural ocorrem, respectivamente, um depois do outro, já Galileu propôs que ambos ocorrem simultaneamente, assim explicando seu movimento parabólico. Estudando cada movimento separadamente como aproxima nossa visão da de Galileu?*

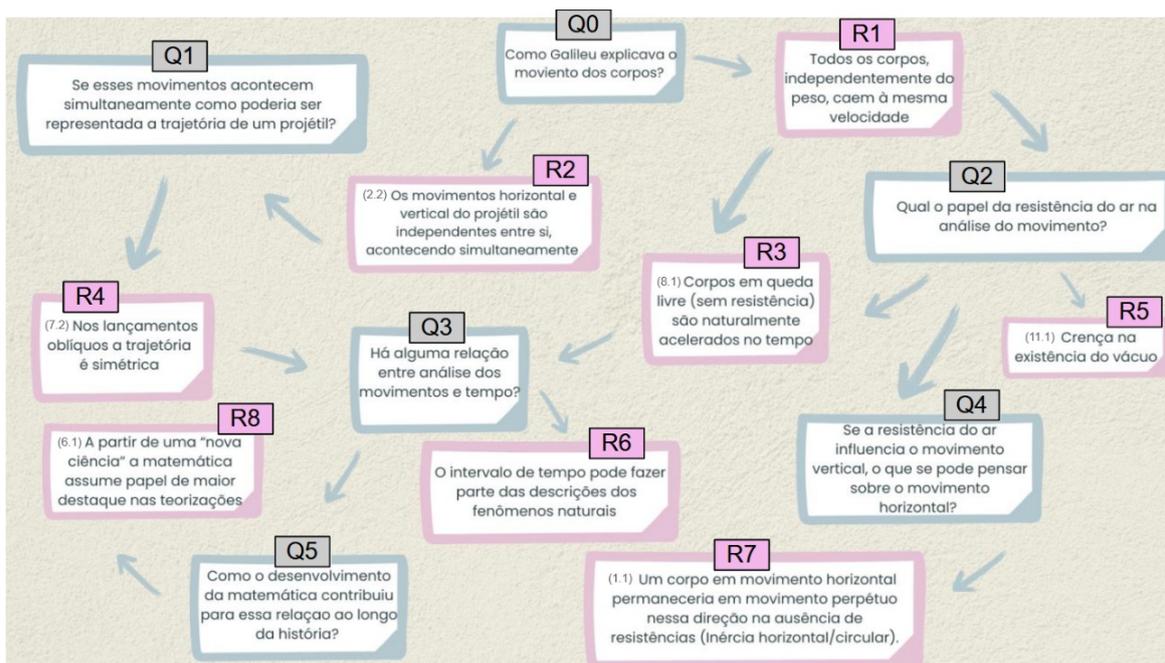


Figure 6.5.2: Versão modificada do diagrama Q-R produzido pela Estudante 10. As questões estão destacadas em cinza e as respostas em rosa.

Para manter a exposição concisa, as tarefas apontadas pela Estudante 10 em cada caso não serão explicitadas. As duas respostas à Q0 são coerentes e compatíveis com a questão geradora. Entretanto, se constituem em respostas parciais. Assim, a partir delas, são geradas duas novas questões (Q1 e Q2) e uma nova resposta (R3). A resposta R3 complementa a resposta R1, correspondendo ao elemento teórico 7:

- R3 – (8.1) Corpos em queda livre (sem resistência) são naturalmente acelerados no tempo.

A questão “Q1 – *Se esses movimentos acontecem simultaneamente, como poderia ser representada a trajetória de um projétil?*” é respondida evocando o elemento teórico 14 (R4) acompanhado de uma sugestão de tarefa (7.2):

- R4 - (7.2) Nos lançamentos oblíquos, a trajetória é simétrica.

Uma resposta mais apropriada para essa questão seria fornecida pelo elemento teórico 4, onde se afirma que a simultaneidade dos movimentos horizontal e vertical implicam uma trajetória parabólica. Entretanto, o argumento de simetria evocado pela estudante é essencial para completar a descrição da trajetória do projétil como uma parábola, constituindo-se, portanto, em uma resposta parcial. Já a questão seguinte é: Q2 – *Qual o papel da resistência do ar na análise do movimento?* Uma das respostas a essa questão é apontada como R3, indicando que Galileu desprezava o efeito do ar e concebia a situação idealizada de movimento sem resistência; outra resposta é a R5, associada ao elemento teórico 6, o que completa logicamente a resposta R3:

- R5 – (11.1) Crença na existência do vácuo.

A partir das respostas R3 e R4, surge a questão “Q3 – *Há alguma relação entre a análise dos movimentos e tempo?*” e a partir da questão Q2 surge a nova questão “Q4 – *Se a resistência do ar influencia o movimento vertical, o que se pode pensar sobre o movimento horizontal?*”, redigida de forma um tanto incoerente. Como resposta à Q3, a estudante evoca, de forma coerente, um enunciado compatível com o elemento teórico 13 (R6):

- R6 – O intervalo de tempo pode fazer parte das descrições dos fenômenos naturais.

Já em resposta à questão Q4, a estudante evoca um enunciado compatível com o elemento teórico 5 (R7), reafirmando sua validade na ausência de resistências, e com isso esclarecendo a condicional presente na questão:

R7 – (1.1) Um corpo em movimento horizontal permaneceria em movimento perpétuo nessa direção na ausência de resistências (inércia horizontal/circular).

Por fim, de forma coerente com a questão Q3, surge uma última questão “Q5 - *Como o desenvolvimento da Matemática contribuiu para essa relação ao longo da história?*”, respondida com um enunciado compatível com o elemento teórico 1 (R8):

- R8 – (6.1) A partir de uma “nova Ciência”, a Matemática assume papel de maior destaque nas teorizações.

Assim, o diagrama Q-R da Estudante 10 continha seis questões e oito respostas, sendo todas elas diretamente associadas com, ou sendo elas próprias, elementos teóricos. Todas as tarefas (seis no total) apontadas pela Estudante 10 foram consideradas

compatíveis com elementos teóricos designados (oito, no total). Da mesma forma, considerou-se adequados os elementos teóricos designados como respostas às questões. Por isso, concluiu-se que o encadeamento lógico entre as questões e respostas foi adequado. Também se considerou que, uma vez que oito dentre os 14 elementos teóricos do MER foram mobilizados, o conjunto de questões e respostas parciais formaram uma boa resposta à questão Q0. Em outras palavras, as tarefas e os elementos teóricos mobilizados pela Estudante 10 constituem uma parte significativa da praxeologia sobre a “Queda dos Graves”, especialmente formada para responder a questão Q0 aventada. Nesse sentido, pode-se afirmar que o conhecimento mobilizado teve razão de ser, isto é, responder Q0. A seguir são apresentados os resultados consolidados para o restante dos participantes.

Assim como a Estudante 10, todos os participantes formularam respostas que eram parcialmente de autoria própria e parcialmente cópias dos elementos teóricos (Tabela 6.5.1) do portfólio. Em média, cada diagrama Q-R continha 6,5 questões e 11,9 respostas, com desvio padrão de 1,9 e 4,1 respectivamente. Quanto à natureza das questões geradoras, verificou-se que os estudantes foram criativos na sua elaboração, sendo três delas do tipo “Como...?” (p. ex., Estudante 4 - “*Como os objetos podem cair com a mesma velocidade no vácuo?*”), seis do tipo “Por que...?” (p. ex., Estudante 8 - “*Por que um objeto lançado obliquamente descreve uma trajetória parabólica?*”). Por ser do tipo “sim ou não”, apenas uma pergunta geradora foi considerada inadequada (Estudante 12 - “*Corpos em queda livre caem ao mesmo tempo?*”).

A análise do conteúdo dos diagramas Q-R mostrou que, assim como no caso da Estudante 10, a menos de uma ou outra resposta/questão, o encadeamento lógico da sequência de questões e respostas foi adequado. As tarefas sugeridas também foram todas compatíveis com a resposta associada. Nenhum estudante fez menos do que sete referências aos 14 elementos teóricos do MER coletivamente construído, sendo que o número médio de elementos evocados foi 7,6 com desvio padrão 1,3. O Estudante 6 foi quem mais trouxe elementos teóricos em seu diagrama, totalizando 10. Com exceção do elemento teórico 12 (“Uma força mínima aplicada horizontalmente a uma esfera poderia movê-la não fossem as resistências externas e a inclinação do plano”), todos os outros elementos foram evocados por pelo menos um dos diagramas Q-R. Com relação às tarefas, o menor número sugerido em um diagrama foi quatro, sendo que a média foi 6,2 com desvio padrão 1,5. Os Estudantes 2, 7 e 8 trouxeram o maior número de tarefas, totalizando oito cada um. Dentre as 22 tarefas anteriormente produzidas pelos estudantes, a única que não foi sugerida em nenhum diagrama Q-R foi a tarefa 5.1.

Nas entrevistas, o diagrama Q-R foi o dispositivo didático unanimemente apontado como a tarefa mais difícil de realizar. Segundo os estudantes, a tarefa demandou muito tempo e a maior dificuldade mencionada foi o encadeamento entre questões e respostas. Os estudantes relataram que sabiam que as respostas se identificam com os elementos teóricos da praxeologia, mas tinham dificuldades de elaborar questões correspondentes. Apesar disso, sete estudantes afirmaram ter gostado de realizar a tarefa. Muitos explicaram afirmando que o desafio foi interessante porque, conforme explica o Estudante 12, o diagrama Q-R:

[...] faz tu buscar, faz tu raciocinar, então eu acho que é uma ferramenta útil. Não é aquelas coisas que tu consegue responder por inteligência artificial [...]. Ele te faz buscar uma pergunta, é o caminho inverso. Interessante, te força a pensar.

Já o Estudante 2 explica que gostou do mapa Q-R porque ele ilustra a razão de ser do conhecimento: *“Antes eu não entendia muito bem o porquê de uma pergunta, né, pra começar. Eu pensei que fosse só jogar o conhecimento e a pessoa fosse absorvendo assim. Mas tendo o porquê, né [...] isso ajuda bastante”*.

Os três estudantes que não gostaram alegaram diferentes motivos. A Estudante 1 relata que achou o diagrama muito confuso e sem sentido; O Estudante 4 explicou que não gostou do diagrama porque as questões naturalmente evocam conhecimentos que o estudante ainda não tem e o estudo de tais perguntas deveria ser precedido por uma base teórica; a Estudante 7 disse que não gostou porque prefere uma abordagem mais prática e direta. A maior dificuldade (apontada por quatro estudantes) foi realizar o encadeamento das questões e respostas.

Quando perguntados se o diagrama Q-R poderia auxiliá-los em algum nível no seu processo de transposição didática, cinco responderam que sim e cinco que não. Dentre os que responderam negativamente, estão os Estudantes 1, 4 e 7, que já afirmaram não ter gostado do mapa Q-R, e os Estudantes 6 e 12, que, apesar de terem gostado do mapa Q-R, não acham que ele serviria na preparação de aulas. Em vez disso, ele seria mais adequado no esclarecimento do conteúdo, para uso próprio do professor. Os estudantes que acham que o diagrama Q-R poderia ser útil explicam que veem o diagrama como uma espécie de guia para dar aulas e interagir com os estudantes (Estudante 2), servindo como um fluxograma coerente (Estudante 3) ou ajudando a focar nas questões essenciais (Estudante 8). Alguns desses pontos são resumidos pela Estudante 10:

Eu sinto que o diagrama ajudaria a sintetizar alguns pontos. Tipo diferente de um mapa mental, em que a gente não sai atrás do porquê daquilo. De certa forma o mapa Q-R faz todo esse processo de a gente pensar o porquê e de a gente relacionar tudo aquilo que a gente tem ali. Então para o entendimento dos estudantes [...] seria mais fácil de conseguir encontrar uma linha de raciocínio parecida com a deles. Pra deixar esse assunto de uma forma que todos entendam.

Por fim, a aplicação foi encerrada com uma aula de discussões sobre os elementos construídos pelos licenciandos, buscando construir uma resposta final coletiva à questão Q0 (“Como ensinar a teoria da queda dos graves destacando o caráter hipotético-dedutivo da ciência e a razão de ser do conhecimento?”). Os licenciandos concluíram que o ensino, quando focado nas hipóteses originais dos cientistas, evidencia não apenas como os saberes foram concebidos, mas também como os conhecimentos posteriores foram deduzidos. Eles ressaltaram que uma maneira eficaz de abordar essas hipóteses é por meio do estudo de episódios históricos. Além disso, destacaram que o diagrama Q-R permite ilustrar a assunção dessas hipóteses em associação com as questões que as motivaram, o que contribui para dar sentido aos conhecimentos. Essas conclusões integraram o portfólio, concluindo a investigação de Q0.

A seguir, expõe-se a conclusão deste estudo.

6.6 CONCLUSÃO DO ESTUDO 2

Inicialmente, buscou-se avaliar a conformidade entre o MER provisório, sintetizado na Tabela 6.2.1, e o MER coletivo, produzido com os estudantes. O MER provisório serviu como referência neste estudo, de forma que não se esperava a sua reprodução integral (ou mesmo parcial) por parte dos estudantes. A noção de MER coletivo só foi possível na medida em que o portfólio foi sendo alimentado com as informações produzidas pelos próprios estudantes. A aglutinação dos elementos teóricos, práticos, tarefas e diagrama Q-R explicitamente no portfólio foi reconhecidamente um fator importante para auxiliar os estudantes tanto na compreensão da teoria, quanto na execução das tarefas. Conforme evidenciado em vários depoimentos, os estudantes fizeram uso intensivo e proveitoso do portfólio. O fato de ser um portal anônimo auxiliou alguns estudantes que, por conta da sua inibição, de outra forma não teriam participado. Outro aspecto que manteve a relevância do espaço virtual foi o *feedback* constante em sala de aula, gerando interação e engajamento, tanto do pesquisador com os estudantes, quanto entre eles próprios (em menor número de ocasiões).

Constatou-se que todos os elementos teóricos evocados pelos estudantes sobre a praxeologia da queda dos graves (com alta ou baixa frequência) são compatíveis com os elementos da Tabela 6.2.1 em diversos níveis. A análise mostrou que, dentre os 11 elementos presentes na Tabela 6.2.1, sete foram evocados por quatro ou mais estudantes em algum elemento teórico. Mesmo que nem todos os elementos teóricos do MER tenham sido mobilizados com a frequência desejável, durante a exposição da praxeologia não foi necessário trazer à tona elementos teóricos diferentes dos já levantados pelos próprios estudantes a partir do questionário. A maior parte dos estudantes considerou que a extração e explicitação dos elementos teóricos do texto base foi uma tarefa razoavelmente fácil e teve impactos positivos na sua aprendizagem pessoal sobre queda dos graves. Ainda, considerando que, dentre os 63 elementos teóricos gerados, apenas quatro foram enunciados de forma vaga ou incompatível com a proposta (pelos Estudantes 3 e 6), conclui-se que a tarefa de explicitação dos elementos teóricos da praxeologia, como proposta no MDR, bem como a apreensão de elementos teóricos por parte dos estudantes foi satisfatória.

Quanto aos tipos de tarefas, evidenciou-se que os elementos práticos evocados na forma de tipos de tarefas são compatíveis com quatro dos seis tipos de tarefas propostos no MER exposto na Tabela 6.2.1. O número de tipos de tarefas adequados supera bastante a quantidade de tipos de tarefas sugeridos no MER. Entretanto, pode-se afirmar que boa parte dos estudantes teve dificuldades significativas em elaborá-los, classificando a atividade como confusa ou sem sentido: aproximadamente 1/4 dos tipos de tarefas produzidos foram considerados inadequados. Alguns estudantes confundiram “tipo de tarefa” com “elementos teóricos”, “objetivos de aprendizagem” e “equações”. Todos os participantes que expressaram atitudes negativas (sete estudantes) sobre a elaboração dos tipos de tarefa relataram que esses elementos tiveram papel meramente burocrático, não os auxiliando a realizar as atividades propostas no MDR.

Tais evidências permitem concluir que os estudantes não compreenderam suficientemente o conceito de tipo de tarefa, sendo esse fato a mais provável explicação para a sua dificuldade posterior em conceber tarefas objetivas. De fato, conforme apontado na fase de construção de tarefas, os estudantes tiveram significativas dificuldades em conceber tarefas diretas e claras, capazes de dar sentido a um elemento teórico e/ou prático específico. Sem a intervenção do professor, as tarefas tendiam a ser excessivamente não estruturadas. Assim, ficou evidenciado que a tarefa de explicitar a estrutura fina do bloco prático (como diferenciar “tarefas” de “tipos de tarefas”) é uma atividade complexa, requerendo uma atenção mais apurada do(a) professor(a).

Sobre o bloco prático da praxeologia da queda dos graves, pode-se dizer que a compreensão dos estudantes foi boa, porém com lacunas em alguns elementos específicos, principalmente sobre a aplicação das razões e proporções, como explicado. Sem dúvidas, a incapacidade de operacionalizar enunciados sobre situações simples é uma evidência de que tais enunciados não foram totalmente compreendidos. Apenas fornecer enunciados traduzidos para a língua materna dos estudantes não tornou o significado contido no enunciado compartilhável. Conclui-se que se faz necessário dar mais atenção à transposição de enunciados provenientes de cientistas do passado, principalmente buscando traduzi-los em linguagem matemática moderna, de forma explícita.

Com relação à elaboração de tarefas, além da dificuldade acima mencionada, observou-se também que alguns estudantes enfrentaram desafios para criar tarefas apropriadas ao nível médio e de caráter qualitativo. Apesar das dificuldades iniciais, concluiu-se que todos os estudantes conseguiram conceber tarefas que, quando avaliadas do ponto de vista praxeológico, em conjunto com seus respectivos elementos teóricos e práticos associados, são dotadas de razão de ser. Os estudantes relataram que os elementos teóricos foram de grande ajuda na construção das tarefas; os elementos práticos, conforme discutido, não foram.

Sobre o diagrama Q-R, a análise evidenciou que cada diagrama continha cerca de o dobro de respostas (R) do que questões (Q). Esse dado empírico corrobora uma afirmação comum no âmbito da TAD, segundo a qual muitos professores incorrem na prática de oferecer respostas para questões não enunciadas. Isso é marcante no contexto de um dispositivo como um diagrama Q-R, concebido para explicitar respostas como consequências diretas de questões. Apesar disso, a análise mostrou que os diagramas produzidos foram representativos do MER coletivo: em média, cada diagrama Q-R evocou 60% dos elementos teóricos levantados pelos próprios estudantes. Ainda, dentre as 22 tarefas produzidas, apenas uma não foi evocada por algum diagrama Q-R. Isso mostra que, quando considerados em sua totalidade, os diagramas têm potencial para representar o MER coletivo. Os estudantes apontaram que, assim como na concepção das tarefas, o quadro com elementos teóricos explicitamente formulados se constituiu num suporte efetivo para a realização do diagrama Q-R.

Apesar dos estudantes terem considerado difícil construir o diagrama Q-R, dentre os 10 entrevistados, sete afirmaram ter gostado de realizar a tarefa, apontando que o diagrama é uma boa forma de representar o conteúdo em si, o que reforça a conclusão acima. Entretanto, apenas cinco estudantes disseram que usariam o diagrama Q-R para preparar suas aulas. Dentre os cinco estudantes que afirmaram que não utilizariam o diagrama Q-R

para preparar aulas, cabem algumas considerações sobre as justificativas apresentadas por dois deles. A Estudante 7 é professora de um curso pré-vestibular e, por isso, segundo ela própria, prefere uma abordagem de ensino mais direta, o que é compreensível. Já o Estudante 4 tem uma concepção de educação divergente da defendida no âmbito da TAD. Conforme exposto na seção de resultados, esse estudante tem uma concepção hierárquica e monumentalística sobre o conhecimento. Assim, embora uma proporção significativa dos entrevistados tenha considerado o diagrama útil para aprender e representar o conteúdo, apenas metade disse que usaria o dispositivo no processo de transposição didática.

As considerações anteriores permitem concluir que o diagrama Q-R é um recurso eficaz para capturar e representar o MER coletivamente construído. No entanto, ainda necessita de aprimoramentos para ser efetivamente utilizado por futuros professores no processo de transposição didática. A maior restrição na sua implementação é o tempo demandado na construção do diagrama.

Assim, pode-se responder à questão de pesquisa que dirigiu este estudo, qual seja:

QUESTÃO DE PESQUISA 3: Que condições e restrições precisam ser consideradas em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS quando se pretende preparar futuros professores para exercerem a vigilância epistemológica na transposição didática dos conceitos e teorias desse campo científico?

As principais condições favoráveis identificadas foram:

- A disponibilidade de um repositório acessível é pré-condição para a consolidação de um MER coletivo, que deve ser representado de forma explícita. O anonimato e o *feedback* aos estudantes parecem ter fomentado maior engajamento. O ambiente digital facilitou o acesso e a comunicação.
- Materiais de estudo como o “texto da disciplina”, que reconstroem episódios históricos relacionados à construção de conhecimentos da Física à luz da contribuição de diferentes atores, com enfoque nas hipóteses basilares assumidas por esses atores, constituem-se em uma boa forma de elucidar elementos teóricos das praxeologias. Os estudantes demonstraram ter gostado de buscar ativamente os elementos teóricos no texto.
- A explicitação dos elementos teóricos na forma de elementos contextuais e hipotéticos foi de grande auxílio no fomento da criatividade na elaboração de tarefas e na representação do conhecimento como uma sequência de questões e respostas.

Em particular, nos diagramas Q-R, os elementos teóricos foram naturalmente equiparados às respostas (R).

- Individualmente, os diagramas Q-R representam bem o MER produzido coletivamente.

As principais condições desfavoráveis identificadas foram:

- as tarefas produzidas muitas vezes não são trabalhadas o suficiente para dar sentido a uma variedade de elementos praxeológicos, tendendo a ser excessivamente abertas. O(a) professor precisaria atuar de forma mais ativa para mitigar essa dificuldade. Uma possibilidade de fazer isso é restringindo a tarefa a um tipo prévio, determinado pelo(a) professor(a).
- A classificação dos elementos práticos da praxeologia em relação ao tipo de tarefa apresenta-se como uma atividade complexa, possivelmente em conexão com o processo de elaboração das tarefas.
- A operacionalização de enunciados científicos historicamente distantes exige uma tradução cuidadosa para a linguagem moderna, permitindo um entendimento mais acessível e imediato dos conhecimentos teóricos abordados.
- Na representação de conhecimentos, há uma tendência em explicitar mais as respostas do que as questões que as antecedem. Esse aspecto pode ser melhorado com metodologias que incentivem a criação de um equilíbrio entre perguntas e respostas, promovendo um engajamento mais efetivo com o paradigma de questionamento do mundo.

As principais restrições identificadas foram:

- A implementação efetiva da metodologia didática dependeu da atuação constante do pesquisador, principalmente no portfólio. Neste ambiente o pesquisador postou as tarefas, o diagrama Q-R e os elementos teóricos e práticos produzidos pelos estudantes, além de interagir com eles no ambiente virtual em diversas ocasiões. Esse é um trabalho que supera a disponibilidade de tempo de um(a) professor(a) para ministrar uma disciplina como a de MC.
- Embora a modulação das atividades em etapas semanais (leitura do texto da disciplina, extração de elementos teóricos, construção de tarefas e elaboração do diagrama Q-R) tenha sido eficaz para esclarecer os conteúdos, a metodologia, vista como um todo, se mostrou trabalhosa para os estudantes, demandando demasiado tempo extraclasse. Frente a já grande carga de estudo exigida dos estudantes de

uma disciplina como a de MC, essa foi considerada uma restrição à adoção da metodologia.

Algumas condições desfavoráveis elencadas têm impacto negativo na preparação para o exercício da vigilância epistemológica. Por exemplo, a dificuldade em criar tarefas objetivas é um empecilho para a discussão de conceitos específicos, que só tem sentido quando se considera as particularidades de uma situação bem definida. Por exemplo, na queda dos graves, isso ocorre com a noção de inércia circular, que dá sentido ao conceito de inércia horizontal na aproximação de deslocamentos pequenos. Um exercício que considera um movimento genérico no plano, sem mencionar a referida aproximação, incorre na deturpação do saber original. Conforme mencionado, essa dificuldade parece estar conectada com a complexidade da atividade de classificar tipos de tarefa. Outro fator crítico para o exercício da vigilância epistemológica é a dificuldade de traduzir o enunciado dos cientistas do passado em formulações modernas e compartilháveis. Ao não saber expressar tais enunciados em linguagem matemática moderna, o futuro professor dificilmente saberá identificar como o conhecimento foi criado, transmitido e transformado, recorrendo inevitavelmente à sua versão monumentalística. Por fim, a restrição relacionada com a tendência de suprimir as questões e privilegiar as respostas é um indicativo de que os conhecimentos são preferencialmente evocados sem a razão de ser associada. Possivelmente essa é a restrição mais crítica em termos do exercício da vigilância epistemológica, já que o questionamento de certo saber passa pelas bases e pressupostos admitidos em sua criação.

No capítulo seguinte, elucida-se o terceiro e último estudo deste trabalho.

7 ESTUDO 3: UM REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO PARA O ENSINO DE MC

O objetivo deste capítulo é delinear um referencial teórico-metodológico para o ensino de MC para uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS focado na preparação de professores para o exercício da vigilância epistemológica, por meio de um MER e um MDR pautados na noção de hipótese científica na acepção de Lima e Heidemann (2023). Espera-se que esse estudo permita a integração da proposta didática, tema desta tese, no contexto mais amplo de uma disciplina, superando uma aplicação pontual, o que é comum em propostas de inserção de temas focados na história da ciência. Isso é feito considerando as condições e restrições identificadas no Estudo 2.

Assim, a questão de pesquisa que dirigiu este estudo foi:

QUESTÃO DE PESQUISA 4: Como devem ser os modelos epistemológico e didático de referência em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS para formação de professores com o objetivo de favorecer a vigilância epistemológica a partir da compreensão das hipóteses científicas que sustentam os conceitos e teorias abordados?

A inspiração da articulação teórica construída neste estudo é proveniente principalmente dos conhecimentos e experiências obtidas em um curso (5 ECTS⁴⁸) intitulado “*Introduction to ATD for mathematics education researchers*”, realizado em 2023 na Universidade de Copenhague. O curso, organizado pelo Prof. Carl Winsløw do Departamento de Educação em Ciências da Universidade de Copenhague, incluiu um módulo presencial intensivo de uma semana, reunindo doutorandos e pesquisadores sênior da TAD de diversas partes do mundo. Durante esse período, os participantes foram imersos em palestras, seminários e discussões aprofundadas sobre conceitos-chave da TAD, como a teoria da transposição didática, análise praxeológica e engenharia didática baseada nos PEP. Além disso, a estrutura do curso envolveu a elaboração de um resumo de cinco páginas sobre o uso da TAD no próprio projeto de pesquisa, o qual foi apresentado e discutido com o grupo em sessões supervisionadas por especialistas no tema. Essa dinâmica não só proporcionou uma oportunidade valiosa para expor as ideias centrais deste

⁴⁸ *European Credit Transfer and Accumulation System* é um sistema europeu de créditos acadêmicos no qual cada crédito ECTS corresponde a 25-30 horas de estudo.

trabalho, mas também permitiu receber *feedback* detalhado tanto de colegas doutorandos quanto de renomados especialistas da área. Ao final do curso, foi requerido um artigo de dez páginas no qual os participantes deveriam aprofundar a aplicação da TAD em suas pesquisas, o que reforçou ainda mais a compreensão do marco teórico e sua relevância para a pesquisa.

A espinha dorsal da construção teórica exposta no estudo é amparada na concepção de Ruiz-Olarría (2015), que argumenta que as praxeologias da profissão docente são, em grande parte, construídas como respostas às questões que surgem no âmbito das praxeologias a *serem ensinadas* e das praxeologias *para o ensino*. Ou seja, uma forma de construir com os futuros professores essas praxeologias é trazendo para discussão, no contexto da formação docente, as mesmas questões (e possíveis respostas) que guiaram a construção do MER que descreve a praxeologia alternativa a ser ensinada. Ao final do processo, a praxeologia para o ensino construída pelos estudantes terá elementos individuais e coletivos que, junto aos elementos da praxeologia a ser ensinada, constituirão a praxeologia da profissão docente. Ao responder a essas questões, os futuros professores são expostos a praxeologias de complexidade crescente, nas quais as limitações de uma praxeologia demandam a construção de uma nova, mais completa que a anterior (p. ex, Sierra, 2006; Ruiz-Munzón, 2010).

No Estudo 2, foi construído um MER e um MDR provisórios relacionados com a praxeologia em torno da teoria da Queda dos Graves. De forma compatível com a proposta de Ruiz-Olarría (2015), as questões que se buscou responder com os futuros professores foram: “Q1 – *Quais elementos contextuais e hipotéticos (elementos teóricos) foram assumidos por Galileu na construção de sua teoria?*”, “Q2 - *Quais tipos de tarefas (elementos práticos) podem ser úteis, no contexto do Ensino Médio, para evidenciar o caráter hipotético-dedutivo do conhecimento?*”, “Q3 – *Que tarefas específicas podem dar sentido a um único par de elementos teóricos e práticos?*” e “Q4 - *Quais questões problemáticas que, no contexto do Ensino Médio, explicitam a razão de ser do conhecimento relacionado à queda dos graves?*”. Neste capítulo, as demais praxeologias a serem abordadas na disciplina, assim como novas questões, serão desenvolvidas e integradas em um modelo mais amplo, permeando mais conhecimentos da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura.

Nas seções seguintes, constroem-se o MER e o MDR em torno das demais praxeologias da MC levando em consideração as condições e restrições levantadas no estudo empírico. Como feito nesse estudo, pelo fato do MDR ser uma construção derivada

do MER (Gascón, 2011), eles são apresentados juntos, respondendo assim “como estudar” e “o que estudar”, respectivamente.

7.1 MER E MDR PRÓPRIOS PARA UM ENSINO DE MC PAUTADO PELA VIGILÂNCIA EPISTEMOLÓGICA

Conforme discutido nas conclusões do estudo empírico, o MER construído em torno da praxeologia da Queda dos Graves foi adequadamente apreendido por boa parte dos estudantes. O MER coletivo construído, especialmente em razão do portfólio, representava em boa medida o modelo de referência. Portanto, considerou-se que o MER exposto na Seção 6.2 não requer modificações. Na sequência, constrói-se as praxeologias relacionadas com a Antiperistasis, a Teoria da Gravitação Universal, as Leis de Newton e as Equações de Euler-Lagrange, respectivamente. Esses conhecimentos, identificados como as praxeologias a serem ensinadas, contêm conhecimentos necessários, embora não suficientes, para conceber, construir e realizar gestos didáticos relacionados com o ensino da MC. Concluída essa etapa, será discutida em maiores detalhes a praxeologia para o ensino, que integra as praxeologias a serem ensinadas no contexto de uma disciplina como a Mecânica Clássica para a Licenciatura.

A partir do quadro de hipóteses da queda da Antiperistasis (Figura 2.2.1.1), que resultou do estudo bibliográfico (Estudo 1), construiu-se a Tabela 7.1.1, que relaciona o bloco prático com o teórico dessa praxeologia. A construção é idêntica à da Tabela 6.2.1, que representa o MER da Queda dos Graves. Novamente, o bloco teórico é representado pelas colunas “Elemento contextual” e “Hipótese”. Conforme argumentado na Seção 6.2, as hipóteses e elementos contextuais contêm tanto a teoria quanto as tecnologias da praxeologia. Já o bloco prático é representado pela coluna “Tipo de tarefa”, no topos dos licenciandos. Uma coluna especificando a “Técnica” foi omitida porque boa parte delas é idêntica às usadas pelo modelo epistemológico dominante. Os casos em que isso não ocorre são explicados em maiores detalhes a seguir.

Tabela 7.1.1: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre Antiperistasis no topos dos licenciandos.

Elemento contextual	Hipótese	Tipo de tarefa
Epistemologia da ciência grega: negação da experimentação	Conhecimento verdadeiro é adquirido por meio da razão e observação	Questionar concepções epistemológicas

Questionamentos sobre a natureza do espaço: conjecturas sobre sua extensão e composição	O vazio é impossível e contra a natureza, que tem “horror ao vácuo”; logo, o Universo é finito. Seu limite é a “casca de estrelas”	Explorar implicações ontológicas da negação do vácuo
Debates sobre a estrutura do cosmos: universo sensível se divide em dois mundos distintos	O cosmos é hierarquicamente estruturado a partir do seu centro, onde se encontra a Terra. O mundo sublunar é imperfeito e efêmero, enquanto o supralunar é perfeito e eterno	Analisar teorias cosmológicas Comparar fenômenos celestes com terrenos
Busca pelas causas dos movimentos: discussões sobre “causa final” (movimento natural) e “eficiente” (movimento violento)	A matéria possui força inata que induz o próprio movimento em direção ao seu “lugar natural” no Universo. Objetos terrestres têm lugar natural no centro da Terra O “movimento violento” (não-natural) é possível graças à presença de força externa. A velocidade é proporcional à força aplicada e inversamente proporcional à resistência do meio	Identificar possíveis causas de diferentes movimentos Analisar movimentos quantitativamente Analisar o equilíbrio quantitativamente
Observação dos fenômenos naturais: explicação para o movimento de projéteis e equilíbrio da alavanca	O movimento antinatural do projétil e o meio impõem resistências no sentido contrário ao movimento. O meio também impele o projétil, mantendo o movimento Movimento de projéteis é uma sucessão de dois tipos de movimentos retilíneos: primeiro um violento, depois um natural	Descrever o lançamento de projéteis

Novamente, para elucidar o bloco prático, exemplificam-se algumas tarefas que seriam dotadas de razão de ser, tendo em vista o MER construído. As tarefas associadas a cada tipo de tarefa poderiam ser as questões:

- 1) **Questionar concepções epistemológicas:** “Pode-se confiar na razão como fonte de conhecimento? Raciocínios podem ser equivocados? E na observação? É possível conhecer o mundo através da observação dos fenômenos naturais? Aristóteles observava o éter? Como observamos um átomo?”.
- 2) **Explorar implicações ontológicas da negação do vácuo:** “Segundo Aristóteles, o nada não existe. Ainda, só existiria uma quantidade finita de matéria. Como essas afirmações explicam sua conclusão de que o universo é cheio e finito? Se o universo é cheio, o que existe entre a Terra e a Lua?”.
- 3) **Analisar teorias cosmológicas:** “Colocando-se no lugar de Aristóteles, Platão e outros filósofos pré-cristãos, explicita os fatores que corroboram a teoria geocêntrica. Qual o papel da religião na elaboração dessa teoria?”.

- 4) **Comparar fenômenos celestes com terrenos:** “Quais as principais diferenças entre os movimentos observados na Terra e no Céu? Como explicar essas diferenças? Existem movimentos eternos?”.
- 5) **Identificar possíveis causas de diferentes movimentos:** “Quais causas podem ser atribuídas aos seguintes movimentos: a) a queda de uma maçã do alto de um galho; b) o arranque de um carro ao abrir o sinal verde; c) a órbita da Lua em torno da Terra e; d) o movimento, seguido do repouso, de uma bola que foi lançada em um campo plano”.
- 6) **Analisar movimentos quantitativamente:** “Suponha que a força F (associada a antiperistasis) sobre um projétil seja modelada pela função $F(x) = F_0 e^{-x}$, onde x é a distância percorrida. Considere a resistência do meio como constante. a) discuta qualitativamente o movimento do projétil à luz da Física aristotélica; b) esse movimento é possível, de acordo com Aristóteles?”.
- 7) **Analisar o equilíbrio quantitativamente:** “Calcule a resistência R , produzida por uma alavanca, sobre dois corpos de mesma massa posicionados sobre ela, um distante r e outro $2r$ do eixo. De onde vem a resistência da alavanca? O resultado faz sentido?”.
- 8) **Descrever o lançamento de projéteis:** “Descreva o movimento vertical e oblíquo de um projétil. Divida a descrição em duas partes correspondendo a subida e a descida. Compare sua descrição com a de Aristóteles. Qual o papel do meio (ar) nessa descrição?”.

Como se nota, a realização dessas tarefas evoca necessariamente alguma técnica, bem como os elementos contextuais e hipotéticos do bloco teórico, conforme explicitado na Tabela 7.1.1. As tarefas do tipo 6) e 7) são as únicas que requerem técnicas não usuais, evocando uma compreensão mais profunda das hipóteses basilares. Por isso, elas são explicadas em maiores detalhes no que segue.

As tarefas do tipo 6) requerem o uso da lei de movimento proposta por Aristóteles, que, de acordo com as hipóteses descritas na Figura 2.2.1.1, pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação: $v = F/R$, onde v é a velocidade, F é a força externa aplicada e R a resistência do meio. Evidentemente, a equação é um anacronismo, já que Aristóteles não usava frações, o mesmo ocorrendo até Newton. Mesmo assim, escrever o enunciado desta forma permite a operacionalização do conceito usando técnicas algébricas modernas, que os estudantes já dominam. A solução analítica do problema exposto na tarefa mostra que a velocidade do projétil tende a zero, porém esse valor nunca é atingido. Isso significa que o corpo poderia se mover por uma distância infinita, o que é

incompatível com a Física aristotélica. Em nível médio, poder-se-ia chegar às mesmas conclusões sem resolver equações diferenciais introduzindo valores na equação e criando um gráfico da velocidade em função da posição. Assim, esse problema pode ser explorado para descrever uma das primeiras tentativas de explicação dos movimentos e, simultaneamente, apontar suas limitações.

As tarefas do tipo 7) também podem ser resolvidas pela relação $v = F/R$. Nessa situação, segundo a Física aristotélica, como os corpos executam movimentos não naturais (movimento circular), a natureza “reage resistindo” ao movimento. A resistência é maior sobre o corpo posicionado em r porque esse executa uma trajetória mais circular, e portanto menos natural. Para calcular as resistências, considera-se que as velocidades em cada caso são proporcionais a $2\pi r$ e $2\pi(2r)$ e as forças externas provenientes do peso são iguais (corpos de mesma massa). Com isso, mostra-se que $R_r = 2R_{2r}$, conforme antecipado. Cabe destacar que as resistências têm um sentido dúbio na construção de Aristóteles, podendo significar tanto a força exercida pela alavanca sobre o objeto (portanto a força normal), quanto a “dificuldade” de colocar a alavanca em movimento. O resultado faz sentido à luz da Física aristotélica. Por mais que a justificativa de Aristóteles não seja aceita pela ciência atual, o resultado obtido descreve corretamente o equilíbrio em uma alavanca, tendo um papel na Física lagrangiana, como mostrado na Subseção 5.2.4. Assim, esse tipo de tarefa pode consolidar a razão de ser da lei do equilíbrio, que é fundamentada nas propriedades “notáveis” atribuídas ao círculo por Aristóteles.

O restante das tarefas são do tipo qualitativo, não requerendo a utilização de técnicas específicas. As discussões suscitadas por esse tipo de tarefa proporcionam momentos importantes para questionar o conhecimento e para destacar as limitações de cada praxeologia. Ou seja, pressupõe-se que o conhecimento deve sempre ser posto em cheque, pois não há respostas definitivas, apenas provisórias. Ao mesmo tempo, cada tarefa deve destacar a validade e pertinência de toda a praxeologia tendo em vista o contexto em que foi concebida. Assim, mesmo que hoje algumas ideias possam parecer rudimentares, elas cumpriram os propósitos para os quais foram concebidas, explicando fenômenos naturais antes inexplicáveis. Além disso, tais ideias serviram de base para estruturar explicações mais elaboradas, em resposta às limitações das anteriores. Destacar esse aspecto é importante para evitar que os estudantes se sintam desmotivados em estudar algo que já foi ultrapassado.

Assim, tarefas do tipo 1), “Questionar concepções epistemológicas”, podem servir para apontar como o pensamento aristotélico era guiado por um racionalismo exacerbado e uma confiança excessiva nos sentidos como fonte de conhecimento; tarefas do tipo 2)

“Explorar implicações ontológicas da negação do vácuo”, 3) “Analisar teorias cosmológicas” e 4) “Comparar fenômenos celestes com terrenos”, além de explorarem as consequências da epistemologia aristotélica, como discutido na tarefa do tipo 1), permitem o ensino de concepções que foram vigentes na ciência por muitos séculos, tendo influenciado construções posteriores. Tarefas do tipo 5) “Identificar possíveis causas de diferentes movimentos” são importantes principalmente para questionar o equívoco comum de que o movimento requer a presença de força. Por fim, tarefas do tipo 8) “Descrever o lançamento de projéteis” podem ilustrar os problemas da construção aristotélica, já que atualmente seu modelo pode ser refutado facilmente observando vídeos ou simulações sobre movimento de projéteis.

A exposição que segue elucida as três praxeologias restantes seguindo a mesma lógica da anterior. Para evitar demasiadas repetições, recorre-se a uma descrição mais sucinta.

A praxeologia relacionada com a Teoria da Gravitação Universal de Newton foi construída com base na Figura 5.2.2.1 que resultou do estudo bibliográfico. A Tabela 7.1.2 resume possíveis tipos de tarefas com ela associadas.

Tabela 7.1.2: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre a Teoria da Gravitação Universal de Newton no topus dos licenciandos.

Elemento contextual	Hipótese	Tipo de tarefa
Prisca sapientia: valorização dos textos antigos	Geometria é a linguagem universal	Questionar concepções epistemológicas
Unificação dos mundos supra e sublunar: superação da dicotomia Céu-Terra	A mesma força responsável por atrair a maçã pode ser responsável por manter a Lua em sua órbita	Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico
Experimentos de Huygens com pêndulos: na Terra, um corpo cai 5m em 1s	A força gravitacional é atrativa, instantânea e surge em pares de mesma direção, porém de sentidos opostos	
Modelo de Gilbert: força gravitacional tem origem magnética, e é uma interação recíproca.	A gravidade pode ser produzida por uma corrente de éter que se precipita em direção aos astros, voltando a subir de forma diferente a que desceu	Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento

Desenvolvimento de novas técnicas matemáticas: cálculo Integral	Astros aproximadamente esféricos, com distribuição radial de matéria, podem ser considerados como objetos pontuais localizadas em seus centros	Discutir o papel das idealizações na construção de teorias
Proposição de Hooke: movimentos circulares são mantidos por forças centrípetas. Não existe força centrífuga	A força gravitacional entre dois corpos é centrípeta e pode ser representada como uma grandeza inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles	Avaliar o efeito das forças centrípetas
Proposições de Kepler: o Sol é a <i>causa</i> do movimento dos planetas, que obedecem as leis das órbitas, das áreas e a lei harmônica ($T^2 \sim R^3$)		Avaliar o efeito das forças gravitacionais
Superação do paradigma platônico: aceitação de órbitas elípticas		

São exemplos de tarefas derivadas da praxeologia representada pela Tabela 7.1.2:

- 1) **Questionar concepções epistemológicas:** “Com poucas modificações significativas, Newton ainda usava a Matemática usada por Aristóteles e Galileu na descrição dos fenômenos naturais. Que linguagem era essa? Por que Newton usou essa linguagem apesar das formulações mais modernas já estarem disponíveis em sua época?”
- 2) **Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico:** “A teoria da gravitação newtoniana acolheu e também rejeitou ideias e resultados empíricos provenientes de diferentes pensadores ao longo da história. Cite ideias aceitas e rejeitadas por Newton. Cite também resultados empíricos aceitos e rejeitados”.
- 3) **Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento:** “Por que os cientistas pensavam que o mecanismo que explicava a gravidade requeria a presença de um meio material para funcionar? A teoria do vórtex de Descartes, explicava a gravidade como resultante de um turbilhão de matéria girante. Essa teoria foi suplantada pela teoria de Newton, que originalmente concebera o mecanismo da gravidade como resultante da precipitação radial do éter em direção aos corpos celestes, provocando colisões nesse processo. Explique como esse mecanismo deu forma à lei da gravitação”.
- 4) **Discutir o papel das idealizações na construção de teorias:** “O que é mais esférico, uma bola de sinuca ou a Terra? Explique. Por que a aceleração na superfície da Terra pode ser considerada como constante? Se a força da gravidade

depende da distância, por que não se sente a diferença de força gravitacional devida ao Sol em lados opostos da Terra?”

- 5) **Avaliar o efeito das forças centrípetas:** “Determine a força centrípeta sofrida: a) pela Terra em razão do movimento de translação em torno do Sol; b) por uma pessoa na superfície da Terra em razão do movimento de rotação da Terra. Você sente as acelerações mencionadas? Explique comparando os valores calculados com a aceleração da gravidade na superfície da Terra. Explique porque o conceito de força centrífuga foi abandonado em favor do conceito de força centrípeta”.
- 6) **Avaliar o efeito das forças gravitacionais:** “A massa é um dos fatores determinantes na determinação da força gravitacional. O Sol exerce uma força suficiente para manter vários planetas em sua órbita. Explique porque o Sol não afeta as luas desses planetas de forma semelhante. Dica: calcule a força do Sol sobre a Lua, depois calcule a força entre a Terra e a Lua”.

As tarefas do tipo 3) podem ser de natureza variada, já que existem muitos elementos hipotéticos na teoria da gravitação. Entretanto, a tarefa escolhida requer o uso de técnicas não usuais para o ensino médio, por isso se discute esse tipo de tarefa em maiores detalhes. Na aceção original de Newton, a força gravitacional F em um ponto a uma distância r do centro da Terra pode ser modelada como proporcional ao fluxo de éter Φ que atravessa a superfície imaginária (gaussiana) de uma esfera que intersecta o ponto em questão e é concêntrica com a Terra (ou seja, uma esfera de raio r). Admitindo um fluxo radial uniforme, entendido como a quantidade total de éter e , em kg, por unidade de área A por unidade de tempo t , isto é, o fluxo total de éter que atravessa a superfície da esfera imaginária de área $4\pi r^2$ em uma dada unidade de tempo, então:

$$F \propto \Phi = \frac{e}{At} = \frac{e}{4\pi t} \cdot \frac{1}{r^2} . \quad (7.1.1)$$

A hipótese do éter foi escolhida como exemplo porque ela mostra de forma muito clara a origem do fator $1/r^2$ na teoria, sendo uma alternativa interessante para combater a concepção equivocada de que Newton derivou a lei a partir dos dados experimentais. Trazer esses aspectos de forma explícita pode auxiliar a combater a concepção empirista-indutivista associada à ideia de um suposto “método científico”.

O primeiro tipo de tarefa é concebido para explicitar comprometimentos epistemológicos de Newton com uma sabedoria ancestral. A geometria era, para ele, a linguagem das ciências naturais, a despeito da existência de formulações superiores, que permitem descrever o problema de forma mais simples. O tipo de tarefa 2) pode englobar

uma série de tarefas que buscam evidenciar como a obra newtoniana é um produto de uma construção essencialmente coletiva e dependente do contexto, que extrai elementos úteis de construções anteriores e exclui outros. Tarefas do tipo 4) têm papel fundamental no combate à concepção equivocada comum de que teorias são um reflexo especular da realidade. Tipicamente, acredita-se que idealizações são apenas formas de simplificar as contas. Na verdade, as idealizações tornam fenômenos naturais tratáveis à luz de alguma teoria ou lei. Não há construções teóricas que dispensem idealizações. São esses aspectos que podem ser tratados por tarefas desse tipo. Por fim, as tarefas do tipo 5) e 6) são as usuais da praxeologia dominante e não podem estar ausentes no contexto do ensino de Física. A diferença aqui é que as outras questões tornam explícitas sua razão de ser.

A praxeologia relacionada com as três leis de Newton foi construída partindo-se da Figura 5.2.3.1. Seus elementos são elucidados na Tabela 7.1.3.

Tabela 7.1.3: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre as três leis de Newton no topos dos licenciandos.

Elemento contextual	Hipótese	Tipo de tarefa
Prisca sapientia: valorização dos textos antigos	A geometria é a linguagem universal	Questionar concepções epistemológicas
Embate metodológico: indutivismo baconiano vs método hipotético-dedutivo cartesiano	Os efeitos das interações entre corpos são generalizáveis; por isso, as variações de movimento de qualquer corpo são explicadas pelas mesmas leis identificadas nas colisões entre pêndulos (conservação do movimento dos corpos)	Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio da conservação do movimento
Debates sobre o movimento inercial: Buridan, Galileu e Descartes	O movimento retilíneo, com velocidade constante, ocorre sem causas; a resistência à mudança, no entanto, é causada pela força interna	Discutir a causalidade na Física
Contraposição ao paradigma aristotélico: forças se relacionam com variações de velocidade	As causas das mudanças nos movimentos são as forças internas e externas Espaço e tempo são absolutos: o tempo é matemático e flui de forma uniforme; o espaço, preenchido por Deus, é constante e infinito. Só temos acesso às suas respectivas	Problematizar a noção de espaço e tempo absolutos.
Debates sobre a		

natureza do espaço-tempo: Leibniz, Berkeley, e a ação direta de Deus no mundo	quantidades relativas A variação do movimento de um corpo em relação ao espaço absoluto é proporcional à força externa nele aplicada	
Renascimento: método experimental galileano (valorização da empiria)	A interação entre dois corpos é instantânea; dessa interação surge um par de forças de mesma natureza, direção, porém de sentidos opostos	Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio do conceito de força
Experimentos sobre colisões: Wallis e Huygens		

Associadas aos respectivos tipos de tarefa, propõe-se as tarefas:

- 1) **Questionar concepções epistemológicas:** “Possivelmente, a fórmula mais famosa da Física - depois da equação de Einstein: $E=mc^2$ - seja a segunda lei de Newton, comumente escrita como: $F=ma$. Entretanto, Newton jamais escreveu essa fórmula, tampouco usou o conceito de aceleração. Como Newton expressava a segunda lei? Por que?”.
- 2) **Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico:** “Antes de Newton, diferentes cientistas estavam estudando a colisão entre os corpos. Por exemplo, o famoso experimento conhecido como *Pêndulo de Newton* (um experimento de colisões), forneceu conhecimentos necessários para que Newton descrevesse o movimento de corpos na Terra e dos planetas nos céus. Sobre esse caso em particular, responda: a) Como um experimento com pêndulos pode levar a conclusões sobre planetas? b) Antes de fazer o experimento, Newton tinha ideia do que poderia concluir?; c) Como Newton definiu o conceito de força? Trata-se de um conceito novo na Física? d) Que aspectos foram cruciais na postulação da terceira lei? e) De forma geral, como os cientistas chegam em suas conclusões?”.
- 3) **Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio da conservação do movimento:** “Um projétil de 30g de massa é disparado a 1000 km/h na direção de um bloco de madeira de 1kg suspenso por um fio e em repouso. O projétil atravessa o bloco, saindo do outro lado com velocidade de 200 km/h. a) Qual a quantidade de movimento do sistema? b) Qual a velocidade do bloco após ser atingido? c) Se o projétil não tivesse atravessado o bloco, qual seria sua velocidade após o impacto?”.
- 4) **Discutir a causalidade na Física:** “Compare as explicações de Aristóteles e Galileu sobre as causas do movimento com as de Newton. Para cada um deles, disserte

sobre as questões: a) o que faz corpos se moverem ou mudarem seus movimentos?; b) Movimentos requerem força?; c) Forças são internas ou externas?”.

5) **Problematizar a noção de espaço e tempo absolutos:** “O que significa espaço absoluto? Como esse conceito foi usado para definir referenciais inerciais? E tempo absoluto? Que implicações a aceitação da ideia de tempo absoluto teve na teoria de Newton?”.

6) **Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio do conceito de força:** “Uma pessoa em pé sobre um ônibus sente uma tendência de movimento quando o ônibus acelera. Considerando um ônibus de 10ton e uma pessoa de 60kg, qual o módulo da força sentida pela pessoa quando o motor do ônibus aplica uma força de 5kN sobre a carroceria?”.

O primeiro tipo de tarefa é semelhante ao da praxeologia anterior e busca destacar o papel da geometria e da visão de mundo de Newton na construção de sua teoria. As tarefas do tipo 2) visam mostrar que o conhecimento científico se apoia em generalizações a partir de explicações que se mostraram válidas em contextos particulares; buscam questionar as preconcepções dos cientistas quando fazem experimentos, destacando que sua ação é guiada por teorizações ou ideias prévias. A tarefa em particular explora a definição do conceito de força em conexão direta com a variação na quantidade de movimento, uma quantidade estudada por muitos cientistas no contexto dos experimentos sobre colisões (coletividade do processo de construção do conhecimento científico). Os tipos de tarefa 3) e 6) são questões típicas da praxeologia dominante. O tipo de tarefa 4) aborda a concepção equivocada comum entre os estudantes de que a força é um pré-requisito para a existência de movimento. Ao comparar a causalidade atribuída por Aristóteles, Galileu e Newton, pode-se ver que existem elementos comuns, bem como diferenças entre eles. O bloco teórico mostra que mesmo Newton ainda não havia se desprendido inteiramente da ideia de força interna, o que mostra como essa ideia tem apelo. Já a tarefa do tipo 5) esclarece que a ideia de tempo e espaço absoluto está associada com convicções teológicas de Newton sobre o sensório divino, significando que existe um referencial em que todas as grandezas podem ser medidas em termos absolutos, e portanto verdadeiros.

Por fim, a Tabela 7.1.4 evidencia a praxeologia associada com as Equações de Euler-Lagrange, construída com base na Figura 5.2.4.2. Nessa situação, a praxeologia destina-se aos professores que pretendem atuar em nível de graduação. Apesar desses conhecimentos não serem abordados no ensino médio, faz parte da formação integral dos professores ter conhecimentos mais avançados, que lhes dão autonomia para investigarem situações potencialmente didáticas. A Mecânica lagrangiana é essencial nesse aspecto.

Tabela 7.1.4: Relações entre os tipos de tarefas e o bloco teórico da praxeologia sobre as Equações de Euler-Lagrange no topos dos licenciandos.

Elemento contextual	Hipótese	Tipo de tarefa
Iluminismo: valorização da razão e da Ciência	A análise matemática é a linguagem mais adequada para descrever fenômenos naturais	Questionar concepções epistemológicas
Esforços de reformulação da Mecânica: busca por princípios simples e gerais capazes de unificar a dinâmica e a estática	O fazer científico deve ser livre de concepções metafísicas	Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico
Possibilidade de medir tempo (pêndulo): incorporação da variável tempo instantâneo (t) e diferencial (dt)		Considerar sistemas sujeitos a vínculos holonômicos
Discussões sobre causalidade na Física: é preciso conhecer as causas ou sua natureza para fazer Ciência?	A causa dos movimentos é imanente às equações (causalidade diferencial) que os descrevem	Discutir a causalidade na Física
Avanços na Matemática: cálculo diferencial/integral e variacional		Resolver problemas de extremização de funcionais
Revisão dos princípios da dinâmica: conservação da vis viva, princípios de Maupertuis e de D'Alembert, etc.	Sistemas dinâmicos podem ser concebidos como estáticos quando sujeitos a forças fictícias que se opõem a sua tendência real de movimento	Descrever sistemas dinâmicos por meio do Princípio do Trabalho Virtual
Revisão dos princípios da estática: alavanca, composição de forças e velocidades virtuais		

As tarefas associadas a cada tipo de tarefa podem ser:

- 1) **Questionar concepções epistemológicas:** “Quais elementos da Física de Newton não agradavam Lagrange, D'Alembert e outros cientistas do período iluminista? Que aspectos eles buscavam alterar?”.
- 2) **Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico:** “O termo navalha de Ockham já existia à época de Galileu e sua validade se manifesta nas ações dos cientistas em diferentes períodos. Pensando nisso, que objetivos tinham os cientistas iluministas? Quais eram as grandes áreas da Física que precisavam ser unificadas em seu tempo?”

- 3) **Considerar sistemas sujeitos a vínculos holonômicos:** “Escreva a equação de vínculo de um pêndulo com uma das extremidades livre para oscilar no espaço tridimensional, feito de uma corda que se expande 1 mm/min”.
- 4) **Discutir a causalidade na Física:** “Definir o que é força é uma tarefa tão difícil quanto definir o que é tempo. Muitos cientistas iluministas não tinham problemas em aceitar o conceito de tempo, mas a ideia de força parecia-lhes mal. Por que isso ocorre?”
- 5) **Resolver problemas de extremização de funcionais:** “Determine a equação diferencial que representa a solução do princípio de Hamilton. Como você avalia uma interpretação usual, segundo a qual a natureza opera de forma a minimizar certas quantidades? Essa interpretação ressoa com os princípios iluministas?”.
- 6) **Descrever sistemas dinâmicos por meio do Princípio do Trabalho Virtual:** “Determine a equação de movimento de um bloco que desliza sobre um plano inclinado de inclinação θ e altura A sob o efeito da aceleração da gravidade. Despreze os efeitos de atrito”.

As tarefas do tipo 6) buscam explorar o Princípio do Trabalho Virtual (PTV), um conceito basilar da mecânica que é pouco explorado nos livros. Até aqui não foi ilustrada a técnica de como resolver problemas usando o PTV. Por isso, a seguir esse problema é resolvido explicitamente usando esse método. Pela Equação (5.2.4.2), que é a versão dinâmica do PTV (conhecida como princípio de D'Alembert), como o sistema só tem uma partícula, e a única força externa atuante é o peso $\vec{P} = m\vec{g} = (0, -mg)$ do corpo, tem-se:

$$(\vec{P} - m\vec{a}) \cdot \delta \vec{s} = 0, \quad (7.1.2)$$

A força normal não aparece na expressão porque ela é uma força de vínculo, isto é, não realiza trabalho virtual. Desenvolvendo o produto escalar na Equação (7.1.2), tem-se:

$$\ddot{x} \delta x + (g + \ddot{y}) \delta y = 0. \quad (7.1.3)$$

Como o corpo está restrito a se mover sobre a superfície do plano inclinado, a equação de vínculo do sistema é a equação de uma linha reta contida na superfície do plano, dada por:

$$f(x, y) = y + x \tan \theta - A = 0. \quad (7.1.4)$$

A seguir, para obter a relação de dependência entre os deslocamentos virtuais de cada coordenada, inicia-se calculando os diferenciais totais na Equação (7.1.4):

$$df = dy + dx \tan \theta = 0. \quad (7.1.5)$$

Uma vez que dx e dy são deslocamentos possíveis compatíveis com os vínculos, a Equação (7.1.4) deve continuar sendo válida, isto é, seu valor antes $f(x, y)=0$ deve ser igual ao seu valor depois $f(x+dx, y+dy)=0$, implicando em $df=0$. Para determinar os deslocamentos virtuais (ou seja, deslocamentos em um tempo t fixo), basta impor $dt=0$. Nesse caso, como o tempo não aparece explicitamente na Equação (7.1.5), a imposição não modifica em nada sua estrutura. Neste ponto, para indicar que os deslocamentos possíveis acontecem em intervalos de tempo nulos, altera-se a notação: $dx \rightarrow \delta x$ e $dy \rightarrow \delta y$ onde δx e δy passam a ser chamados de deslocamentos virtuais. Assim, obtém-se a relação desejada: $\delta y = -\delta x \tan \theta$. Substituindo a última expressão na Equação (7.1.3), obtém-se:

$$[\ddot{x} - (g + \ddot{y}) \tan \theta] \delta x = 0 . \quad (7.1.6)$$

Como o deslocamento virtual δx pode ser arbitrariamente escolhido, isto é, admite-se que $\delta x \neq 0$, a Equação (7.1.6) implica necessariamente que:

$$\ddot{x} - (g + \ddot{y}) \tan \theta = 0 . \quad (7.1.7)$$

Pela Equação (7.1.5), $\ddot{y} = -\ddot{x} \tan \theta$. Substituindo essa expressão na Equação (7.1.7) e usando a identidade trigonométrica $\cos^{-2} \theta = 1 + \tan^2 \theta$, chega-se ao conhecido resultado final, que descreve a componente horizontal da aceleração do bloco:

$$\ddot{x} = g \sin \theta \cos \theta . \quad (7.1.8)$$

De fato, apesar do PTV ser a base para deduzir as equações de Euler-Lagrange e o próprio princípio de Hamilton, pouco se faz para justificar sua validade na Mecânica. Esse aspecto é particularmente problemático porque o PTV é a base da Mecânica Analítica. Isso é atestado pelo fato de que o próprio Lagrange dedicou cerca de metade do seu célebre livro *Mécanique Analytique* para justificar esse princípio empírico, cujas raízes remontam a Aristóteles. A técnica associada ao PTV foi elucidada em detalhes em Weber et al.⁴⁹. Nesse trabalho, os autores propõem uma ressignificação do papel do PTV no ensino de Mecânica Clássica.

A utilização da técnica acima demonstrada é pouco familiar, porém conduz aos mesmos resultados que seriam obtidos aplicando leis de Newton ou o formalismo lagrangiano. As vantagens de se estudar tal técnica, no entanto, não residem neste fato. Trata-se de ganhar confiança no princípio por meio da comparação dos resultados fornecidos por ele com resultados derivados a partir de formalismos mais familiares. Uma

⁴⁹ Weber, Karam, Heidemann e Veit, *Grounding Analytical Mechanics in Statics: A Didactic Emphasis on the Principle of Virtual Work*, submetido para publicação.

vez feito isso, as consequências do princípio podem ser desenvolvidas para gerar técnicas superiores de análise, isto é, as equações de Euler-Lagrange e o princípio variacional de Hamilton. A reinserção do PTV na didática da Mecânica Clássica passa por esse caminho.

Tarefas do tipo 1) “Questionar concepções epistemológicas” evidenciam a insatisfação dos cientistas iluministas com os elementos teológicos e metafísicos das formulações correntes da Física. Tal abjeção à metafísica é, conforme indicado pelos elementos contextuais associados, fruto de uma valorização da razão e da vontade de remover obscuridades das teorizações. As tarefas do tipo 2) “Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico” buscam explicitar como a ciência iluminista operava no sentido de unificar teorias e identificar princípios simples, porém gerais, de grande poder explicativo. As tarefas do tipo 3) “Considerar sistemas sujeitos a vínculos holônomos” e 5) “Resolver problemas de extremização de funcionais” fazem parte da praxeologia usual da mecânica clássica. Por fim, as tarefas do tipo 4) “Discutir a causalidade na Física” buscam fomentar discussões sobre a causalidade na Física pelo questionamento das atitudes dos iluministas em relação ao conceito de força. Seus argumentos eram de que a força só poderia ser detectada em termos de seus efeitos, isto é, das variações de velocidades provocadas nos corpos. Por isso, se fala em uma causalidade diferencial, eliminando completamente a necessidade de se falar em força.

O estudo de todas as praxeologias descritas, tendo em vista o referencial de hipótese adotado, implica que os estudantes irão se deparar com enunciados expressos em linguagem não usual, incluindo termos como “vis viva”, “velocidade virtual”, “força interna”, etc. Uma condição desfavorável apontada no estudo empírico foi a dificuldade dos estudantes em lidar com enunciados expressos na linguagem das razões e proporções. Conforme argumentado, essa dificuldade pode se tornar um problema quando os licenciandos não conseguem compreender o que se quer dizer, como aconteceu no estudo empírico. Uma forma simples de contornar esse problema é expressar os enunciados em linguagem moderna, clarificando seu significado sem perdas de informações. Por exemplo, no seguinte enunciado de Galileu (usado em um dos exercícios de sala de aula)

“Quanto aos tempos de oscilação dos corpos suspensos por fios de diferentes comprimentos, eles guardam entre si a mesma proporção que as raízes quadradas dos comprimentos do fio; ou, pode-se dizer que os comprimentos estão entre si como os quadrados dos tempos”,

bastaria acrescentar entre parênteses $T_1/T_2 = \sqrt{L_1/L_2}$ ou $(T_1/T_2)^2 = L_1/L_2$, onde T se refere ao período de oscilação do pêndulo e L , ao comprimento. Por mais trivial que a modificação possa parecer, ela permite a compreensão do enunciado.

Até aqui, elaborou-se as particularidades das praxeologias que foram consideradas mais importantes para elucidar as hipóteses basilares da MC, de acordo com a metodologia de Lima e Heidemann (2023). O passo seguinte é a construção de uma praxeologia para o ensino, tendo em vista a integração desses conhecimentos no contexto da disciplina, construindo assim um MER e um MDR próprios de uma disciplina como a Mecânica Clássica para a Licenciatura. Os saberes em torno dessas praxeologias são necessários para delimitar, interpretar, relacionar e explicitar a razão de ser dos conhecimentos a serem ensinados.

A construção almejada segue a linha proposta por Ruiz-Olarría (2015), de acordo com a qual a problemática inicial a ser trazida no contexto de formação deve ser uma questão pertinente relacionada à praxeologia da profissão docente. As respostas a essa questão e às questões derivadas devem ser dadas tendo em vista o contexto de ensino desses saberes, isto é, o Ensino Médio (exceto a praxeologia associada às Equações de Euler-Lagrange). Como discutido na Seção 3.1, a exploração coletiva dessas questões no âmbito de formação faz parte do processo de desenvolvimento do MER e MDR pelos próprios professores. Novamente, adota-se o esquema herbatiano como MDR, tendo em conta as três principais dialéticas de estudo (cronogênese, mesogênese e topogênese). A seguir as questões que guiam esse processo de construção são elucidadas.

Uma possível questão geradora/inicial é a seguinte:

Q₀ : Qual o papel que tem ou poderia ter o ensino da Mecânica Clássica no Ensino Médio?

Uma possível resposta a essa questão é que o papel atual do ensino de MC é essencialmente o do ensino transmissivo, isto é, o de prover os estudantes um conjunto de tarefas e técnicas formais, às quais, muitas vezes, os estudantes devem replicar respostas previamente conhecidas. Ainda, a despeito de sua ampla utilidade, é comum que a aplicação das técnicas aprendidas sejam limitadas a um contexto específico, além de ter sua motivação original esvanecida, minando a razão de ser do conhecimento. O papel que a MC poderia ter é ser um instrumento de compreensão não ingênua do mundo; em particular, a MC poderia ser apresentada ressaltando elementos do paradigma epistemológico da TAD e da aceção de Lima e Heidemann (2023) sobre as hipóteses.

Nessa perspectiva, pode-se: a) evidenciar o caráter hipotético-dedutivo do conhecimento científico; b) representar o processo de construção do conhecimento como um encadeamento de perguntas e respostas; c) evocar a importância de elementos contextuais e coletivos na produção do conhecimento, e, com isso; d) destacar a razão de ser dos saberes.

A resposta suscita novas questões que precisam ser devidamente endereçadas. Para fins de clareza, essas questões e respostas são apresentadas gradualmente:

Q_1 : Quais conhecimentos⁵⁰ da Mecânica têm potencial de fomentar um ensino com essas características?

Na disciplina de Mecânica Clássica para Licenciatura, diversos conceitos são abordados, incluindo conhecimentos que não foram levantados no estudo bibliográfico (Estudo 1), como Oscilações, Momento Angular, Energia, Referenciais Não Inerciais e Dinâmica Não Linear. A questão Q_1 pode ser levantada ao se iniciar o estudo de qualquer um desses tópicos. No entanto, é especialmente relevante buscar respondê-la quando se discutem praxeologias relacionadas à Antiperistasis, Queda dos Graves, Teoria da Gravitação Universal, Leis de Newton e a Equação de Euler-Lagrange. Isso ocorre porque, conforme argumentado na justificativa da escolha desses episódios, eles contêm a gênese das hipóteses fundamentais da Mecânica, que são evocadas na construção de conceitos derivados, como os mencionados no início deste parágrafo. Com exceção das Equações de Euler-Lagrange, as demais praxeologias são temas de transposição didática para o Ensino Médio.

Para que a questão Q_1 faça sentido no contexto global da disciplina, os estudantes precisam ser motivados por subquestões pertinentes do campo da Física, que servem como pano de fundo para todas as discussões. Sem isso, as respostas dos licenciandos tenderão a ser pouco sofisticadas. Uma forma de trazer à tona esses conceitos, englobando todos os conteúdos da disciplina de Mecânica Clássica, é guiando as aulas pela busca de respostas a situações problemáticas que vão sendo resolvidas ao longo do semestre. Para esse fim, sugerem-se as situações-problema propostas na primeira versão da disciplina, conforme detalhado no Apêndice A. Ressalta-se que as situações-problema propostas não fazem

⁵⁰ A palavra 'praxeologia' foi evitada pelo mesmo motivo que levou à decisão de não classificar as hipóteses em cosmovisivas, ontológicas e representacionais na implementação do estudo empírico, isto é, para não sobrecarregar o ensino de física com detalhes teóricos excessivos que poderiam dificultar o aprendizado.

parte do MER e do MDR, servindo apenas como ilustração sobre como a questão Q_1 faria sentido no contexto global da disciplina.

A primeira situação-problema utilizada na primeira aplicação da disciplina foi motivada pela visão mecanicista da Ciência, comum à época de Laplace. Ela envolve a seguinte subquestão⁵¹:

Pensando em eventos clássicos, podemos dizer que, se soubermos o estado de um sistema e todas as forças que agem sobre ele, podemos determinar o seu futuro? Se podemos determiná-lo, podemos prevêê-lo?

Para responder a essa questão, é necessário analisar os princípios que regem os movimentos dos corpos, percorrendo um longo caminho até as Leis de Newton. Nesse caminho, pode-se incluir os episódios históricos relacionados com as praxeologias da Antiperistasis, Queda dos Graves e Leis de Newton, oportunizando a introdução de Q_1 . Após os estudos iniciais, a resposta à questão é que, sim, pela teoria Newtoniana, conhecendo-se as forças, os movimentos são, ao menos em princípio, determinados e previsíveis.

Seguindo o semestre, apresenta-se uma situação-problema que coloca em cheque a validade da teoria newtoniana: a de uma mudança de movimento sem causa, como ocorre com passageiros de um veículo que sentem uma força quando o veículo freia bruscamente. Uma subquestão pertinente é:

Como explicar esses eventos? Quais as implicações desses eventos?

Sucedesse essa pergunta o estudo sobre as forças de inércia, que surgem quando o referencial em que se aplicam as leis de Newton está acelerado. Esse tópico não foi abordado sob a ótica das hipóteses neste trabalho, mas faz parte de um curso de MC. Respondendo à pergunta, a explicação desses eventos é construída com a mobilização de forças de inércia (fictícias), que decorrem da não invariância das leis de Newton para referenciais não inerciais. Tipicamente, a discussão sobre referenciais não inerciais sucede o estudo sobre gravitação. Neste caso, opta-se por apresentar esse tópico antes para abordar o problema das marés fazendo uso do conceito de forças de inércia. A situação problemática envolve as críticas de Galileu aos defensores da ideia de que a Lua poderia exercer alguma ação à distância sobre as águas, com a seguinte subquestão:

Seria possível explicarmos os ciclos de maré negando a existência de forças com ação à distância? Se não, como podemos entender os efeitos de maré?

⁵¹ As situações-problema completas (disponíveis no Apêndice A) são omitidas aqui para não estender demasiadamente o texto.

Para responder a essas questões, recorre-se ao estudo da Gravitação Universal, oportunizando a retomada da questão Q_1 , que pode ser discutida à luz do episódio histórico centrado nas hipóteses. A resposta da questão levantada é que a teoria de gravitação newtoniana é um postulado de ação à distância, mas que o próprio Newton possivelmente não acreditava nisso. O efeito das marés pode ser entendido como um efeito conjunto da atração gravitacional e das forças de inércia atuando na Terra devido a sua rotação e translação em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua.

A próxima situação-problema é motivada pelos estudos de Poincaré sobre o problema dos três corpos, que marcou o início da Teoria do Caos (Dinâmica Não Linear) na Física. A subquestão associada é:

Podemos dizer que tal teoria se contrapõe ao determinismo? Ela mostra que o universo é aleatório, comprometendo um dos pilares da Ciência?

Neste trabalho, o episódio histórico sobre a concepção da Teoria do Caos não foi avaliado do ponto de vista das hipóteses. Uma forma interessante de abordar esse assunto nos cursos de licenciatura (e bacharelado) é por meio de recursos computacionais, como feito na disciplina e discutido em detalhes neste artigo (Weber, Heidemann e Martins, 2023). O estudo da Teoria do Caos na MC mostra, em resposta à questão formulada, que o Universo não é aleatório. Entretanto, apesar das leis da mecânica serem deterministas, para diversos sistemas físicos de interesse, torna-se impossível fazer previsões por tempos indeterminadamente longos, e, em muitos casos, até mesmo para períodos curtos.

Por fim, a última situação-problema diz respeito a situações físicas em que a análise do problema se torna muito difícil à luz da mecânica newtoniana, como é o caso do tratamento do pêndulo-duplo. A subquestão é:

Como podemos investigar o comportamento caótico de um pêndulo duplo? Será que só podemos investigar sua evolução temporal empiricamente? Podemos construir equações de movimento para esse sistema?

Para abordar o problema, desenvolve-se o formalismo lagrangiano, evocando novamente a questão Q_1 . O episódio histórico sobre as Equações de Euler-Lagrange pode ser estudado e os conhecimentos prévios sobre dinâmica não-linear podem ser utilizados para dar uma resposta às questões formuladas.

Com isso, espera-se ter elucidado como a questão Q_1 poderia se encaixar especificamente no contexto de uma disciplina de MC. Essa questão seria evocada diversas

vezes ao longo do semestre, em momentos oportunos, como os citados acima. A questão a seguir visa delimitar os temas que podem ser alvos da transposição ao Ensino Médio.

Q₂ : Quais elementos desses conhecimentos podem ser discutidos no Ensino Médio?

Possíveis respostas à questão Q₂ estão ilustradas nas Tabelas 6.2.1, 7.1.1, 7.1.2 e 7.1.3 assim como nas tarefas propostas. No caso do Ensino Superior, a Tabela 7.1.4 e as tarefas sobre as Equações de Euler-Lagrange são parte dessa lista. Os conhecimentos elucidados nessas praxeologias podem ser alvos da transposição didática em nível médio, cabendo aos professores avaliar a pertinência da introdução de um ou outro aspecto a depender do contexto. Assim, uma dimensão que surge naturalmente diz respeito à forma como os futuros professores abordarão esses conhecimentos em sala de aula. As praxeologias precisam ser apresentadas aos estudantes como respostas às questões que são pertinentes ao contexto do Ensino Médio. Em outras palavras, a razão de ser do estudo da Mecânica precisa ser justificada do ponto de vista do estudante de Ensino Médio. Assim, pode-se colocar a indagação:

Q₃ : Quais questões problemáticas que, colocadas no contexto do Ensino Médio, exigem inevitavelmente uso desses conhecimentos da Mecânica Clássica e, portanto, tornam explícitas sua razão de ser?

Para responder a essa questão, cabe explicitar, inicialmente, algumas questões problemáticas que teriam um efeito diferente do desejado. Por exemplo, questões do tipo: “Por que corpos diferentes caem com velocidades iguais?”; “Por que somos puxados para trás quando estamos sentados em um veículo que acelera?” ou; “Como funciona o fenômeno das marés?”, são perguntas legítimas e pertinentes no contexto do Ensino Médio, requerendo inevitavelmente os conhecimentos da Mecânica para serem respondidas. Entretanto, essas questões não evocam grande parte dos conhecimentos levantados nas praxeologias alternativas descritas anteriormente. O modelo epistemológico dominante dispõe de respostas prontas para tais questões, respostas essas que não evocam a razão de ser dos conhecimentos da MC. As seguintes questões, colocadas a título de exemplo, não podem ser respondidas pelo modelo epistemológico dominante:

- **Antiperistasis:** Por que se acreditava que era necessária a presença de força para haver movimento?

- **Queda dos Graves:** O que motivou os cientistas a decompor movimentos em diferentes componentes?
- **Teoria da Gravitação Universal:** Se episódio da queda da maçã é um mito, como os cientistas formularam a lei da força inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os planetas?
- **Leis de Newton:** Como experimentos com colisões permitiram a elaboração das três leis de movimento?
- **Equações de Euler-Lagrange:** Quais princípios fundamentais da Mecânica sustentam a Mecânica Analítica?

Nota-se que, as questões evitam expressões do tipo “Leis de Newton” e “Teoria de Galileu”, já como forma de tirar o foco da construção individual de um ou outro cientista e enfatizar o empreendimento coletivo. Para responder às questões formuladas, é necessário uma série de justificativas que só se deixam formular com base em uma série de elementos contextuais e hipotéticos associados aos conhecimentos em questão. Em razão dos resultados do estudo empírico, optou-se por modificar o MDR provisório, conforme explicado a seguir.

No contexto do estudo empírico, os futuros professores eram estimulados a pensar em “questões problemáticas”, na forma de questões geradoras para construir um diagrama Q-R. Essa era a última etapa do MDR provisório, após os estudantes terem executado uma série de atividades. As principais restrições identificadas no Estudo 2 foram que: a) o professor não teria tempo para aplicar todos os instrumentos delineados; b) as atividades foram trabalhosas para os estudantes, demandando demasiado trabalho extraclasse, incompatível com as demais demandas das disciplinas recomendadas para serem cursadas concomitantemente. A nova abordagem precisa levar essas restrições em consideração.

Uma condição favorável identificada no estudo empírico foi a disponibilidade de um texto elucidando os elementos teóricos e contextuais da praxeologia em questão (bloco teórico) com enfoque nas hipóteses basilares, como o texto da disciplina. A explicitação dos referidos elementos foi de grande auxílio na construção das tarefas (bloco prático). O Estudo 2 também mostrou que o diagrama Q-R coletivamente construído se constitui em uma boa representação da praxeologia de referência, indicando que o envolvimento conjunto na construção do diagrama Q-R é uma boa forma de estudar a praxeologia a ensinar. Apesar disso, a construção do diagrama foi considerada particularmente difícil pelos licenciandos. Outra condição desfavorável foi a tendência dos licenciandos em criar mais respostas do que questões. Conforme discutido nas conclusões do estudo empírico, isso denota que os conhecimentos são preferencialmente evocados sem razão de ser claramente identificável,

dificultando o exercício da vigilância epistemológica. Levando em conta as condições e restrições detectadas, pensou-se na seguinte reestruturação das atividades a serem propostas no MDR.

Como primeira atividade, pode-se pedir para que os estudantes leiam o texto da disciplina e preencham as lacunas de um diagrama Q-R semipreenchido. Nesse diagrama, há espaços vazios, correspondentes às respostas R1, R2, ... formuladas pelos cientistas na concepção dos conhecimentos. O novo diagrama Q-R também se diferencia do anterior pela: a) incorporação de elementos contextuais, que servem de referência para a proposição de questões; e b) ausência das tarefas, que antes eram associadas às respostas⁵². Uma versão completa do diagrama Q-R semipreenchido estaria a disposição do(a) professor(a) para correção. A inclusão dos elementos contextuais e das questões atenuam a dificuldade da tarefa, sem comprometer os aspectos positivos anteriormente identificados. Para fomentar que todos os participantes atuem na construção das praxeologias, o preenchimento das lacunas pelos estudantes não seria no diagrama Q-R em si, mas num portfólio *online*, contendo espaços para os estudantes registrarem, individualmente, as suas respostas R1, R2, ..., com base na leitura dos materiais à disposição. Na aula, o(a) professor(a) pode discutir as respostas e questões formuladas pelos estudantes e selecionar, por consenso, qual é a melhor formulação para ser usada na versão preenchida do diagrama Q-R. Nessa dinâmica, o(a) professor(a) tem liberdade de decidir quantas lacunas no diagrama serão deixadas, podendo assim regular o tempo dedicado à atividade em sala de aula. Uma vez pronto, o(a) professor(a) pode documentar o diagrama Q-R produzido coletivamente no portfólio, mantendo as respostas prévias dos estudantes.

A etapa descrita no parágrafo anterior equivale à elucidação dos blocos teóricos das praxeologias nessa nova versão do MDR. Ela toma um tempo consideravelmente menor para execução, já que o diagrama Q-R não é concebido a partir do zero. Apesar disso, a tarefa envolve os estudantes na medida em que as conexões entre as questões e respostas precisam ser feitas a partir da praxeologia descrita no texto da disciplina, a principal *media* da investigação, destacando a razão de ser do conhecimento. O aspecto colaborativo também é mantido, sendo efetivado pelo uso do portfólio *online*, outra condição favorável identificada no Estudo 2. Conforme identificado, essa etapa é crucial para incentivar a responsabilidade coletiva, parte integrante da topogênese do estudo. A utilização de um diagrama Q-R preconcebido também é útil para dar conta da condição desfavorável

52 Nessa nova versão do MDR, a confecção das tarefas ocorre depois da construção do diagrama Q-R, conforme explicado a seguir.

identificada, segundo a qual os licenciandos tendem a dar mais respostas do que fazer perguntas (ou fornecer respostas a perguntas não feitas).

Para evitar estender demasiadamente este trabalho e minimizar repetições, descreve-se apenas alguns elementos de um dos diagramas concebidos. Todos os diagramas Q-R estão disponíveis no Apêndice F, juntamente de suas versões semipreenchidas. Na Figura 7.1.1, apresenta-se o diagrama Q-R completo sobre Leis de Newton, que, nessa nova versão, constitui-se em uma representação do bloco teórico da praxeologia.

O diagrama contém quatro elementos: 1) a questão problemática sugerida em resposta à questão Q_3 , destacada pelo retângulo de cor laranja; 2) os elementos contextuais, representados por elipses amarelas; 3) as Questões (Q) derivadas, nos retângulos acinzentados; e 4) as Respostas (R), nos retângulos brancos.

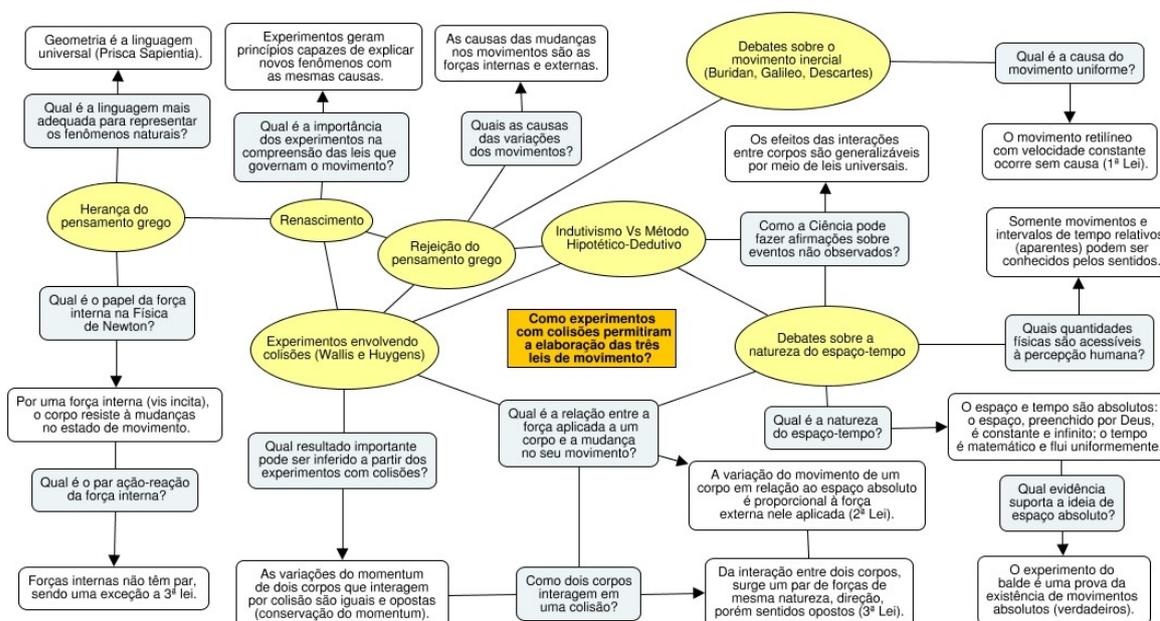


Figure 7.1.1: Diagrama Q-R representando o bloco teórico da praxeologia sobre as Leis de Newton. No diagrama semipreenchido, as respostas (R) contidas nos retângulos brancos seriam substituídas por R1, R2, ...

A questão problemática, colocada no centro do diagrama, é um lembrete da razão de ser das respostas elaboradas. Conforme mencionado, essa questão é apenas um exemplo, podendo haver inúmeras questões diferentes que dariam sentido ao diagrama. Na construção, fica evidente que os elementos contextuais motivam as questões e influenciam nas respostas obtidas. Por exemplo, como resultado do elemento contextual “Herança do pensamento grego” (canto superior esquerdo), nuances da construção newtoniana podem ser compreendidos a partir de novos questionamentos. A partir da questão “Qual é o papel da força interna na Física de Newton?”, evidencia-se como resposta a manutenção do

antigo conceito de *vis incita*, resgatando um princípio finalístico à matéria, neste caso, a “vontade” de manter seu estado de movimento. A resposta gera uma outra questão: “Qual o par ação-reação da força interna”. A resposta evidencia uma particularidade pouco discutida da construção newtoniana, isto é, a inexistência de um par ação-reação para a força interna.

A “Herança do pensamento grego” está intimamente relacionada com outro elemento contextual, o “Renascimento”, que se conecta com outros elementos contextuais, como “Rejeição do pensamento grego” e “Experimentos envolvendo colisões”. De fato, o Renascimento abriu as portas tanto para o aproveitamento, quanto para as críticas ao pensamento clássico. O uso da experimentação como ferramenta da investigação científica também é próprio do período. O diagrama contém elementos suficientes para responder à questão problemática originalmente formulada. Nesse caso, pode-se argumentar que os experimentos com colisões estabeleceram a conservação do momentum como uma lei empírica. A partir disso, pela definição da força como taxa de variação do momentum, tem-se a resposta para a origem da segunda e terceira lei. Já a primeira lei do movimento não tem origem nesses experimentos e sim em debates teóricos, de natureza filosófica, sobre o movimento inercial, que vêm desde Jean Buridan, em desacordo com o pensamento grego.

Todos esses conhecimentos questionam o conhecimento a ser ensinado tendo em vista o saber original. Nesse sentido, a construção é própria para o exercício da vigilância epistemológica. Com isso, considera-se respondida a questão Q_3 . A construção dos diagramas Q-R por parte dos estudantes ilustra os blocos teóricos das praxeologias. A seguir, discute-se a construção dos seus blocos práticos. No contexto de formação, isso pode ser motivado por meio da seguinte questão:

Q₄ : Que tarefas específicas que, colocadas no contexto do Ensino Médio, podem dar sentido aos conhecimentos identificadas no diagrama Q-R?

A questão Q_4 evoca um problema de ordem prática enfrentado pelos professores. Antes de responder à questão, é conveniente lembrar alguns resultados do Estudo 2. No estudo empírico, o bloco teórico era considerado completo após a construção do quadro com elementos teóricos e práticos. Na sequência, os estudantes construíam as tarefas voltadas ao Ensino Médio para completar o bloco prático da praxeologia. Uma condição desfavorável identificada nessa dinâmica foi a tendência natural dos estudantes de realizarem atividades excessivamente abertas, sem razão de ser. A identificação dos tipos de tarefa foi considerado uma atividade complexa, demandando demasiado tempo. Nas conclusões do Estudo 2, argumentou-se que a dificuldade em criar tarefas objetivas é um

empecilho para a discussão de conceitos específicos, dificultando o exercício da vigilância epistemológica. Pensando nisso e nas restrições impostas pelo tempo, propõe-se uma nova forma de conceber as tarefas.

Em vez de pedir para os licenciandos realizarem tarefas preenchendo uma série de colunas como antes (dimensão teórica, dimensão prática, tarefas, relação entre os elementos das duas dimensões na tarefa e procedimentos didáticos), propõe-se que completem uma tabela semipreenchida com três colunas, a primeira delas sendo o “tipo de tarefa” (previamente preenchida), a segunda “questão” e a terceira “tarefa”. A coluna com o “tipo de tarefa” é sempre preenchida com as informações do MER da praxeologia em questão (terceira coluna das Tabelas 6.2.1, 7.1.1, 7.1.3, 7.1.2 e 7.1.4). Ela serve para orientar, em linhas gerais, a criação da tarefa pelos licenciandos. A segunda e terceira colunas contêm lacunas a serem preenchidas. Na coluna “questão”, o licenciando deve apontar, preferencialmente, uma única questão (Q) do diagrama Q-R, compatível com a tarefa construída na coluna seguinte. Assim, a tarefa deve corresponder ao “tipo de tarefa” designado e ter sua razão de ser explícita pela questão (Q) associada. Exceto a Antiperistasis, com oito tipos de tarefas, as praxeologias da Queda dos Graves, Gravitação Universal, Leis de Newton e Equações de Euler-Lagrange tiveram seis cada. Assim, o(a) professor(a) pode pedir que os estudantes construam “n” tarefas dentre os seis/oito tipos de tarefas, regulando a quantidade com base no tempo disponível. Em casos de turmas pequenas, cada estudante poderia ficar responsável por preencher uma linha da tabela, por exemplo. Cada estudante da turma publicaria sua contribuição diretamente no portfólio, a partir da qual ocorreriam discussões entre o(a) professor(a) e os estudantes em sala de aula.

A Tabela 7.1.5 ilustra como seria essa construção, quando completa pelos estudantes, para a praxeologia das Leis de Newton.

Table 7.1.5: Bloco prático da praxeologia sobre as Leis de Newton. As colunas “Questão” e “Tarefa” estão inicialmente em branco e são preenchidas pelos licenciandos.

Tipo de tarefa	Questão	Tarefa
Questionar concepções epistemológicas	Qual é a linguagem mais adequada para representar os fenômenos naturais?	Possivelmente, a fórmula mais famosa da Física - depois da equação de Einstein: $E=mc^2$ - seja a segunda lei de Newton, comumente escrita como: $F=ma$. Entretanto, Newton jamais escreveu essa fórmula, tampouco usou o conceito de aceleração. Como Newton expressava a segunda lei? Por que?
Evidenciar elementos do processo de	Como a Ciência pode fazer afirmações sobre	Antes de Newton, diferentes cientistas estavam estudando a colisão entre os corpos. Por exemplo, o famoso experimento conhecido como Pêndulo de Newton (um experimento de colisões), forneceu

construção do conhecimento científico	eventos não observados?	conhecimentos necessários para que Newton descrevesse o movimento de corpos na Terra e dos planetas nos céus. Sobre esse caso em particular, responda: a) Como um experimento com pêndulos pode levar a conclusões sobre planetas? b) Antes de fazer
Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio da conservação do movimento	Como dois corpos interagem em uma colisão?	Um projétil de 30g de massa é disparado a 1000 km/h na direção de um bloco de madeira de 1kg suspenso por um fio e em repouso. O projétil atravessa o bloco, saindo do outro lado com velocidade de 200 km/h. a) Qual a quantidade de movimento do sistema? b) Qual a velocidade do bloco após ser atingido? c) Se o projétil não tivesse atravessado o bloco, qual seria sua velocidade após o impacto?
Discutir a causalidade na Física	Quais as causas das variações dos movimentos?	Compare as explicações de Aristóteles e Galileu sobre as causas do movimento com as de Newton. Para cada um deles, disserte sobre as questões: a) o que faz corpos se moverem ou mudarem seus movimentos?; b) Movimentos requerem força?; c) Forças são internas ou externas?
Problematizar a noção de espaço e tempo absolutos.	Qual é a natureza do espaço-tempo?	O que significa espaço absoluto? Como esse conceito foi usado para definir referenciais inerciais? E tempo absoluto? Que implicações a aceitação da ideia de tempo absoluto teve na teoria de Newton?"
Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio do conceito de força	Qual é a relação entre a força aplicada a um corpo e a mudança no seu movimento?	Uma pessoa em pé sobre um ônibus sente uma tendência de movimento quando o ônibus acelera. Considerando um ônibus de 10ton e uma pessoa de 60kg, qual o módulo da força sentida pela pessoa quando o motor do ônibus aplica uma força de 5kN sobre a carroceria?

Na Tabela 7.1.5, a coluna “Questões” foi preenchida com questões do diagrama Q-R sobre Leis de Newton (Figura 7.1.1). A coluna “Tarefa” foi preenchida com as tarefas sugeridas logo abaixo da Tabela 7.1.3, que representa o MER das Leis de Newton. Como se vê pela tabela, a construção das tarefas é orientada principalmente pela coluna “Tipo de tarefa”, previamente preenchida. A coluna “Questão” não é previamente preenchida porque são os estudantes que constroem as questões, a partir do diagrama Q-R coletivo. Assim, ao montar as tarefas, os licenciandos são forçados a pensar em questões do tipo: “Para que serve essa tarefa?” e “Qual questão essa tarefa responde?”. Por exemplo, a primeira linha da tabela contém uma tarefa do tipo “Questionar concepções epistemológicas”, envolvendo questionamentos sobre a fórmula “ $F=ma$ ” e a noção de aceleração, conceitos amplamente difundidos pelo modelo epistemológico dominante como provenientes de Newton. A tarefa é orientada pela questão (Q) “Qual é a linguagem mais adequada para representar os fenômenos naturais?”, que bota em cheque o saber dominante, pois, como já discutido

neste trabalho, Newton trabalhava com razões e proporções e não tinha necessidade de definir um conceito como aceleração.

Em que momento uma praxeologia da Física deixa de ser estudada e se inicia o estudo de outros conhecimentos? Como justificar essa transição? Segundo Sierra (2006, p. 47-48, grifo nosso):

[...] o MER pode ser expresso na forma de uma sucessão de praxeologias que correspondem à elaboração de respostas parciais a uma questão problemática inicial. Cada praxeologia na sucessão surge como uma ampliação ou desenvolvimento da praxeologia anterior, em face das limitações desta última em fornecer respostas às questões colocadas. É essa dinâmica que permite que a **razão de ser** de cada praxeologia seja revelada, isto é, como uma resposta às limitações da praxeologia anterior.

De fato, foi admitido na construção das praxeologias que as mesmas possuem limitações. São exatamente essas limitações que evidenciam a necessidade de adotar outras praxeologias, mais complexas e de maior poder explicativo. No MER proposto, o processo de estudo da MC é movido por essa dinâmica. Assim, uma questão pertinente é:

Q₅ : Que elementos manifestam contundentemente as limitações dos saberes a serem ensinados, provocando a emergência de novos conhecimentos?

A evolução do estudo até aqui permite aos estudantes analisar, comparar e questionar o conhecimento. Essa atividade permite expor as limitações das praxeologias estudadas, justificando a busca por novos saberes. Assim, para fornecer uma resposta completa a essa questão, aplicável a cada praxeologia, cabe destacar os elementos mais comprometedores, que podem eventualmente servir de justificativa para iniciar um novo processo de estudo.

A praxeologia aristotélica é manifestamente incorreta em vários aspectos, principalmente com relação ao movimento. Como observou Galileu, em seu típico tom combativo: "*Aristóteles não sabia nada de Física e sobretudo no que diz respeito ao movimento local, esteve quase sempre longe da verdade*" (KOYRÉ, 1980, p. 53). De fato, basta observar com atenção ao lançamento de uma pedra para notar que seu movimento não pode ser um discreto composto de um movimento retilíneo na direção do lançamento, e outro movimento retilíneo vertical, em direção ao centro da Terra. Esse certamente é um ponto fraco da teoria aristotélica que pode ser usado para legitimar explicações alternativas. Os demais argumentos de Aristóteles são, em verdade, muito intuitivos e de difícil

contraponto, especialmente no Ensino Médio. Conforme comentado, muitos estudantes têm fortes concepções aristotélicas.

A praxeologia galileana tem seu maior ponto fraco no que diz respeito à explicação das causas do movimento, da explicação do fenômeno das colisões e da Gravidade. Galileu oferece uma descrição essencialmente cinemática dos movimentos. Como discutido, ele preferiu não especular sobre os mecanismos da gravidade, preservando a concepção aristotélica de movimento “natural”. Quanto aos problemas na explicação dos fenômenos, Galileu não podia explicar o porquê de corpos mais pesados caírem ao mesmo tempo que os mais leves. Também não conseguia explicar a interação entre corpos em movimento: a conservação do movimento nas colisões só foi posteriormente consolidada por outros cientistas. Ainda, sua teoria envolvia uma aceleração gravitacional constante, o que é verdade somente nas proximidades da superfície da Terra (para constatar isso no Ensino Médio, basta calcular a aceleração centrípeta da Lua). Newton tinha uma resposta para essas questões. Esses argumentos justificam tanto o estudo da praxeologia das três leis, quanto da praxeologia sobre a gravitação universal. Tipicamente, aí se encerra a maior parte do estudo da Mecânica no Ensino Médio. No contexto da educação superior, ainda cabem críticas à formulação de Newton e de Lagrange.

A teoria Newtoniana é comumente criticada em razão de sua formulação vetorial, já que é difícil lidar com vetores quando os sistemas se tornam mais complexos. O enfoque nas forças em detrimento da energia do sistema também abriga uma concepção excessivamente mecanicista da realidade. A Mecânica Analítica resolve esses problemas por meio do enfoque nas energias e em quantidades escalares. Em termos de poder explicativo, ambas as formulações são equivalentes. Os maiores problemas das duas praxeologias são percebidos no limite relativístico de grandes velocidades ou concentrações de matéria. No entanto, as praxeologias em torno dos conhecimentos que resolvem esses problemas estão em outra área da Física.

Uma vez explicitadas as limitações de cada praxeologia, resta saber qual a praxeologia seguinte a ser estudada. Por isso, cabe uma última questão:

Q₆ : Qual a melhor ordem de apresentação desses conhecimentos aos estudantes no Ensino Médio?

Propõe-se que a apresentação das praxeologias associadas aos respectivos saberes seja na seguinte ordem: “Antiperistasis” (Tabela 7.1.1), “Queda dos Graves” (Tabela 6.2.1),

“Leis de Newton” (Tabela 7.1.2), “Teoria da Gravitação Universal” (Tabela 7.1.3) e “Equações de Euler-Lagrange” (Tabela 7.1.4). A seguir, justifica-se essa escolha.

Como foi discutido no estudo bibliográfico, a formulação aristotélica foi uma das primeiras tentativas quantitativas de descrever o movimento dos corpos terrenos e celestes. Além das tentativas de descrição de movimentos, a cosmovisão aristotélica influenciou profundamente todas as construções posteriores da Mecânica, até mesmo nas formulações analíticas, como demonstrado pelo uso do PTV na fundamentação das equações de Euler-Lagrange. Assim, ao conceber um ensino de Mecânica que não envolva as ideias aristotélicas, abre-se mão de compreender a razão de ser de todos os saberes construídos posteriormente nessa área. Os conhecimentos em torno da praxeologia relacionada à Antiperistasis, depois de quase dois mil anos de validade, foram finalmente contestados e suas limitações apontadas, principalmente por Galileu.

Os saberes relacionados à praxeologia representando o modelo de Queda dos Graves representaram uma avanço em relação à concepção anterior em vários aspectos. Por exemplo, a Matemática passou a fazer parte indispensável das teorias sobre a natureza, que antes tinham feição muito mais qualitativa; intervalos de tempo, antes desconsiderados, passaram a ser usados na descrição de fenômenos; admitiu-se a hipótese da inércia; eliminou-se a necessidade da presença de forças para sustentar movimentos violentos; incorporou-se definitivamente a (quase inexistente) experimentação no seio das ciências naturais como uma contraparte indispensável do processo de elaboração de teorias. Subsequentemente, a praxeologia galileana sofreu um aporte significativo por parte de Newton, tanto com a elaboração das três leis, quanto na descrição da gravitação.

A formulação newtoniana em torno da praxeologia “Leis de Newton”, apesar de trazer elementos novos, ainda se apoia, em alguma medida, em pensamentos originados na descrição aristotélica e galileana do mundo. Por exemplo, Newton ainda usa a Matemática das razões e proporções e a geometria como a linguagem mais adequada para descrever fenômenos naturais; também usa o conceito de força interna, porém agora assumindo um papel de conservação da inércia dos corpos. Por outro lado, outros aspectos colocaram a praxeologia newtoniana em outro patamar explicativo da realidade, superando assim as praxeologias anteriores. Dentre os principais, pode-se citar: o entendimento das forças impressas como as causas da variação na quantidade de movimento, e não de sua manutenção; os avanços no tratamento matemático, manifesto no emprego do cálculo, e; a representação das interações entre os corpos como pares de forças iguais e opostas. A consolidação dessa praxeologia forneceu ferramentas teóricas e práticas para que Newton construísse explicações satisfatórias para o movimento celeste.

De fato, a praxeologia associada à gravitação universal está intimamente relacionada com a praxeologia em torno das três leis. Ela também preserva elementos das praxeologias anteriores, como a concepção de universo cheio, manifesta pela hipótese do éter; ao mesmo tempo, nega e substitui outras concepções, como a dicotomia céu-Terra em favor da universalidade das leis da natureza. A praxeologia newtoniana para descrição do movimento celeste superou as anteriores em vários aspectos. Dentre os principais, pode-se citar: a descrição do movimento dos astros como resultado do efeito de forças centrípetas, em substituição das forças “centrífugas”; a dependência funcional entre a força e a distância, manifesta pela lei do inverso do quadrado, que melhora a aproximação galileiana de aceleração constante e ; o postulado da interação à distância e instantânea do par de forças atrativas.

Por mais que a formulação newtoniana tenha estendido muito o poder explicativo da Mecânica Clássica, suas limitações motivaram o desenvolvimento de outras praxeologias. Os conhecimentos relacionados à equação de Euler-Lagrange inauguraram uma nova forma de conceber a Mecânica, agora sob a ótica de princípios variacionais. Variáveis como tempo instantâneo “ t ”, energia, coordenadas generalizadas e deslocamentos virtuais infinitesimais fazem parte do novo discurso tecnológico. Elementos das praxeologias anteriores são incorporados e reinterpretados, com destaque para dois: a lei da alavanca, usada desde Aristóteles para descrever sistemas estáticos, agora recebe o aporte dos deslocamentos virtuais compatíveis com os vínculos; a fórmula $F=ma$, associada com a praxeologia newtoniana, agora é usada como força aceleradora fictícia na lei da alavanca para descrever sistemas dinâmicos.

Os aspectos aqui citados evidenciaram como as praxeologias da MC consideradas se relacionam entre si. Eles mostram como as praxeologias poderiam ser organizadas de forma hierárquica em níveis de complexificação, cada uma superando, aportando ou ressignificando elementos dos blocos teórico e prático da praxeologia anterior. Ao mesmo tempo, a construção reflete as interconexões intrínsecas e indissociáveis entre as praxeologias, refletindo a coletividade e complexidade do fazer científico. Por fim, a explicitação das interconexões mencionadas favorece a concepção de que o processo de construção do conhecimento científico é não-linear, combatendo uma percepção determinista e cientificista de que o saber evolui de forma inexorável, sempre superando as contribuições anteriores.

Com isso, elucidou-se as três dialéticas principais do processo de estudo. A cronogênese é representada pela busca por respostas às questões Q_0 a Q_6 , que ocorrem ao longo de toda a disciplina. A mesogênese diz respeito à evolução do *milieu*, que

envolve a obtenção de conhecimentos a partir dos textos elaborados especialmente para essa disciplina (Weber; Heidemann, 2024), a principal *media* à disposição dos licenciandos. Esses conhecimentos envolvem: a) as respostas às questões Q_0 a Q_6 ; b) os diagramas Q-R construídos coletivamente a partir das respostas consensuais; e c) as tarefas voltadas ao Ensino Médio. A topogênese pode ser descrita em termos das responsabilidades atribuídas aos licenciandos e a(o) professor(a) da disciplina: o(a) professor(a) é responsável por fornecer os materiais didáticos, propondo inclusive materiais alternativos para proporcionar a busca por conhecimento, promover as discussões em sala de aula sobre os elementos praxeológicos a partir das questões Q_0 a Q_6 e alimentar o portfólio eletrônico. Os estudantes são responsáveis por ler os materiais disponibilizados, realizar pesquisas, propor respostas R1, R2, ... para a construção do diagrama Q-R e propor tarefas adequadas ao Ensino Médio a partir do diagrama Q-R coletivamente construído. Ao final da disciplina, o portfólio serve como testemunho da investigação e contém subsídios para uma resposta coletivamente construída para a questão geradora Q_0 .

7.2 CONCLUSÃO DO ESTUDO 3

A questão de pesquisa que se buscou responder por meio deste estudo foi:

QUESTÃO DE PESQUISA 4: Como devem ser os modelos epistemológico e didático de referência em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura da UFRGS para formação de professores com o objetivo de favorecer a vigilância epistemológica a partir da compreensão das hipóteses científicas que sustentam os conceitos e teorias abordados?

Respondeu-se essa questão através da construção de um MER e um MDR centrados na explicitação de elementos das praxeologias a ensinar e numa praxeologia para o ensino. O MER e MDR construídos neste estudo levaram em conta as condições e restrições que precisam ser consideradas em uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura focada na elucidação de conhecimentos necessários para o exercício da vigilância epistemológica na transposição didática dos conceitos e teorias desse campo científico.

As praxeologias a ensinar foram construídas por meio da elaboração de modelos epistemológicos de referência calcados na noção de hipótese científica, conforme a acepção de Lima e Heidemann (2023), com vias a explicitar as hipóteses basilares da construção do

conhecimento, fornecendo subsídios para o exercício da vigilância epistemológica na transposição didática de conhecimentos da Mecânica. Incorporando as condições e restrições identificadas no estudo empírico (Estudo 2), elaboraram-se seis MER especificamente delineados para uma disciplina como a de Mecânica Clássica para a Licenciatura. As praxeologias foram construídas com base nos resultados de um Estudo bibliográfico (Estudo 1), correspondendo aos conhecimentos em torno da Antiperistasis aristotélica, do modelo de Queda dos Graves, da Teoria da Gravitação Universal, das Leis de Newton e das Equações de Euler-Lagrange.

Os modelos construídos foram integrados no contexto amplo da disciplina por meio da adaptação da proposta de Ruiz-Olarría (2015), que defende uma construção coletiva desses modelos com os licenciandos por meio da tentativa de respostas a uma série de questões, iniciadas por uma questão geradora Q_0 : *Qual o papel que tem ou poderia ter o ensino da Mecânica Clássica no Ensino Médio?* A busca por respostas, viabilizada por meio de dispositivos didáticos validados empiricamente, como o diagrama Q-R e as tarefas voltadas ao Ensino Médio, é parte do processo de construção de uma praxeologia para o ensino, que por sua vez é parte da praxeologia para a profissão docente.

Como um todo, o MER construído é uma sucessão de praxeologias de complexidade crescente. No MDR adotado, na forma do esquema herbatiano, parte-se da premissa de que não há uma resposta única à questão Q_0 : a resposta final emerge como resultado do processo de investigação que dura até o final da disciplina. Os licenciandos devem ser constantemente lembrados desse processo investigativo, já que os conhecimentos do MER, por mais que cubram conteúdos que se espalham ao longo de um semestre, não serão evocados todas as aulas. Aí reside a importância do portfólio como guardião do *milieu* em desenvolvimento, preservando as respostas parciais fornecidas pelos licenciandos, até o momento em que elas serão usadas para compor uma resposta final, que irá conter elementos individuais e coletivos.

A seguir, parte-se para as considerações finais deste trabalho.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, buscou-se investigar implicações de um ensino pautado pela explicitação das hipóteses basilares do conhecimento, no contexto de formação de professores de Física, no fomento de conhecimentos para a realização da vigilância epistemológica na transposição didática da Mecânica Clássica.

É fato que a transposição didática constitui um fenômeno institucional em que os professores desempenham um papel mais passivo do que ativo. No entanto, cabe aos docentes avaliar cuidadosamente a adequação dessa transposição em relação ao conhecimento de referência, analisado aqui com base nos fatores epistêmicos e sociais que lhe deram origem. A identificação desses fatores foi conduzida por meio de uma metodologia de análise de episódios históricos, centrada na noção de hipótese, especialmente apropriada para esse fim. As conclusões deste estudo fundamentam-se em bases teóricas e empíricas. Em particular, um estudo empírico com 11 professores em formação permitiu identificar condições e restrições consideradas na abordagem metodológica final. Uma restrição importante neste estudo advém do contexto específico em que o estudo empírico foi realizado: o sistema didático investigado pertence a uma universidade brasileira com cursos de Licenciatura voltados à formação de professores. No contexto da UFRGS, a disciplina de Mecânica Clássica, onde o estudo empírico foi implementado, destina-se exclusivamente à Licenciatura, sem a presença de estudantes do bacharelado, o que é uma característica favorável à implementação da proposta desenvolvida. Além disso, os estudantes têm disciplinas preparatórias, como 'Introdução à Física', que aborda elementos de história da ciência, lhes proporcionando alguma formação didática prévia nesse quesito, algo incomum em outros contextos. A disciplina também contou com o apoio de um pesquisador, além do professor responsável pela reformulação, o que representa uma condição particularmente favorável. Assim, a formação prévia dos estudantes envolvidos representa uma restrição importante.

Os resultados dos estudos indicaram que a compreensão das hipóteses basilares do conhecimento pelos licenciandos é possível na medida em que elas são percebidas como indissociáveis do seu contexto de produção. Faz-se necessário, portanto, evocar a análise de episódios históricos, capazes de elucidar conhecimentos de referência. Entretanto, meramente conhecer história ou saber Física não garante a realização da vigilância epistemológica. Os estudos demonstraram que, quando os licenciandos entendem que os conhecimentos são originados como tentativas de resposta a questões prévias, criam-se as

condições para uma transposição didática reflexiva. Nesse ponto, surge a consciência sobre incompatibilidade entre o saber a ser ensinado e o saber de referência, o que é um pré-requisito para o seu questionamento. Em outras palavras, é um pré-requisito para o exercício da vigilância epistemológica. Assim, pode-se enunciar a tese defendida nesse estudo da seguinte forma:

No contexto de formação de professores, a explicitação das hipóteses basilares do conhecimento como respostas a questões que só fazem sentido em seu contexto histórico de criação proporciona conhecimentos necessários para a vigilância epistemológica.

Os conhecimentos desenvolvidos nas praxeologias construídas pelos licenciandos(as) podem ser alvos da transposição didática para o Ensino Médio e, no caso da praxeologia sobre as Equações de Euler-Lagrange, para o Ensino Superior (com a devida modificação nas perguntas, que devem passar a se referir ao Ensino Superior). Evidentemente, cabe ao(à) professor(a) avaliar a pertinência de introduzir um ou outro elemento da praxeologia, dependendo do contexto, da profundidade com que deseja abordar os tópicos, entre outros fatores. De fato, exercer a vigilância epistemológica envolve não apenas a abertura da consciência didática, mas também seu fechamento, quando necessário.

Pode-se citar algumas implicações e contribuições deste trabalho para a área de pesquisa em Ensino de Física. Possivelmente, a maior contribuição deste trabalho é no desenvolvimento de um referencial teórico-metodológico que pode ser empregado em contextos diferentes da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura. Por exemplo, Sousa (2015) analisa o exercício da vigilância epistemológica por parte de professores atuantes que realizaram um curso de formação continuada sobre Física Moderna através de uma análise praxeológica. O referencial desenvolvido neste trabalho poderia sustentar iniciativas didáticas no referido curso de formação. A Mecânica Clássica é um tópico carente de pesquisas na área de Ensino de Física, particularmente a Mecânica Analítica. Assim, a pesquisa pode respaldar ações no sentido de aprimorar processos didáticos em outros contextos de formação de professores, com as devidas adaptações. Outro ponto que se pode destacar é que, apesar da TAD ter aplicações amplas na área da Matemática, comparativamente ainda são poucas as pesquisas que utilizam esse referencial no estudo das Organizações Físicas (p. ex. Kurnaz; Arslan, 2009). Ao estabelecer condições necessárias para o exercício da vigilância epistemológica nessa área, abrem-se outras linhas de pesquisas possíveis, sejam elas empíricas ou teóricas, no âmbito da TAD, focadas

no estudo de diferentes conceitos ou mesmo de organizações físicas além da mecânica (p. ex., Eletromagnetismo, Mecânica Quântica, etc.). Por exemplo, este trabalho pode dialogar com pesquisas no âmbito do Ensino de Física que analisam a implementação de metodologias didáticas inovadoras à luz da TAD, como a Aprendizagem Baseada em Projetos (Pasqualetto, 2018) e a Robótica Educacional (Schivani, 2014). Por fim, tanto a metodologia de ensino empregada quanto o referencial teórico-metodológico construído foram embasados em um estudo empírico. Uma maneira de expandir a metodologia de ensino para outros contextos é caracterizando-a como uma organização praxeológica (Espinosa, Araujo; Veit; 2019). A formalização dos elementos metodológicos poderia ser útil na difusão do próprio referencial teórico-metodológico a outros contextos.

Evidentemente, cabe destacar que um estudo de natureza qualitativa como este tem algumas limitações inerentes. Pode-se citar, por exemplo, o baixo número de licenciandos que forneceram dados para as conclusões; o contexto específico de aplicação da pesquisa, que é bastante específico do curso de licenciatura da UFRGS; e o viés do pesquisador, que pode ter se refletido na interpretação das evidências. Nesse sentido, faz-se necessário a condução de mais pesquisas como as sugeridas no parágrafo anterior, no sentido de corroborar as conclusões apresentadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, P. *Imagens de natureza, imagens de ciência*. Campinas: Papirus, 1998.
- ACEVEDO D., J. A. Conocimiento didáctico del contenido para la enseñanza de la naturaleza de la ciencia (I): el marco teórico. **Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias**, v. 6, n. 1, p. 21–46, 2009.
- ADÚRIZ-BRAVO, A. A 'Semantic' View of Scientific Models for Science Education. **Science & Education**, v. 22, n. 1, p. 1593–1611, 2013.
- AKERSON, V. L.; ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. Influence of a Reflective Explicit Activity-Based Approach on Elementary Teacher's Conceptions of Nature of Science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 37, n. 4, p. 295–317, 2000.
- ALLCHIN, D. Pseudohistory and pseudoscience. **Science & Education**, v. 13, n. 1, p. 179–195, 2004.
- ALLCHIN, D. Beyond the Consensus View: Whole Science. **Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education**, v. 17, p. 18-26, 2017.
- ARISTÓTELES. Mechanical problems. In: Hett W.S. (Ed.). *Aristotle minor works*. Harvard University Press, 1955, p. 329 – 414.
- ARTIGUE, M. Institutional transitions in university mathematics education. In: CHEVALLARD, Y., et al. (Ed.). *Advances in the Anthropological Theory of the Didactic*. Cham: Springer, 2022. p. 13-24.
- ASSIS, A. K. *Mecânica Relacional*, v. 22. Coleção CLE, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, Campinas – SP, 1998.
- ASSIS, A. K. *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics: The Law of the Lever*. 2a ed. C. Roy Keys Inc., 2008.
- ASTOLFI, J. P.; DEVELAY, M. *A Didática das Ciências*. Papirus Editora, 1990.
- BACON, F. *Novum Organum*. Wirceburgi, Apud J. Stahel, 1779.
- BALDWIN, M. R. Magnetism and the Anti-Copernican Polemic. **Journal for the History of Astronomy**, v. 16, n. 3, p. 155–174, 1985.
- BARNES, H. E.; MYERS, B.; SCOTT, W. B.; HUBLER, E. ;ERNSTEIN, M. *An Intellectual and Cultural History of the Western World*. New York: Random House, 1965.
- BARQUERO, B. *Ecología de la Modelización Matemática en la enseñanza universitaria de las Matemáticas*. 2009. Tese (Doutorado) - Universitat Autònoma de Barcelona, 2009.
- BARQUERO, B.; BOSCH, M. Didactic engineering as a research methodology: from fundamental situations to study and research paths. In: *Task design in mathematics education*. Cham: Springer, 2015. p. 249–272.
- BARQUERO, B.; BOSCH, M.; ROMO, A. Mathematical modelling in teacher education: dealing with institutional constraints. **ZDM Mathematics Education**, v. 50, n. 1–2, p. 31–43, 2018a.

BARQUERO, B.; ROMO-VÁZQUEZ, A. El uso del esquema herbartiano para analizar un REI online para la formación do profesorado de secundaria. *Educação Matemática Pesquisa: Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Educação Matemática*, v. 21, 2019.

BARQUERO, B.; ROMO-VÁZQUEZ, A. In: CHEVALLARD, Y., et al. (Ed.). *Advances in the Anthropological Theory of the Didactic*. Cham: Springer, 2022. p. 13-24.

BATTISTEL, O. L.; HOLZ, S. M.; SAUERWEIN, I. Motivação e eficiência em estratégias de ensino de física no nível médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, e20210278, 2022.

BECKER, T. M. H.; HEIDEMANN, L. A.; LIMA, N. W. History of science in physics education in the last decade: which direction we are heading? *Science & Education*, 2024.

BERKELEY, G. ([1721] 2006), “De motu (Sobre o movimento ou sobre o princípio, a natureza e a causa da comunicação dos movimentos)”, trad. Marcos R. da Silva, *Scientiae Studia*, v. 4, n. 1, p. 115-37, 2006.

BEVZ, V.; DMYTRIENKO, O. Students' perceptions of the history of science and technology course at teacher training university. *Advanced Education*, v. 15, p. 74-80, 2020.

BOCCALETTI, D. From the epicycles of the Greeks to Kepler's ellipses: The Breakdown of the circle paradigm. *arXiv: History and Philosophy of Physics*, 2001.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, p. 291-313, 2002.

BOULOS, P. Newton's Path to Universal Gravitation: The Role of the Pendulum. *Science & Education*, v. 15, n. 6, p. 577-595, 2006.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica vista como um campo conceitual. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 28, n. 3, p. 507-545, dez. 2011.

BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Diretrizes Curriculares Nacionais para a formação inicial em nível superior (cursos de licenciatura, cursos de formação pedagógica para graduados e cursos de segunda licenciatura) e para a formação continuada. Resolução CNE/CP n. 02/2015, de 1º de julho de 2015. Brasília: Diário Oficial da União, Seção 1, n. 124, p. 8-12, 02 jul. 2015.

BRASIL. Resolução CNE/CP nº 2, de 20 de dezembro de 2019. Define as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação Inicial de Professores para a Educação Básica e institui a Base Nacional Comum para a Formação Inicial de Professores da Educação Básica (BNC-Formação). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 15 jan. 2020. Disponível em: https://normativasconselhos.mec.gov.br/normativa/view/CNE_RES_CNECPN22019.pdf. Acesso em: 13 set. 2024.

BRASIL. Resolução CNE/CP nº 4, de 29 de maio de 2024. Dispõe sobre as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação Inicial em Nível Superior de Profissionais do Magistério da Educação Escolar Básica. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cne/cp-n-4-de-29-de-maio-de-2024-563084558>. Acesso em 26/09/2024

BROWN, G. Did Samuel Clarke really disavow action at a distance in his correspondence with Leibniz?: Newton, Clarke, and Bentley on gravitation and action at a distance. *Studies in History and Philosophy of Science*, Part A, v. 60, n. 1, p. 38–47, 2016.

BULL, C. H. The Tradition of Hermes Trismegistus: The Egyptian Priestly Figure as a Teacher of Hellenized Wisdom. *Religions in the Graeco-Roman World*: 186. Leiden: Brill, 2018.

BUNGE, M. La investigación científica: Su estrategia e su filosofía. Barcelona: Editora Ariel, 1989.

CACHAPUZ, A. F.; NETO, A. S.; SILVA, A. C. Formação inicial de professores de Física no Brasil e em Portugal: uma análise comparativa de modelos de formação. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, Brasília, v. 101, n. 257, p. 146-163, 2020.

CAJORI, F. Are the Heavens Full or are they Void? A History of Hypotheses. **The Scientific Monthly**, v. 23, n. 4, p. 346–355, 1926.

CAMPOS, A.; RICARDO, É. C. A complexidade do movimento local na Física aristotélica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 3601, 2012.

CAPECCHI, D. History of Virtual Work Laws: A History of Mechanics Prospective. Springer, 2012.

CAPECCHI, D. The problem of the motion of bodies - A Historical View of the Developments of Classical Mechanics, v. 25. Springer, 2014.

CAPECCHI, D. Epistemology and Natural Philosophy in the 18th Century - The Roots of Modern Physics, v. 39. Springer Nature Switzerland AG, 2021.

CARNOT, L. Essai sur les machines en général. Dijon: Defay, 1786.

CARTER, K. Teachers' knowledge and learning to teach. In: HOUSTON, W. R.; SIKULA, M. H. J. (Eds.). Handbook of research on teacher education. New York: Macmillan, 1990.

CASTELA, C. Les praxéologies comme idiosyncrasies institutionnelles. **Educação Matemática Pesquisa**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 086–102, 2020.

CHAIB, J. P.; AGUIAR, M. C. Força de inércia: aprofundando o debate. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 142-161, 2016.

CHERNISS, H. F. Aristotle's Criticism of Plato and the Academy. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1944.

CHEVALLARD, Y. La Transposición Didáctica: del saber sabio al saber enseñado. La Pensée Sauvage, Argentina. (1991).

CHEVALLARD, Y. Conceitos fundamentais da didáctica: as perspectivas trazidas por uma abordagem antropológica. In: BRUN, J. (Ed.). Didáctica das Matemáticas. 1. ed. Lisboa: Instituto Piaget, 1996. p. 115–152.

CHEVALLARD, Y. Analyse des Pratiques enseignantes et didactique des mathématiques: l'approche anthropologique. 1998.

CHEVALLARD, Y. Steps towards a new epistemology in mathematics education. In Bosch, M. (ed.) Proceedings of the 4th Conference of the European Society for Research in Mathematics Education (CERME 4). (p. 21-30) Barcelona: FUNDEMI-IQS, 2006.

CHEVALLARD, Y. Passé et présent de la Théorie Anthropologique du Didactique. In: ESTEPA, A.; RUIZ, L.; GARCÍA, F. J. (Ed.). Sociedad, escuela y matemáticas. Aportaciones de la Teoría Antropológica de lo Didáctico (TAD). Jaén: Publicações de la Universidade de Jaén, 2007. p. 705–746.

CHEVALLARD, Y. Enseñar matemáticas en la sociedad de mañana: alegato a favor de un contraparadigma emergente. **Journal of Research in Mathematics Education**, v. 2, n. 2, p. 161–182, 2013.

CHEVALLARD, Y. Introducing the Anthropological Theory of the Didactic: an attempt at a principled approach. **Hiroshima Journal of Mathematics Education**, v. 12, p. 71–114, 2019a.

CHEVALLARD, Y. On using the ATD: Some clarifications and comments. **Educação Matemática Pesquisa**, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 1–17, 2019b.

CHEVALLARD, Y. Some sensitive issues in the use and development of the anthropological theory of the didactic. *Educação Matemática Pesquisa*, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 013–053, 2020.

CHEVALLARD, Y. Toward a Scientific Understanding of a Possibly Upcoming Civilizational Revolution. In: CHEVALLARD, Y.; BARQUERO, B.; BOSCH, M.; FLORENSA, I.; GASCÓN, J.; NICOLÁS, P.; RUIZ-MUNZÓN, N. (Org.). *Advances in the Anthropological Theory of the Didactic*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. p. 179–228.

CHEVALLARD, Y.; BOSCH, M. Study and research paths: A model for inquiry. In: SIRAKOV, B.; DE SOUZA, P. N.; VIANA, M. (Org.). *Proceedings of International Congress of Mathematicians—Volume IV*. Singapura: World Scientific Publishing, 2018. p. 4033–4054.

CHEVALLARD, Y.; BOSCH, M. In: BOSCH, M.; CHEVALLARD, Y.; GARCÍA, F. J.; MONAGHAN, J. (Ed.). *Working with the anthropological theory of the didactic in mathematics education: A comprehensive casebook*. Abingdon: Routledge, 2020. p. xviii–xxxvii.

CINDRA, J. L. Um esboço da história do conceito de trabalho virtual e suas aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, p. 12, 2008.

CIRADE, G. Devenir professeur de mathématiques: entre problèmes de la profession et formation à l'IUFM. Les mathématiques comme problème professionnel. 2006. Tese (Doutorado) - Université de Provence, França, 2006.

CLAGETT, M. Nicole Oresme and Medieval Scientific Thought. **American Philosophical Society**, v. 108, n. 4, p. 298–309, 1964.

COHEN, I. B. *The Newtonian revolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

COHEN, I. B. *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*. Madrid: Alianza Editorial, 1983.

COHEN, I. B. *O nascimento de uma nova física*. Lisboa: Gradiva, 1988.

COHEN, B.; WESTFALL, R. S. (org.) *Newton: textos, antecedentes, comentários*. Rio de Janeiro: Contraponto, EDUERJ, 2002.

CORREIA, B. M. Sobre a relação entre filosofia natural e teologia natural no pensamento de Newton. In: PRÍNCIPE, J. (Ed.). *Évora Studies in the Philosophy and History of Science*. Editora X, 2015, p. 369-390.

COSTA, E. M.; DE MATOS, C. C.; DA SILVA, C. V. N. Formação e trabalho docente: Intencionalidades da BNC - Formação Continuada. **Currículo Sem Fronteiras**, v. 21 n. 3, p. 1188–1207, 2021.

CROSS, D.; LEPAREUR, C. PCK at stake in teacher-student interaction in relation to students' difficulties. In: GRANGEAT, M. (Ed.). *Understanding science teachers' professional knowledge growth*. Rotterdam: Sense Publishers, 2015. p. 47-61.

D'ALEMBERT, J. *Traité de Dynamique*. Paris, 1743.

DA-SILVA, C., MELLADO, M., RUIZ, C. y PORLÁN, R. Evolution of the conceptions of a secondary education biology teacher: longitudinal analysis using cognitive maps. **Science Education**, v. 91, n. 3, p. 461-491, 2007.

DA SILVA, A. P. B.; MARTINS, R. A. Maupertuis e o princípio mecânico de ação mínima: Uma análise crítica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 625–633, 2007.

DA SILVA, D. A.; PEDUZZI, L. O. A Relação entre as Hipóteses e o Papel de Deus na Doutrina Newtoniana. In: PEDUZZI, L. O.; MARTINS, A. F.; FERREIRA, J. M. (Eds.). *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*, Edufrn, 2012, p. 309-330.

DA SILVA, H. F. Letramento científico nas aulas de física: um desafio para o ensino médio. *Revista Redin*, v. 6, n. 1, out. 2017.

DE BERG, K. C.; GREIVE, C. Understanding the siphon: An example of the development of pedagogical content knowledge using textbooks and the writings of early scientists. **Australian Science Teacher's Journal**, v. 45, n. 4, p. 19-26, 1999.

DESCARTES, R. *Principia philosophiae*. Amsterdam: Louis Elzevir, 1644.

DESCARTES, R. *El mundo o el tratado de la luz*. Madrid: Alianza Editorial, 1991.

DIJKSTERHUIS, E. J. *Archimedes*. Copenhagen: Munksgaard, 1956.

DOGAN, N. Blending problem based learning and history of science approaches to enhance views about scientific inquiry: New wine in an old bottle. *Journal of Education and Training Studies*, v. 5, n. 10, p. 99-112, 2017.

DOUNAS-FRAZER, D. R.; LEWANDOWSKI, H. J. The Modelling Framework for Experimental Physics: Description, development, and applications. **European Journal of Physics**, v. 39, n. 6, p. 1-15, 2018.

DOURADO, L. F. Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação inicial e Continuada dos Profissionais do Magistério da Educação Básica: concepções e desafios. **Educação e Sociedade**, v. 36, n. 131, p. 299-324, 2015.

DRAKE, S. Experimental confirmation of horizontal inertia: unpublished manuscripts (Galileo Gleanings XX.II). **Isis**, v. 64, n. 3, p. 191-305, 1973.

DRAKE, S. Galileo's physical measurements. **American Journal of Physics**, v. 54, n. 4, p. 302–306, 1986.

DUGAS, R. *A History of Mechanics*. Dover Publications, 1988.

DURAND, D. B. Nicole Oresme and the mediaeval origins of modern science. **Speculum**, v. 16, n. 2, p. 167–185, 1941.

DUTTON, B. D. Physics and metaphysics in Descartes and Galileo. **Journal of the History of Philosophy**, v. 37, n. 1, p. 49-71, 1999.

DUVILLIE, B. *L'Émergence des Mathématiques*. Ellipses, 2000.

EBELING, F. *The Secret History of Hermes Trismegistus: Hermeticism from Ancient to Modern Times*. Translated by Lorton, David. Ithaca: Cornell University Press, 2007.

EPSTEIN, J. L. Voltaire's Myth of Newton. **Pacific Coast Philology**, v. 14, n. 1, p. 27–33, 1979.

ERDURAN, S.; DAGHER, Z. Reconceptualizing the Nature of Science for Science Education: Scientific Knowledge, Practices and Other Family Categories. In: ERDURAN, S.; DAGHER, Z. R. (Eds.). *Contemporary Trends and Issues in Science Education*. Springer Academic, 2014.

ERLICHSON, H. Huygens and Newton on the Problem of Circular Motion. **Centaurus**, v. 37, n. 3, p. 210–229, 1994.

ESPINOSA, T.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Análisis praxeológico de los métodos de enseñanza: un puente entre la investigación y la práctica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 19, p. 373–397, 2019.

EURYDICE. Science teaching in schools in Europe: policies and research. 2011. Disponível em: http://eacea.ec.europa.eu/education/eurydice/thematic_studies_en.php. Acesso em: 02 set. 2024.

ÉVORA, F. R. A Revolução Copernicana-Galileana - Astronomia e cosmologia pré-galileana, vol I. CLE (Centro de lógica, epistemologia e história da ciência), 1988.

FARA, P. Catch a falling apple: Isaac Newton and myths of genius. **Endeavour**, v. 23, n. 4, p. 167–170, 1999.

FIX, A. Esperienza, Teacher of All Thing: Vincenzo Galilei's Music as Artisanal Epistemology. **Nuncius**, v. 34, n. 3, p. 535–574, 2019.

FLORENZA, I.; BOSCH, M.; GASCÓN, J. Lecturer education: a course design. Hamburg: [s.n.], 2016.

FLORENZA, I.; BOSCH, M.; GASCÓN, J. Análisis a posteriori de un REI-FP como herramienta de formación del profesorado. **Educação Matemática Pesquisa: Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Educação Matemática**, v. 21, 2019.

FLORENZA, I.; BOSCH, M.; GASCÓN, J. Reference epistemological model: what form and function in school institutions? **Educação Matemática Pesquisa: Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Educação Matemática**, v. 22, n. 4, p. 240–249, 2020.

FORATO, T. C. M. A filosofia mística e a doutrina Newtoniana: uma discussão historiográfica. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 1, n. 3, p. 29–53, 2008.

FORATO, T. C.; MARTINS, R. A.; PIETROCOLA, M. Enfrentando obstáculos na transposição didática da história da Ciência para a sala de aula. **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**, v. 30, n. 1, p. 123-154, 2012.

FRANKLIN, A. Principle of Inertia in the Middle Ages. **American Journal of Physics**, v. 44, n. 6, p. 529-545, 1976.

FRASER, C. D'Alembert's Principle: The Original Formulation and Application in Jean d'Alembert's *Traité de Dynamique*. **Centaurus**, v. 28, n. 1, p. 31–61, 1985.

GALILEI, G., *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leyde: Elzevir, 1638.

GALILEI, G., *Dialogues concerning two new sciences*, translated by Henry Crew and Alfonso de Salvio. New York: Dover, 1954.

GALILEI, G., *Le opere di Galileo Galilei*, ed. A. Favaro, 20 vols. in 21, Florence 1890-1909, repr., 1968.

GALILEI, G., *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Editado por Libero Sosio. Torino: Einaudi, 1970.

GARCÍA, C. M. Cómo conocen los profesores la materia que enseñan. Algunas contribuciones de la investigación sobre Conocimiento Didáctico del Contenido. En: Montero L.; VEZ, J. M. (Eds.). *Las didácticas específicas en la formación del profesorado* (p. 151-186). Tórculo, 1993.

- GARCÍA, F. J.; LENDÍNEZ, E. M.; LERMA, A. M. On the problem between devices and infrastructures in teacher education within the paradigm of questioning the world. In: ORELLANA, M.; JIMÉNEZ, M.; GARCÍA, F. (Org.). *Advances in the Anthropological Theory of the Didactic*. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 103-112.
- GASCÓN, J. Las tres dimensiones fundamentales de un problema didáctico. El caso del álgebra elemental. **Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa**, Cidade do México, v. 14, n. 2, p. 203-231, 2011.
- GASCÓN, J.; NICOLÁS, P. ATD on relationships between research and teaching: the case of a didactic problem concerning real numbers. In: CHEVALLARD, Y., et al. (Ed.). *Advances in the Anthropological Theory of the Didactic*. Cham: Springer, 2022. p. 13-24.
- GEDDIS, A. N. et al. Transforming content knowledge: Learning to teach about isotopes. **Science Education**, v. 77, n. 6, p. 575-591, 1993.
- GESS-NEWSOME, J.; CARLSON, J. The role of educative curriculum materials and professional development on teacher practice and student learning. Presented at the national annual conference of the National Association of Science Teachers, New Orleans, LA, 2009.
- GIERE, R. N. Testing theoretical hypotheses. In J. Earman (Ed.), *Testing scientific theories* (p. 269–298). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press, 1983.
- GIERE, R. N. *Understanding scientific reasoning* (3rd ed.). Forth Worth, TX: Holt, Rinehart & Winston, 1991.
- GILBERT, W. *De Magnete*, translated by P. F. Mottelay. New York: Dover, 1958.
- GIL-PEREZ, D.; MONTORO, I. F.; ALIS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125–153, 2001.
- GRAVOGLU, K. et al. Science and technology in the Euro- pean periphery: Some historiographical reflections. **History of Science**, v. 46, n. 1, p. 153–175, 2008.
- GROSSMAN, P. L. *The making of a teacher: Teacher knowledge and teacher education*. New York: Teachers College Press, 1990.
- GUÉROULT, M. *Dynamique et Métaphysique Leibniziennes*. Belles Lettres, Paris, 1934.
- GUICCIARDINNI, N. *Reading the Principia - The Debate on Newton's Mathematical Methods for Natural Philosophy from 1687 to 1736* (Vol. 1). Cambridge University Press, 1999.
- GÜLER, M.; ÜNAL, S. Tell me a story, professor! The effect of historical science stories on academic achievement and motivation in a physics class. **Research in Science & Technological Education**, v. 41, n. 2, p. 635-652, 2021.
- HARRES, J. B. Desenvolvimento histórico da dinâmica: referente para a evolução das concepções dos estudantes sobre força e movimento. I Encontro Ibero-Americano Sobre Investigação Em Educação Em Ciências, I, p. 89–101, 2002.
- HEATH, T. L. *A history of Greek mathematics*, v.1 Oxford: The Clarendon Press, 1921.
- HEIDEMANN, L. A. Ressignificação das atividades experimentais no ensino de física por meio do enfoque no processo de modelagem científica. Tese de Doutorado em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

- HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Modelagem Didático-científica: integrando atividades experimentais e o processo de modelagem científica no ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 3–32, 2016.
- HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Dificuldades e avanços no domínio do Campo Conceitual da Modelagem Didático-científica: um estudo de caso em uma disciplina de Física experimental. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 23, n. 2, p. 352–382, 2018.
- HENKE, A.; HÖTTECKE, D. Physics teachers' challenges in using history and philosophy of science in teaching. **Science & Education**, v. 24, n. 4, p. 349-385, 2015.
- HENRY, J. Gravity and De gravitatione: The development of Newton's ideas on action at a distance. **Studies in History and Philosophy of Science**, Part A, v. 42, n. 1, p. 11–27, 2011.
- HERIVEL, J. W. Newton's Discovery of the Law of Centrifugal Force. **Isis**, v. 51, n. 4, p. 546–553, 1960.
- HERIVEL, J. W. The Background to Newton's Principia: A Study of Newton's Dynamical Researches in the Years 1664-84. Oxford University Press, 1965.
- HODSON, D. Nature of science in the science curriculum: Origin, development, implications and shifting emphases. In: MATTHEWS, M. (ed.). International handbook of research in history, philosophy and science teaching. Dordrecht: Springer, 2014, p. 911-970.
- HÖTTECKE, D.; SILVA, C. C. Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: An analysis of obstacles. **Science & Education**, v. 20, n. 3-4, p. 293-316, 2011.
- HUYGENS, C. De Motu Corporum ex Percussione, in Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens, Tome XVI, editado por J.A. Vollgraff. Martinus Nijhoff, 1929.
- ISABELLE, A. D. Teaching science using stories: the storyline approach. **Science Scope**, v. 31, p. 16-25, 2007.
- JESSEN, B. E. Study and research paths, ecology and in-service teachers. In: CHEVALLARD, Y., et al. (Ed.). Advances in the Anthropological Theory of the Didactic. Cham: Springer, 2022. p. 13-24.
- JOSÉ, W. D.; ANGOTTI, J. A. P.; DE BASTOS, F. P. Ensino de Física por meio de questões do PISA associadas a Temas Estruturadores e Conceitos Unificadores. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 333-354, ago. 2016.
- JUSTI, R. S.; GILBERT, J. K. Modelling, teachers' views on the nature of model-ling, and implications for the education of modellers. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 4, p. 369-387, 2002.
- KEPLER, J. New Astronomy, ed. William H. Donahue. Cambridge University Press, 1992.
- KIND, V. Pedagogical content knowledge in science education: potential and perspectives for progress. **Studies in Science Education**, v. 45, n. 2, p. 169-204, 2009.
- KLEICKMANN, T. et al. Content knowledge and pedagogical content knowledge in Taiwanese and German mathematics teachers. **Teaching and Teacher Education**, n. 46, p. 115-126, 2015.
- KOKKOTAS, P.V., RIZAKI, A. A. Does History of Science Contribute to the Construction of Knowledge in the Constructivist Environments of Learning? In P.V. Kokkotas, K.S. Malamitsa, and A.A., 2011.
- KOPONEN, I. T. Models and modelling in physics education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. **Science and Education**, v. 16, n.7, p. 751–773, 2007.

- KOYRÉ, A. Galileo and Plato. *Journal of the History of Ideas*, v. 4, n. 4, 1943.
- KOYRÉ, A. *Newtonian studies*. London: Chapman & Hall, 1965.
- KOYRÉ, A. *Estudios galileanos*. Siglo veintiuno de España, 1980.
- KOYRÉ, A. *Estudos de história do pensamento científico*. Brasília: Universidade de Brasília, 1982
- KRAGH, H. *An introduction to the historiography of science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- KRAUSS, S.; BAUMERT, J.; BLUM, W. Secondary mathematics teacher's pedagogical content knowledge and content knowledge: validation of the COACTIV constructs. **ZDM Mathematics Education**, v. 40, n. 5, p. 873-892, 2008.
- KUHN, T. S. *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*. In *Technology and Culture* (Vol. 20), 1979.
- KUHN, T. S. *A revolução copernicana*. Rio de Janeiro: Edições 70, 1990.
- KURNAZ, M. A.; SAĞLAM A. A. Using the Anthropological Theory of Didactics in Physics: Characterization of the Teaching Conditions of Energy Concept and the Personal Relations of freshmen to this Concept. *Journal of Turkish Science Education*, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 72–88, 2009.
- LAGRANGE, J. L. *Recherches sur la libration de la Lune*, (Prix de l' Academie Royale des Sciences de Paris, tome IX, 1764), 1777.
- LAGRANGE, J. L. *Miscellanea Taurinensia*, Vol. II, 1760-1761 (Oeuvres de Lagrange V. I). M. J. A. Serret, 1867.
- LAGRANGE, J. L. *Oeuvres de Lagrange*, Vol. XIV. Gauthier Villars, 1892.
- LAGRANGE, J. L. *Analytical Mechanics: Translated from the Mécanique analytique*, nouvelle édition of 1811. Springer Netherlands, 1997.
- LANG, H. S. *The Order of Nature in Aristotle's Physics: Place and the Elements*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- LEDERMAN, N. G. *Nature of Science: Past, present, and future*. In: ABELL, S. K.; LEDERMAN, N. G. (Eds.). *Handbook of research on science education*. Routledge, 2006. p. 831-879.
- LIMA, N. W.; HEIDEMANN, L. A. Diferentes níveis de hipóteses científicas: uma proposta para discutir fatores epistêmicos e sociais das Ciências na formação de professores de Física a partir de fontes históricas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, n. 1, p. e20220330, 2023.
- LEONE, M.; RINAUDO, M. Should the history of physics be rated X? A survey of physics teachers' expectations. *Physics Education*, v. 55, 035013, 2020.
- LIVESEY, S. William of Ockham, the Subalternate Sciences, and Aristotle's Theory of metabasis. **The British Journal for the History of Science**, v. 18, n. 2, p. 127-145, 1985.
- LOUCA, L; ZACHARIA, Z. Modeling-based learning in Science education: cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions. **Educational Review, Philadelphia**, v. 64, n. 4, p. 471–492, 2012.

LOUGHRAN, J.; MULLHALL, P.; BERRY, A. In search of pedagogical content knowledge in science: Developing ways of articulating and documenting professional practice. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 41, n. 4, p. 370-391, 2004.

LOUGHRAN, J.; MULLHALL, P.; BERRY, A. Exploring pedagogical content knowledge in science teacher education. **International Journal of Science Education**, v. 30, n. 10, p. 1301-1320, 2008.

LUCAS, C. O. Una posible «razón de ser» del cálculo diferencial elemental en el ámbito de la modelización funcional. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade de Vigo, 2015.

MACH, E. Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt. Leipzig, 1883.

MAGNAGHI, C. P.; ASSIS, A. K. T. O Método de Arquimedes: Análises e Tradução Comentada. C. Roy Keys Inc., 2019.

MAGNUSSON, S.; KRAJCIK, L.; BORKO, H. Nature, sources and development of pedagogical content knowledge. In: GESS-NEWSOME, J.; LEDERMAN, N. G. (Eds.). Examining pedagogical content knowledge. Dordrecht, 1999. p. 95-132.

MAGNAGHI, C. PIETRO; ASSIS, A. K. T. O Método de Arquimedes: Análises e Tradução Comentada. C. Roy Keys Inc., 2019.

MARKS, R. Pedagogical content knowledge: From a mathematical case to a modified conception. **Journal of Teacher Education**, v. 41, n. 3, p. 3-11, 1990.

MARTINS, R. A. Ciência versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R.; DEBUS, A. G. (Eds.). Escrevendo a história da ciência: Tendências, propostas e discussões historiográficas. Livraria da Física, 2004. p. 115-145.

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

MARTINS, R. A. Estado de repouso e estado de movimento: uma revolução conceitual de Descartes. In: PEDUZZI, L. O.; MARTINS, A. F.; FERREIRA, J. M. (Eds.). Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino, Edufrn, 2012, p. 291-308.

MARTINS, R. A. O Desenvolvimento do Formalismo da Mecânica Clássica, de Christiaan Huygens e Isaac Newton até Leonhard Euler. Extrema: Quamcumque Editum, 2021.

MASON, S. F. Historia de las Ciencias desde la Antigüedad hasta el siglo XVII. Alianza Editorial, 2012.

MASSONI, N. T.; BRUCKMANN, M. E.; BRITO, A. A. Reestruturação Curricular do curso de Licenciatura em Física da UFRGS: o processo de repensar a formação docente, **Revista Educar Mais**, v. 4, n. 3, p. 512-541, 2020.

MATOS, C. L. Um capítulo da História do Tomismo: a teoria do conhecimento de Tomás de Aquino e sua fonte imediata. **Revista de História**, v. 17, n. 35, p. 25-46, 1958.

MATTHEN, M; HANKINSON, R. J. Aristotle's Universe: Its Form and Matter. Springer, 1993.

MATTHEWS, M. R. History, philosophy and science education: The present rapproachment. **Science & Education**, v. 1, n. 1, p. 11-47, 1992.

MATTHEWS, M. R. Scheffler revisited on the role of history and philosophy of science in science teacher education. **Studies in Philosophy and Education**, v. 16, p. 159-173, 1997.

MATTHEWS, M. R. Science teaching: The contribution of history and philosophy of science. 2. ed. New York: Routledge, 2015.

MATTHEWS, M. R. Idealisation and Galileo's Pendulum Discoveries: Historical, Philosophical and Pedagogical Considerations. In: MATTHEWS, M.; GAULD, C.; STINNER, A. (Eds.). The Pendulum - Scientific, historical, philosophical and educational perspectives. Springer, 2005. p. 209 – 235.

MATTHEWS, M. R. Pendulum Motion: A Case Study in How History and Philosophy Can Contribute to Science Education. In: MATTHEWS, M. R. (Ed.). International Handbook of Research in History. Philosophy and Science Teaching. Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. p. 19–56.

MAUPERTUIS, P. L. M. Histoire de l'Academie Royale des Sciences et Belles Lettres de Berlin. Haude, 1746.

MAX J. Concepts of Force - A Study in the Foundations of Dynamics. Harper Torchbook, 1962.

McCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; & CLOUGH, M. P. The nature of science in science education: An introduction. **Science & Education**, v. 7, n. 1, p. 511–532, 1998.

McCOMAS, W. F. The History of Science and the Future of Science Education: A Typology of Approaches to History of Science in Science Instruction. In: KOKKOTAS, P. V., MALAMITSA, K. S., RIZAKI, A. A. (Eds.), Adapting Historical Knowledge Production to the Classroom. Rotterdam: Sense Publishers, 2011. p. 37-53.

McCOMAS, W. F. Considering a Consensus View of Nature of Science Content for School Science Purposes. In: McCOMAS, W. F. (Ed.). Nature of science in science instruction. Switzerland: Springer Nature, 2020. p. 23-34.

McGUIRE, J. E.; TAMNY, M. Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

MENN, Stephen. Descartes and some predecessors on the divine conservation of motion. **Synthese**, v. 83, n. 1, p. 215-238, 1990.

MILLER, A. I. Deciphering the cosmic number: the strange friendship of Wolfgang Pauli and Carl Jung. W. W. Norton & Company, 2009.

MINISTRY OF EDUCATION (MOE). National curriculum: Science. 2015. Disponível em: <https://www.ncic.re.kr/>. Acesso em: 02 set. 2024.

MIYAKAWA, T. Analyzing mathematics teachers' collective work in terms of the inquiry. In: CHEVALLARD, Y., et al. (Ed.). Advances in the Anthropological Theory of the Didactic. Cham: Springer, 2022. p. 13-24.

MUMFORD, D. Oresme and the Invention of Graphing math for non-math majors. lecture, Brown University, 2006.

MUNZÓN, N. R. La introducción del álgebra elemental y su desarrollo hacia la modelización funcional. 2010. Tese (Doutorado) - Universitat Autònoma de Barcelona, 2010.

NAYLOR, R. H. Galileo's Theory of Projectile Motion. **Isis**, v. 71, n. 4, p. 550–570, 1980.

NEWTON, I. Mathematical principles of natural philosophy and system of the world. Tradução de Andrew Motte. Berkeley: University of California Press, 1934.

NEWTON, I. The correspondence of Isaac Newton. Ed. H. W. Turnbull. 7 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1959.

NEWTON, I. Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton: a selection from the Portsmouth Collection in the University Library, Cambridge - Chosen, edited and translated by A. Rupert Hall and Marie Boas Hall. Cambridge University Press, 1978.

NEWTON, I. Óptica. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

NEWTON, I. Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livro I - O Sistema do Mundo. Editora da Universidade de São Paulo, 2016.

NGSS LEAD STATES. Next generation science standards: For states, by states. National Academies Press, 2013. Disponível em: <https://www.nextgenscience.org>. Acesso em: 02 set. 2024.

NICOLLE, D. The fourth crusade - The betrayal of Byzantium. Marcus Cowper, 2011.

NILSSON, P. Teaching for understanding – The complex nature of PCK in pre-service education. In: “The development of a professional knowledge base for teaching science”, Symposium presented at the 6th Conference of the European Science Education Research Association (ESERA). Malmö University, Malmö, Sweden (August 21st - August 25), 2007.

NODARI, P. C. A doutrina das ideias em Platão. **Síntese – Revista de Filosofia**, v. 31, n. 101, p. 359-374, 2004.

OH, P. S.; OH, S. J. What teachers of science need to know about models: An overview. **International Journal of Science Education**, v. 33, n. 8, p. 1109-1130, 2011.

OLIVEIRA, L. J.; PIRES, A. P. V. Da precarização do trabalho docente no Brasil e o processo de reestruturação produtiva. **Revista do Direito Público**, v. 9, n.1, p. 73-100, 2014.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. Epistemologia. Evangraf, 2011.

PANZA, M.; MALET, A. The origins of Algebra: From al-Khwarizmi to Descartes. **Historia Mathematica**, v. 33, n. 1, p. 1-6, 2006.

PARK, W.; ERDURAN, S.; SONG, J.; KIM, M. “It’s a lesson with no correct answer”: design issues in preservice teachers’ use of history of science for lesson planning. **International Journal of Science Education**, v. 45, n. 3, p. 181-203, 2023.

PASQUALETTO, T. I.. O ensino de física via aprendizagem baseada em projetos: um estudo à luz da Teoria Antropológica do Didático. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Porto Alegre, 2018.

PATY, M. A gênese da causalidade física. **Scientiae**, v. 2, n. 1, p. 9–32, 2004.

PÉREZ, G. D., CARVALHO, A. M. P. Formação de Professores de Ciências: Tendências e Inovações. Cortez, 2011.

PEDUZZI, L. O. Q. Evolução dos conceitos da Física - Força e movimento: de Thales a Galileu. Departamento de Física, UFSC, 2008.

PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (Org.). Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino. Natal: EDUFRRN, 2012. 372 p.

PEKDAĞ, B.; AZIZOĞLU, N. History-based instruction enriched with various sources of situational interest on the topic of the atom: the effect on students’ achievement and interest. **Research in Science Education**, v. 50, p. 1187-1215, 2020.

PHELPS, G.; SCHILLING, S. Developing measures of content knowledge for teaching reading. **Elementary School Journal**, v. 105, n. 1, p. 31-48, 2004.

PIEPER, J. *Leisure: The Basis of Culture*. Ignatius Press, 2009.

PIETROCOLA, M.; RICARDO, E.; FORATO, T. History, Didactics, and the Transformation of Scientific Content. In: PIETROCOLA, M.; RICARDO, E.; FORATO, T. (Eds.). *Science Education Research in Latin America*. Brill Academic Publishers, 2019. p. 367–393.

PISANO, R. A Development of the Principle of Virtual Laws and its Conceptual Framework in Mechanics as Fundamental Relationship between Physics and Mathematics. **Transversal: International Journal for the Historiography of Science**, v. 2, n. 1, p. 166–203, 2017.

POINCARÉ, H. *La Science et l'Hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902.

PORTO, C. M. A história do problema das colisões na física do século XVII anterior a Newton. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. e20200004, 2020.

PRADO, L. A. Matemática, física e música no Renascimento: uma abordagem histórico-epistemológica para um ensino interdisciplinar. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2010.

RAMATI, A. The hidden truth of creation: Newton's method of fluxions. **The British Journal for the History of Science**, v. 34, n. 4, 2001.

REALE, G. *Metafísica*, v. 1. Ed. Loyola, São Paulo, 2001.

RENN, J.; DAMEROW, P. The hanging chain: a forgotten “discovery” buried in Galileo's notes on motion. In: HOLMES, F. L.; RENN, J. RHEINBERGER, H. J. (Eds.). *Reworking the bench: research notebooks in the history of science*. Max Planck Institute for the History of Science, 2003. p. 1-24.

RENN, J.; DAMEROW, P.; MCLAUGHLIN, P. Aristotle, Archimedes, Euclid, and the origin of mechanics: the perspective of historical epistemology. In: SIRERA, J. L. M. (Ed.). *Symposium Arquimedes*. Max Planck Ins-titute for the History of Science, 2003, p. 43-60.

RICARDO, E. C. A história da ciência no ensino de física e a vigilância epistemológica. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza**, v. 4, n. e1506, p. 1–9, 2020.

ROSA, C. A. *Historia da Ciência (Volume I): Da Antiguidade ao Renascimento Científico*. Fundação Alexandre de Gusmão, 2012.

RUDGE, D. W.; HOWE, E. M. Incorporating history into the science classroom. **The Science Teacher**, v. 71, p. 52-57, 2004.

RUIZ-OLARRÍA, A. *La formación matemático-didáctica del profesorado de secundaria: de las matemáticas por enseñar a las matemáticas para la enseñanza*. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade de Madrid, 2015.

RUTT, A.; MUMBA, F. Developing preservice teachers' understanding of and pedagogical content knowledge for history of science–integrated science instruction. **Science & Education**, v. 28, n. 9-10, p. 1153-1179, 2019.

SCHIVANI, M.. *Contextualização no Ensino de Física à luz da Teoria Antropológica do Didático: o caso da robótica educacional*. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SCHNEIDERS, W. *Das Zeitalter der Aufklärung*. Verlag C. H. Beck, 2001.

SHULMAN, L. S. Those who understand: Knowledge growth in teaching. **Educational Researcher**, v. 15, n. 2, p. 4-14, 1986.

SHULMAN, L. S. Knowledge and teaching: foundations of the new reform. **Harvard Educational Review**, v. 57, n. 1, p.1-27, 1987.

SIERRA, T. A. Lo matemático en el diseño y análisis de organizaciones didácticas: los sistemas de numeración y la medida de magnitudes. 2006. Tese (Doutorado) - Universidad Complutense de Madrid, 2006.

SILVA, T. T. Teorias do currículo: uma introdução crítica. Porto: Porto Editora, 2000.

SILVA, P. O.; KRAJEWSKI, L. L.; LOPES, H. S.; NASCIMENTO, D. Os desafios no ensino e aprendizagem da física no ensino médio. **Revista da Faculdade de Educação e Meio Ambiente - FAEMA**, Ariquemes, v. 9, n. 2, p. 829-834, 2018.

SIMON, S.; REZENDE, E. Breve História da Inércia - I: O Problema do Movimento de Aristóteles a Copérnico. **Revista de Filosofia Moderna e Contemporânea**, v.6, n.1, p. 241-266, 2018.

SOUSA, W. B.A teoria da transposição didática e a teoria antropológica do didático aplicadas em um estudo de caso no ensino de física moderna e contemporânea. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SOUZA, P. V. S.; MÁXIMO-PEREIRA, M.; LOURENÇO, A. B. Hierarchical organization in concept maps as a path to explain the elaboration of knowledge in the history of science. *Science Education International*, v. 35, n. 1, p. 21-29, 2024.

TATON, R. *La Science Antique et Médiévale*. Presses Universitaires France, 1994.

THORNTON, S. T.; MARION, J. B. *Classical dynamics of particles and systems*. 5th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, 2004.

TOULMIN, S. Criticism in the History of Science: Newton on Absolute Space, Time, and Motion. **The philosophical Review**, v. 68, n. 1, p. 1-29, 1959.

TURNBULL, H. W. *The correspondence of Isaac Newton, II*. Cambridge, 1960.

VASCONCELOS, J. “Inércia Circular” como falácia existencial. **Revista Ideação**, v.1, n. 30, p. 247-277, 2014.

VERDUGO-PERONA, J. J.; SOLAZ-PORTOLÉS, J. J.; SANJOSÉ-LÓPEZ, V. El conocimiento didáctico del contenido en ciencias: estado de lá cuestión. **Cadernos de Pesquisa**, v. 47, n. 164, p. 586–611, 2017.

WALLACE, W. A. (1994). Galileo’s Logic of Discovery and Proof - The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatises on Aristotle’s Posterior Analytics. In: Springer Science & Business Media Dordrecht (Ed.), *Review of Metaphysics* (Vol. 137).

WEBER; R. P.; HEIDEMANN, L. A.; MARTINS, J. S. Caos determinístico: uma abordagem com o software Insight Maker focada em discussões sobre determinismo e previsibilidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, e20230028, 2023.

WEBER R.P.; HEIDEMANN, L. A. Do pensamento aristotélico ao formalismo lagrangiano: uma análise de episódios históricos focada na identificação das hipóteses basilares que fundamentam a Mecânica Clássica, *Textos de apoio ao professor de física IF-UFRGS*, v. 34, n.2, ISSN 2448-0606 (online), 2023.

WESTFALL, R. S. *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. Cambridge University Press, 1983.

WESTFALL, R. S. *A vida de Isaac Newton*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

WHITAKER, M. A. B. History and quasi-history in physics education – Part 1. **Physics Education**, v. 14, n. 1, p. 108–112, 1979.

WHITESIDE, D. T. Before the Principia: the maturing of Newton's thoughts on dynamical astronomy, 1664-1684. **Journal of the History of Astronomy**, v. 1, n. 1, p. 5-19, 1970.

WILSON, C. Newton and Some Philosophers on Kepler's "Laws." **Journal of the History of Ideas**, v. 35, n. 2, p. 231-258, 1974.

WINRICH, C.; GARIK, P. Integrating history of science in in-service physics teacher education: impact on teachers' practice. **Science & Education**, v. 30, p. 1099-1130, 2021.

WINSLØW, C.; MATHERON, Y.; MERCIER, A. Study and research courses as an epistemological model for didactics. *Educational Studies in Mathematics*, v. 83, n. 2, p. 267–284, 2013.

WISE, M.N. *The Values of Precision*. Princeton University Press, 1995.

YIN, R. K. *Case Study Research: Design and Methods*. SAGE Publications, 2002.

YIN, R. K. *Qualitative research from start to finish*. The Guilford Press, 2011.

YOUGRAU, W.; MANDELSTAM, S. Variational Principles in Dynamics and Quantum Theory. **Physics Today**, v. 23, n. 7, p. 72–73, 1970.

ZYLBERSZTAJN, A. Concepções espontâneas em física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. **Revista de Ensino de Física**, v. 5, n. 2, p. 3-16, 1983.

Apêndice A - Relato de experiência na disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura

Neste apêndice, relata-se a experiência obtida com a primeira reformulação da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura, realizada a partir da integração dos episódios históricos identificados por meio do estudo bibliográfico, em que se usou como referencial analítico o trabalho de Lima e Heidemann (2023) (Estudo 1) e sua implementação no semestre de 2022/2. O principal objetivo da implementação foi obter experiência didática prática na disciplina, reunir as primeiras percepções sobre o efeito de uma metodologia de ensino focada nas hipóteses fundamentais no aprendizado dos estudantes, e fornecer fundamentos para a realização de um estudo posterior de caráter empírico (Estudo 2). Buscou-se avaliar, principalmente, o impacto da explicitação das hipóteses na construção da Mecânica Clássica na tomada de consciência didática dos estudantes e na promoção da vigilância epistemológica. No que segue, descreve-se o que foi feito (a reformulação da disciplina) e como foi feito (metodologia de ensino e instrumentos de coleta de dados). Em seguida, os resultados da experiência são apresentados.

Para ilustrar a estrutura da disciplina reformulada, é apresentada, primeiramente, a estrutura geral dos tópicos abordados e a forma como ela foi elaborada com base no Estudo 1. Os tópicos são introduzidos a partir de situações-problema que não necessariamente trazem à tona os referidos tempos históricos, porém a forma como se aborda os diferentes problemas evoca muitos elementos do Estudo 1, como ficará evidente a seguir.

As primeiras atividades da disciplina são relacionadas ao estudo da Mecânica Newtoniana. Entretanto, até as leis de Newton serem efetivamente abordadas, percorre-se um longo caminho. Para motivar as discussões iniciais, sugere-se a seguinte situação-problema, introduzida com a primeira questão geradora:

*Laplace, um dos mais importantes físicos da história, disse: “Uma inteligência que, para um instante dado, conhecesse todas as forças das quais está animada a natureza e a situação respectiva dos seres que a compõem, se de outro modo ela fosse suficientemente vasta para submeter esses dados à análise, abraçaria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e aqueles do mais leve átomo: nada seria incerto para ela, e o futuro, tal como o passado, estaria presente a seus olhos”. Tal trecho exprime a essência do que costuma ser chamado de “determinismo laplaciano”. **Pensando em eventos clássicos, podemos dizer que, se soubermos o estado de um sistema e todas as forças que agem sobre ele, podemos determinar o seu futuro? Se podemos determiná-lo, podemos prevê-lo?***

O texto evoca a visão mecanicista da Ciência, comum à época de Laplace. Como visto na Subseção 5.2.4, tal concepção nasceu a partir dos desenvolvimentos do cálculo diferencial, cuja lógica diferencial foi integrada aos sistemas físicos sob a ótica da

causalidade. Esse entendimento é gradualmente construído a partir dos primeiros princípios da Mecânica e das primeiras concepções sobre o movimento. Alguns exemplos de tópicos abordados são: Física aristotélica; concepções de movimento de Hiparco, Filoponos, Buridan e Galileo; concepções de força/energia de Huygens, Leibniz, Wallis e Newton. A resposta para as questões levantadas é que sim, a Mecânica Newtoniana, expressa em termos modernos, foi concebida sob a ótica de que os movimentos dos corpos em um instante qualquer no futuro são determinados e, ao menos aproximadamente, previsíveis. Toma-se o cuidado de mencionar que essa ideia tem problemas, e que eles serão abordados oportunamente na disciplina.

A segunda questão geradora é colocada com o intuito de questionar a validade das leis de Newton na descrição dos fenômenos cotidianos. Ela é a seguinte:

*Certa feita, Leibniz disse: “Nada acontece sem que exista uma causa ou pelo menos uma razão determinante, ou seja, alguma coisa que possa servir para dar a razão a priori de porque aquilo é existente antes que não existente, de porque é assim em vez de todo outro modo”. A noção de causalidade aparece também nos trabalhos de Newton: “[...] para os mesmos efeitos naturais devem, tanto quanto possível, ser atribuídas as mesmas causas”. Para ele, as causas das mudanças de movimento são as forças: “A mudança de movimento é proporcional à força motora impressa, e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é aplicada”. No entanto, vimos que existem mudanças de movimento que, em determinados referenciais, “não possuem causa”. **Como explicar esses eventos? Quais as implicações desses eventos?***

Apesar de ter sido apontado - durante a construção das respostas às perguntas da questão geradora anterior - que as leis de Newton têm validade apenas para referenciais inerciais, esse aspecto não foi aprofundado. Para motivar a discussão, e incentivar os estudantes a pensarem sobre a pergunta “quais as implicações desses eventos?”, mostra-se um vídeo⁵³ onde se evidencia, erroneamente, que o sentido de rotação da água que se precipita em direção ao ralo de uma pia é diferente no norte e no sul geográfico. O vídeo dá a entender que o efeito de rotação da Terra é suficiente para provocar mudança no sentido de rotação da água na pia quando se muda de hemisfério, indicando que as implicações da rotação da Terra têm efeitos significativos. Retoma-se a discussão feita sobre as leis de Newton, porém agora com enfoque nas ideias sobre espaço e tempo absolutos, como apresentado na Subseção 5.2.3. Em particular, exploram-se os argumentos de Leibniz e Berkley sobre a existência do espaço absoluto. As críticas de Mach também são abordadas, já que elas têm um papel importante no desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral, que aborda todos os referenciais como equivalentes. Na disciplina, estuda-se a descrição de movimentos a partir de referenciais não inerciais trazendo todo o aparato matemático

53 Link do vídeo: https://www.youtube.com/watch?v=H2maD0-CjnI&ab_channel=MiltonShimabukuro. Último Acesso: 30/08/2024.

necessário para descrever esse fenômeno do ponto de vista clássico. Ao final dessa discussão, é possível mostrar que o evento mostrado no vídeo é enganoso, pois se verifica que o efeito da rotação da Terra sobre a água na pia é desprezível.

Diferentemente do que costuma ser feito em livros de MC, os conceitos relacionados com referenciais não inerciais são abordados antes da discussão sobre Gravitação Universal, porque se opta por explicitar as forças de marés como um fenômeno não apenas puramente gravitacional, e sim como uma soma de efeitos de forças não inerciais e gravitacionais. A descrição usando um referencial não inercial convenientemente posicionado facilita a discussão desse fenômeno. Assim, a terceira questão geradora é a seguinte:

*Galileo não acreditava que a Lua poderia exercer influência sobre as marés. Em seu livro **Diálogos**, Galileo escreve: “Kepler é o que me causa maior espanto, por ter ele, que é de engenho livre e agudo, e que tinha em mãos os movimentos atribuídos à Terra, dado ouvido e assentimento ao domínio da Lua sobre as águas, a propriedades ocultas e a semelhantes infantilidades” (GALILEO, 1967). Isso vai ao encontro do pensamento cartesiano hegemônico no século 16, segundo o qual não poderiam existir forças de ação à distância. Galileo argumentou em defesa de uma explicação mecânica para o fenômeno das marés. Segundo ele, a superposição dos movimentos de rotação e translação da Terra em torno do Sol seriam a causa desse fenômeno, e isso constituía uma evidência empírica de que a Terra girava em torno de si e do Sol. **Seria possível explicarmos os ciclos de maré negando a existência de forças com ação à distância? Se não, como podemos entender os efeitos de maré?***

As questões feitas buscam chamar a atenção para o fato de que as interações à distância eram, antes de Newton, inconcebíveis, como mostrado na Subseção 5.2.2. Assim, é feita uma discussão sobre as especulações das causas da gravidade, enfatizando a perspectiva cartesiana e as ideias iniciais de Newton sobre a gravidade. A Lei da Gravitação Universal é gradualmente construída como resultado dessas discussões, destacando-se as relações dessa construção com a superação do paradigma platônico, assim como as relações geométricas exploradas por Newton e o importante papel dos dados empíricos de Huygens na sua argumentação. Destaca-se também a importância dessa lei para a unificação dos mundos sub e supralunares, assim como a consciência de Newton de que a sua lei de gravitação não explicava a gravidade, proporcionando apenas uma representação matemática dessa grandeza. Ao final, respondem-se às questões inicialmente formuladas mostrando como a teoria da gravitação newtoniana, juntamente com considerações sobre referenciais não inerciais, pode ser usada para explicar os efeitos das marés.

Na sequência, continua-se explorando as limitações das leis de Newton, agora, porém, sob o aspecto da previsibilidade. Anteriormente, já havia sido mencionado que sistemas mecânicos podem não ser tão previsíveis quanto os resultados fornecidos pela

aplicação das leis de Newton deixa transparecer. A quarta questão geradora traz esse aspecto pela seguinte situação-problema:

*Talvez a hipótese de que os eventos do mundo natural são deterministas e previsíveis seja uma das mais importantes da história da Física. Em função disso, o problema de três corpos, um dos problemas astronômicos mais discutido nos séculos XVI, XVII e XVIII, colocou em cheque essa concepção. Newton já havia descrito matematicamente o problema de N corpos, mas a solução do caso para $N=3$ só veio a ser alcançada muito depois, por Poincaré. Diante da sua solução, Poincaré disse: “Sente-se vertigem diante da complexidade dessa figura que nem me atrevo a plotar. Nada pode dar uma ideia melhor da complexidade do problema dos três corpos”. Ele complementa: “Se conhecêssemos exatamente as leis da natureza e a situação do Universo no momento inicial, poderíamos prever com precisão a situação do Universo em um momento posterior. Mas mesmo que as leis naturais não tenham mais segredos para nós, não podemos conhecer a situação inicial mais do que aproximadamente. Se isso nos permite prever a situação posterior com a mesma aproximação, que é tudo o que precisamos, dizemos que o fenômeno foi previsto, que é regido por leis. Mas nem sempre é assim: pode acontecer que pequenas diferenças nas condições iniciais produzam algumas muito grandes nos fenômenos finais. Um pequeno erro no início gerará um grande erro no final. A previsão torna-se impossível”. Tal resultado é marcante na origem do que hoje chamamos de Teoria do Caos ou, mais precisamente, Dinâmica Não Linear. **Podemos dizer que tal teoria se contrapõe ao determinismo? Ela mostra que o universo é aleatório, comprometendo um dos pilares da Ciência?***

Apesar de o Estudo 1 ter sido conduzido sem a inclusão de conhecimentos relacionados à dinâmica não linear, optou-se por introduzir elementos básicos desse conteúdo na disciplina porque ele mostra que a Mecânica não é uma obra pronta e estática no tempo, sendo até hoje alvo de muitas pesquisas. De fato, muitos fenômenos clássicos são investigados sob a ótica da dinâmica não linear, evidenciando a contemporaneidade e relevância do estudo da Mecânica. As discussões são motivadas pelos resultados de Poincaré e os estudantes são incentivados a fazer uso intensivo de recursos computacionais. Problematisa-se o determinismo e a previsibilidade na Física ao mesmo tempo em que se desenvolve instrumentos para avaliar a possibilidade de ocorrência de Caos, como testes de sensibilidade e o Expoente de Lyapunov. Respondendo à pergunta inicialmente formulada, busca-se destacar que a Teoria do Caos é uma teoria que desafia a previsibilidade, sem, contudo, negar o determinismo. Discute-se, por exemplo, as limitações intrínsecas relativas ao conhecimento das condições iniciais, bem como aspectos sobre modelagem: os sistemas físicos são representados por meio de modelos, que são, invariavelmente, simplificações da realidade. Nesse sentido, se o próprio objeto de conhecimento não é cópia especular do objeto real, qual ganho se obtém aumentando indefinidamente a precisão nas condições iniciais? Além disso, o Caos pode surgir apenas para um intervalo de valores possíveis de alguns parâmetros do sistema, de forma que seria um alarmismo responder afirmativamente a questão inicial, que indagava: “o universo é aleatório, comprometendo um dos pilares da Ciência?”. Esse e vários outros aspectos

interessantes são discutidos em maiores detalhes em Weber, Heidemann e Martins (2023), um artigo fruto da implementação didática aqui descrita.

A última questão geradora volta a atenção dos estudantes para problemas que, apenas com muita dificuldade, se deixam abordar com o ferramental típico da Mecânica vetorial. Pode ser surpreendente, mas há uma quantidade de sistemas simples que não são tratáveis por métodos tradicionais, exigindo uma abordagem diferente: a Mecânica Analítica. Para introduzir esse assunto, lança-se a quinta questão geradora:

*Vimos que causalidade, determinismo e previsibilidade são conceitos distintos, e que eles são relevantes para análises filosóficas do desenvolvimento da Física. Vimos isso estudando especialmente movimentos oscilatórios amortecidos forçados. No entanto, um dos aparatos mais explorados para se debater movimentos caóticos é o pêndulo duplo. Tal aparato foi alvo de cientistas como Daniel e Johann Bernoulli e d'Alembert ao menos desde o século XVIII. Não é difícil entender o motivo pelo qual tais cientistas não chegaram a identificar comportamento caótico nesses pêndulos. Eles não dispunham das facilidades do uso da computação na Física. Além disso, tratar tal problema a partir da Mecânica newtoniana é um grande desafio. **Como podemos investigar o comportamento caótico de um pêndulo duplo? Será que só podemos investigar sua evolução temporal empiricamente? Podemos construir equações de movimento para esse sistema?***

O comportamento caótico do pêndulo duplo é evidenciado pelos estudantes por meio de um vídeo⁵⁴. A ideia é estimular os estudantes a pensarem por alguns momentos em como tratar o problema usando as boas e confiáveis leis de Newton. Muito rapidamente, espera-se que a turma como um todo chegue à conclusão de que o trabalho envolvido é árduo demais para ser realizado, ao menos naquele momento. Com isso, explica-se aos estudantes que existem formas mais simples de tratar o problema. Inicia-se assim a construção das equações de Euler-Lagrange. A longa trajetória de construção desse conhecimento é apresentada de forma bem parecida com o que se fez na Subseção 5.2.4. Busca-se enfatizar como o conceito de trabalho virtual, juntamente com o “princípio de D'Alembert” foi usado na teorização de Lagrange, que essencialmente junta os princípios da estática e da dinâmica. Ao final, quando os estudantes já se apropriaram da Mecânica Analítica, volta-se ao problema do pêndulo e se obtêm suas equações analiticamente. O ponto aqui é mostrar que, apesar da abordagem da Mecânica Analítica suscitar muitos cálculos, ela fornece um método padrão para a resolução de problemas da Física Clássica, um dos trunfos da

⁵⁴ Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=OPhDeNhhv5bs&ab_channel=ManualdoMundo. Último Acesso: 30/08/2024.

Mecânica. Destaca-se também que o conjunto de equações diferenciais obtidas é não linear, favorecendo a ocorrência de caos no sistema, dependendo dos parâmetros usados.

Foi por meio da clareza sobre os conteúdos e sobre os fatores importantes em sua construção que as questões geradoras foram pensadas e estruturadas em sua ordem. A primeira delas traz o elemento básico da Mecânica: as leis de Newton, a partir das quais se entende que as forças são as causas do movimento. Porém, ao mesmo tempo em que se constrói essas leis, já se destaca que esse conhecimento tem limitações. A primeira delas é trazida quando se aborda a segunda questão, que trata de eventos sem causa aparente. De posse de conhecimentos mais sofisticados sobre a descrição de fenômenos a partir de referenciais não inerciais, entra-se na terceira questão geradora, em que se discute o fenômeno das marés empregando a teoria da gravitação universal a partir de um referencial não inercial. Na sequência, expõe-se outra limitação da Mecânica, que é a impossibilidade de prever o comportamento de alguns sistemas simples, como um pêndulo amortecido e forçado. O golpe final na Mecânica newtoniana é dado pela última questão geradora, em que se expõe que alguns sistemas sequer são tratáveis. Faz-se necessário a construção de uma nova Mecânica, isto é, a Mecânica Analítica.

Conforme descrito até aqui, em nível geral, a metodologia de ensino adotada na disciplina se destacou pela busca de respostas para uma sequência de questões formuladas como situações-problema. Esse processo envolveu os estudantes em diversas atividades, incluindo tarefas de leitura, construção de simulações computacionais, debates sobre episódios históricos e aspectos filosóficos, além de exposições sobre a formalização contemporânea dos conceitos e leis da Física. Para elucidar a metodologia de ensino empregada em nível mais específico, explica-se o funcionamento da versão reformulada da disciplina apresentando alguns exemplos. A Tabela A.1 é uma síntese dos tópicos estudados na disciplina. Esses tópicos foram abordados à medida que os conhecimentos eram demandados para responder às perguntas suscitadas nas questões geradoras anteriormente elucidadas.

Assim, as questões geradoras dividiram de forma aproximada a disciplina em cinco áreas, como mostrado na primeira coluna da Tabela A.1. A segunda coluna explicita os conteúdos formais associados às respectivas áreas. Na terceira coluna, indica-se o número de semanas aproximado em que cada área foi trabalhada. No total, foram 17 semanas de aulas. Os conteúdos que demandaram mais tempo foram os relacionados à Dinâmica de uma Partícula e à Mecânica Analítica. Os conhecimentos sobre Referenciais Não Inerciais e Dinâmica Não Linear foram os conteúdos abordados de forma mais breve, demandando aproximadamente duas semanas. Na última coluna, são mostrados os conhecimentos que

fizeram parte da construção das respostas às perguntas suscitadas em cada questão geradora. Nem todos os conhecimentos introduzidos aos estudantes dizem respeito ao Estudo 1. Alguns deles são trazidos à tona por meio da leitura de artigos que fizeram parte das tarefas prévias concebidas para os estudantes. É o caso, por exemplo, dos conhecimentos sobre a conservação da energia como formulados pelos “pioneiros” da conservação da energia, do princípio de Mach, e das discussões sobre a ontologia da energia potencial.

Tabela A.1: Resumo dos tópicos abordados na disciplina.

Área	Conteúdo Formal	Semanas	Conhecimentos essenciais
Dinâmica de uma partícula	Conservação de momentum e de energia; leis de Newton.	5	Paradigma platônico; Física aristotélica; teoria das razões e proporções; concepções primordiais sobre o lançamento de projéteis; teoria galileana sobre a queda dos graves; primeiros estudos sobre colisões (Wallis e Huygens); hipóteses sobre a conservação da força (Leibniz); discussões dos “pioneiros” da conservação da energia; síntese newtoniana sobre a dinâmica.
Referenciais Não Inerciais	Forças fictícias (centrífuga, de Coriolis e de Euler).	2	Primeiras discussões sobre movimentos sem causa aparente; experimento do balde de Newton; concepções de Berkley e Leibniz sobre a natureza do espaço; princípio de Mach.
Gravitação e Sistemas de Partículas	Lei da gravitação universal; potencial gravitacional; força de marés.	3	Modelos cosmológicos primordiais; explicação mecânica da gravidade (teoria dos vórtex de Descartes e hipótese newtoniana sobre o vento de éter); força centrífuga e experimentos de Huygens sobre o pêndulo; a história da maçã de Newton;
Dinâmica Não Linear	Teoria do caos; testes de sensibilidade; expoente de Lyapunov.	2	Determinismo laplaciano; causalidade diferencial de D’Alembert; problema de três corpos; resultados de Poincaré.
Mecânica Analítica	Equações de Euler-Lagrange; coordenadas cíclicas e não-cíclicas; leis de simetria.	5	Retomada histórica do princípio da Estática (princípio do trabalho virtual); princípio de D’Alembert; princípios de minimização de Maupertuis e Hamilton; discussões sobre a ontologia da energia potencial; síntese lagrangiana da mecânica.

A disciplina tinha quatro créditos semanais (60 horas), com dois encontros presenciais, das 10h30min às 12h10min. Além da carga horária normal, esperava-se que os estudantes fizessem algumas atividades extraclasse, como será explicado. Atuavam simultaneamente um professor do Departamento de Física, responsável pela disciplina, e o pesquisador, doutorando, autor deste texto. Cabia exclusivamente ao professor ensinar, corrigir e avaliar os estudantes da disciplina. O pesquisador corrigia apenas as tarefas prévias. O pesquisador buscava interferir minimamente com as atividades em curso, manifestando-se principalmente quando solicitado. Quando perguntava algo aos estudantes, o pesquisador assim o fazia antes ou após as aulas. A disciplina não contava com monitores, mas devido ao baixo número de estudantes matriculados (oito), o pesquisador conseguia auxiliar aqueles que porventura precisassem. Isso ocorreu poucas vezes ao longo do semestre, sempre de forma *online*. A seguir, elucida-se o ensino de conhecimentos relacionados às leis de Newton.

Conforme já mencionado, a apresentação de conteúdos na disciplina era sempre precedida por uma questão geradora, que se apresentava na forma de uma situação-problema que justificava os conteúdos mobilizados. Nesse caso, as questões foram: “Pensando em eventos clássicos, podemos dizer que, se soubermos o estado de um sistema e todas as forças que agem sobre ele, podemos determinar o seu futuro?” e “Se podemos determiná-lo, podemos prevê-lo?”. Para responder às perguntas, fez-se um apanhado histórico desde os gregos até Newton. Argumentou-se que a construção dessa resposta passa por perguntas mais específicas, como: Qual é a essência do conceito de força? Qual é a origem do conceito de força? O que Newton chamava de força? Quais são as “leis de conservação de força” (vis) hegemônicas dos séculos XV e XVI? Qual a diferença entre força conservativa e não conservativa? Qual é o papel do conceito de “referencial absoluto” na Mecânica newtoniana? Quais as limitações da Mecânica newtoniana?

A conclusão foi que as leis de Newton são perfeitamente determinísticas, confirmando a visão de Laplace. Entretanto, semanas se passaram até se chegar a essa conclusão. O conhecimento era trabalhado gradualmente, por meio de aulas expositivas, construção de simulações computacionais, resolução de tarefas prévias e listas de exercícios pelos estudantes, bem como por meio de trabalhos avaliativos. As aulas expositivas faziam uso de recursos audiovisuais preparados pelo pesquisador. Os slides foram preparados tendo em vista os conhecimentos adquiridos no Estudo 1 e eram disponibilizados aos estudantes no ambiente virtual da disciplina (plataforma Moodle).

O primeiro conteúdo apresentado na jornada de construção e entendimento das implicações das leis de Newton foi a noção de razão e proporção, já que essa foi a linguagem predominante usada pelos cientistas até o século XVII, inclusive por Newton. Os estudantes, para compreenderem essa noção, fizeram, aos moldes do sugerido na metodologia Ensino sob Medida (NOVAK et al., 1999), uma tarefa prévia, que consistia na leitura de um texto (neste exemplo, era uma seção de um livro, mas consistia na leitura de artigos em outras atividades), a partir do qual se podia proporcionar subsídios teóricos relevantes para a aprendizagem dos conteúdos abordados. Nesse caso, a tarefa foi a leitura de algumas páginas do texto “*O formalismo da Mecânica Clássica, de Aristóteles a Galileu*”, de Roberto de Andrade Martins (2021). O prazo para realizar a tarefa era de uma semana e se solicitava aos estudantes que respondessem a um questionário eletrônico com poucas questões sobre o texto. As questões deste questionário em particular eram: a) *O que diferenciou Aristóteles dos pensadores anteriores e contemporâneos no que diz respeito a forma de descrever sua Filosofia Natural?*; b) *Explique porque uma equação como “ $F=ma$ ” não faz sentido para um erudito do século XV*; c) *Quais elementos físicos e metafísicos são usados por Aristóteles para justificar sua lei da alavanca*; e d) *Relate suas dificuldades de compreensão do texto e os aspectos que mais lhe chamaram a atenção*. Em todas as tarefas prévias, a última questão era reservada para dúvidas sobre o material estudado. Ao todo, os participantes realizaram dez tarefas prévias, que se distribuíram ao longo do semestre espaçadas por no máximo duas semanas entre si. É possível ver todas as tarefas prévias e as perguntas feitas no Apêndice B.

Feita a leitura e respondidas às questões, os estudantes deveriam enviar (também de forma eletrônica) suas respostas ao professor até um dia antes da aula em que o conteúdo em questão seria apresentado. Assim, havia tempo para identificar as concepções prévias dos estudantes sobre os assuntos, bem como aferir seu entendimento sobre a leitura. Tendo tomado conhecimento das respostas dos estudantes, o professor e o pesquisador buscavam selecionar, dentre as respostas, aquelas que se destacavam por sua acurácia e aquelas equivocadas ou imprecisas. Essas respostas selecionadas eram colocadas nos *slides* de forma anônima e eram discutidas em aula com os estudantes. Com isso, a atividade podia ser preparada de forma mais personalizada e efetiva no esclarecimento de um maior número de dúvidas. Além disso, os estudantes que respondiam adequadamente se sentiam estimulados por ver suas respostas sendo apresentadas como exemplo, enquanto os estudantes que tinham respostas equivocadas também poderiam se sentir valorizados por verem suas respostas nos *slides*, evidenciando preocupação do docente com sua aprendizagem.

Em todas as aulas em que se discutia os conhecimentos abordados nas tarefas prévias, havia um *slide* com imagens de cientistas e pensadores que eram mencionados nos textos. As imagens eram acompanhadas de pequenas descrições das ideias e contribuições dos mesmos, porém sem seus nomes (ver Figura A.1). Os estudantes eram estimulados a identificar quem eram os cientistas e pensadores com base nessas descrições. Essa atividade, apreciada pelos estudantes, tinha o intuito apenas de destacar algumas ideias-chave sobre o texto e não tomava mais do que cinco minutos.

Quem são os pensadores que aparecem na tarefa de leitura?

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Desenvolveu a teoria geral das razões e proporções e criou o primeiro modelo matemático da cosmologia.



Em sua obra "Mechanica", aplicou a teoria das razões e proporções à Física, estendendo esse conhecimento teórico e abstrato ao mundo natural.



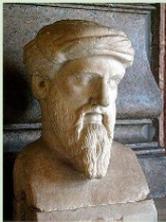
Provavelmente foi quem criou a teoria das razões e proporções ao estudar a música, porém só usava com números inteiros (numerologia).



Fundou um programa de pesquisa instrumentalista segundo o qual a cunhagem de hipóteses deve ser feita com o intuito sempre de "salvar as aparências" dos fenômenos.



Organizou e formalizou a obra de Eudoxo em seu famoso livro "Os Elementos".



Disciplina FIS01070 (Mecânica Clássica para a Licenciatura)

Figura A.1: *Slide* contendo uma atividade rápida realizada em sala de aula para cada tarefa prévia: adivinhar quem era o cientista ou pensador com base em suas contribuições para a Ciência. O(a) leitor(a) que deseja se colocar na posição do(a) estudante está convidado(a) a participar da atividade.

O professor buscava trazer fatos e problemas junto com questionamentos e reflexões pertinentes, sempre envolvendo elementos do conhecimento em conexão com seu contexto de formação. Por vezes o assunto de uma tarefa prévia era discutido ao longo de até três encontros, momento em que era proposta uma nova tarefa, de forma antecipada, visando abordar outro conteúdo. Assim, referente à tarefa prévia mencionada, discutiu-se, principalmente, razões e proporções, a cosmovisão platônica e aristotélica, os primeiros modelos cosmológicos, e a Física aristotélica.

A parte sobre razões e proporções foi discutida buscando mostrar como a formalização matemática na Grécia antiga é essencialmente a mesma usada por Galileu e outros cientistas quase dois mil anos depois. Destacou-se que a compreensão desse aspecto é fundamental para apreender a forma como se pensava a Física desde os seus primórdios. A cosmovisão platônica é retratada no texto como uma visão instrumentalista da Ciência, onde se buscava a todo custo "salvar as aparências" por meio da adequação da realidade às teorias que têm em seu âmago a figura geométrica do círculo. Esses aspectos

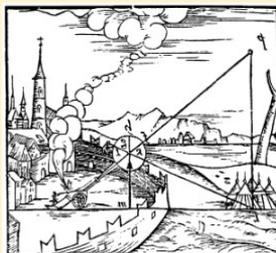
foram discutidos em sala de aula, destacando suas futuras implicações na construção da ciência renascentista e nos modelos cosmológicos, como no ptolomaico e copernicano. A cosmovisão aristotélica e os primeiros modelos cosmológicos foram apresentados chamando a atenção para o fato de que eles já incorporam elementos da filosofia platônica, como a proposição de órbitas circulares com movimentos uniformes. A Física aristotélica foi discutida trazendo à tona sua cosmovisão, que buscava explicar os fenômenos do cotidiano fazendo uso da teoria das razões e proporções para representar e dar sentido às suas hipóteses metafísicas sobre a natureza da matéria, suas propriedades e sobre as leis da natureza. Como exemplo da Física aristotélica, foi explicado como Aristóteles compreendia o funcionamento de uma alavanca com base nas propriedades do círculo, a figura perfeita na cosmovisão platônica. Outros aspectos discutidos foram suas hipóteses sobre o movimento de projéteis, que envolvia um mecanismo conhecido como Antiperistasis.

Apesar de ter uma abordagem histórica e conceitual, a disciplina também teve uma significativa exigência matemática. Após as discussões históricas e filosóficas realizadas, eram mobilizados conhecimentos modernos, que fundamentavam a formalização matemática necessária para os desafios propostos em aula e para a resolução dos exercícios de listas. Muitas aulas continham desafios (ver Figura A.2), alguns simples e diretos, outros mais exigentes.

Quando os estudantes resolviam problemas em aula, o professor estimulava o trabalho em equipe, solicitando que aqueles que haviam terminado primeiro auxiliassem os outros colegas ou expusessem suas soluções no quadro, abrindo a discussão. Nem sempre os desafios propostos tinham fundo histórico. Alguns deles visavam simplesmente a elucidação de resultados e implicações dos conhecimentos trabalhados em aula. Por exemplo, um desafio envolvia provar que um determinado campo vetorial abstrato é conservativo. Nesse caso, o objetivo era demonstrar uma aplicação da ferramenta matemática rotacional, que quando aplicada em um campo vetorial produzir resultado nulo, implica a característica que se queria provar no desafio.

Desafio!

Como determinar a velocidade de um corpo sujeito à ação de um “movimento violento”?



Trajetória de um projétil, segundo Aristóteles. Fonte: Smith (1973, p. 17)

Adotando a física aristotélica, determine a distância percorrida por um corpo sujeito à seguinte força violenta:

$$F(x) = F_0 e^{-x}$$

Essa função pode descrever o movimento de um projétil no mundo aristotélico? Em caso negativo, explique e proponha uma função.

Disciplina FISO1070 (Mecânica Clássica para a Licenciatura)

Figura A.2: Desafio proposto aos estudantes da disciplina nas primeiras semanas de aula. Para resolver o desafio, é preciso empregar cálculo para encontrar a trajetória do movimento e argumentar se o movimento é possível no mundo aristotélico.

Assim como nos desafios, as listas de exercícios continham exercícios tradicionais tipicamente encontrados em livros didáticos e problemas relacionados com fatos históricos. Por exemplo, na primeira lista, havia problemas em que era proposto um potencial e o estudante precisava inferir a trajetória de uma partícula, pontos de reversão, energias cinética e potencial, etc. Na segunda lista, havia uma questão que modelava o vórtex de Descartes, que explicava a gravidade de forma Mecânica. Nessa questão, o estudante precisava calcular a aceleração da gravidade, estimar a densidade do suposto éter de Descartes para gerar uma aceleração gravitacional semelhante à da Terra, e explicar se o campo é conservativo. Foram disponibilizadas cinco listas de exercícios. Os tópicos delas eram, respectivamente: Leis de Newton e álgebra vetorial; forças fictícias e referenciais não inerciais; Gravitação Universal; Dinâmica Não Linear; e Mecânica Analítica. Cada lista continha um máximo de dez exercícios, todos resolvidos previamente pelo pesquisador, que disponibilizou a solução aos estudantes.

Uma preocupação constante era com as implicações didáticas dos conhecimentos em discussão. Por isso, frequentemente o professor fazia perguntas do tipo: “*Como posso explorar isso em sala de aula?*”, “*Por que é importante destacar esse aspecto quando explico o conteúdo?*”, “*Até que ponto é razoável eu trazer à tona esses fatores na minha aula?*”, “*De que forma posso discutir essa característica da Ciência sem comprometer a credibilidade dela?*”, “*Como posso combater o negacionismo sem recorrer ao simples*

argumento de autoridade?”, “Qual é a importância do aluno estudar esse conteúdo?” etc. Nessas situações, que duravam cerca de dez minutos, os estudantes eram envolvidos em discussões e expunham suas ideias sobre como empregar os conhecimentos aprendidos em sala de aula. Buscava-se com isso explicitar os conhecimentos da MC como ferramentas para a compreensão do mundo em que o aluno vive, proporcionando uma visão crítica da Física e fomentando um papel mais ativo, por parte dos alunos, nas discussões sobre o papel da Ciência na tecnologia e na sociedade.

A Mecânica produz resultados quantitativos na forma de equações diferenciais que são, muitas vezes, difíceis ou impossíveis de resolver analiticamente. Esse é um dos motivos pelos quais, desde a primeira situação em que surgiu uma equação deste tipo, os estudantes foram estimulados a representar os problemas usando simulações computacionais. Dessa forma, proporcionava-se também o uso de um recurso visual para evidenciar as relações entre as grandezas investigadas, explorando-se assim uma das potencialidades do uso de simulações computacionais no ensino de Física. Quando se abordou, por exemplo, o movimento de projéteis sob efeito da resistência do ar, já no primeiro mês de aulas, as equações de movimento, não lineares e acopladas, foram implementadas em um *software* chamado *Insight Maker*⁵⁵. Por meio dele, foi possível resolver as equações diferenciais *online* com poucos conhecimentos sobre programação.

O *Insight Maker* é um *software* gratuito e de código aberto utilizado para construir e compartilhar modelos que descrevem sistemas dinâmicos. Os modelos são construídos graficamente, com as relações causais entre variáveis e parâmetros representadas por um sistema de diagramação em blocos que divide os elementos do sistema dinâmico em variáveis, taxas de variação e constantes. A Figura A.3 é um exemplo de um diagrama em bloco feito no *Insight Maker* para simular o movimento de projéteis com resistência do ar. Um artigo sobre o uso do *software* para o ensino de Dinâmica Não Linear, relatando as estratégias utilizadas nessa primeira aplicação na disciplina, foi publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física (WEBER; HEIDEMANN; MARTINS, 2023).

O método de integração numérica pode ser escolhido entre o método de Euler (caracterizado como rápido e impreciso) e o método de Runge-Kutta de quarta ordem (mais lento, porém mais preciso), com passo ajustável pelo usuário. Não são necessários conhecimentos específicos sobre os métodos de integração. O resultado da simulação é mostrado em um gráfico.

⁵⁵ Disponível em: <https://insightmaker.com/>. Último Acesso: 30/08/2024.

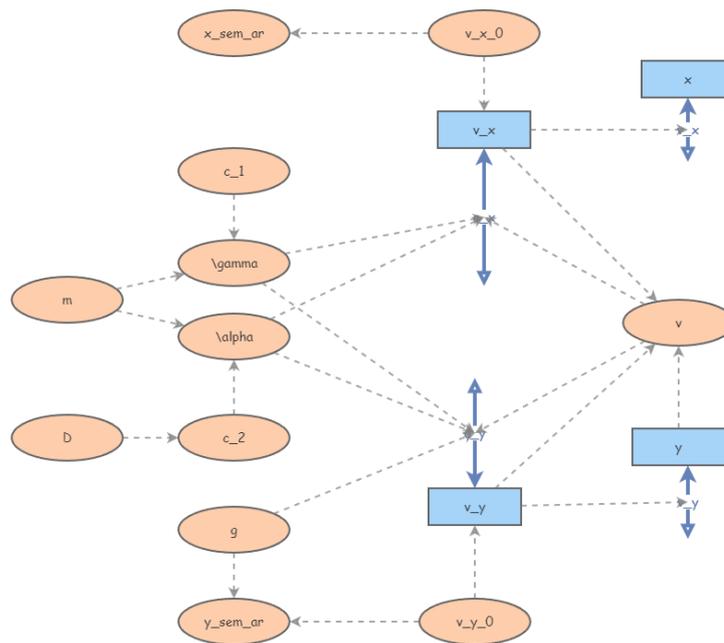
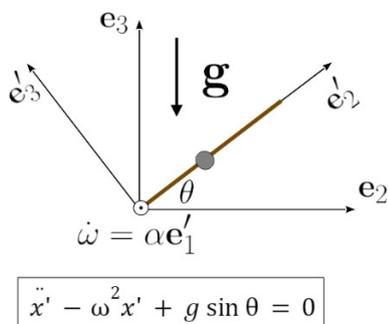


Figura A.3: Diagrama representando o modelo que descreve o movimento de um projétil lançado na superfície da Terra sujeito à força de resistência do ar. Na figura, as caixas azuis são variáveis enquanto as elipses laranjas são parâmetros do sistema. As setas azuis representam as taxas de variações (derivadas) e as setas pontilhadas cinzas as relações causais entre as variáveis e parâmetros.

Uma aula da disciplina foi utilizada para familiarizar os estudantes com o *Insight Maker*. Essa aula aconteceu no dia em que se solicitou a realização do primeiro trabalho. Ao todo, os estudantes fizeram três trabalhos: o primeiro sobre lançamento de projéteis com resistência do ar, o segundo sobre referenciais não inerciais e terceiro sobre dinâmica não linear. Em todos os trabalhos, os estudantes deveriam investigar um fenômeno construindo e explorando uma simulação computacional e, após a investigação, deveriam confeccionar um relatório explicando o procedimento usado, bem como aspectos importantes sobre o conteúdo da Física empregado na investigação. No primeiro trabalho, todos deveriam investigar o fenômeno do lançamento de projéteis com resistência do ar. Com isso, esperava-se que os estudantes pudessem se ajudar em caso de dificuldades com o *software*. Já nos dois últimos relatórios, o tema alvo a ser tratado era escolhido entre os sugeridos pelo professor, dando a possibilidade de que estudassem outro evento diferente dos expostos, desde que relacionado ao conteúdo abordado na disciplina. Por exemplo, no segundo trabalho, o professor ofereceu como sugestão abordar o pêndulo de Foucault ou o funcionamento de uma catapulta idealizada (ver Figura A.4). Em todos os trabalhos, os

estudantes seguiram as sugestões dadas pelo professor, não usando a autonomia que lhes foi concedida.

Catapulta: Resolva a equação da catapulta considerando a aceleração angular constante. Qual a velocidade de ejeção do projétil?



Pêndulo de Foucault: Determine a trajetória do pêndulo de Foucault para a latitude de Porto Alegre.

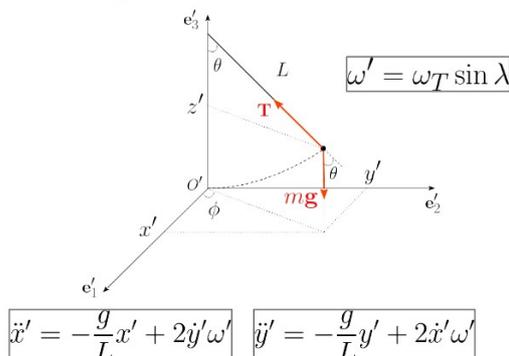


Figura A.4: Problemas sugeridos para o segundo trabalho. No problema da esquerda, uma conta está acoplada a uma haste sobre a qual desliza sem atrito. A haste gira com aceleração angular constante, projetando a conta radialmente. O problema é resolvido no referencial do observador não inercial que gira junto com a haste. No problema da direita, tem-se como desafio encontrar a projeção, no plano horizontal, do movimento pendular, constatando assim a rotação da Terra.

Além das atividades já mencionadas, os estudantes fizeram duas provas, a primeira aproximadamente dois meses depois do início da disciplina e a segunda ao final. A avaliação na disciplina consistiu na média ponderada das notas referentes às tarefas prévias (20%), relatórios (20%) e provas (60%).

Uma vez que a implementação da disciplina reformulada se constituiu em um relato de experiência, não foram coletados dados para obter respostas a questões de pesquisa específicas, de forma que um referencial metodológico de pesquisa foi dispensado. Apesar disso, foram empregados alguns instrumentos de coleta de dados, como: a) caderno de campo; b) gravações de áudios das discussões em sala de aula; c) questionário das tarefas prévias (dez ao todo); d) relatórios entregues sobre os trabalhos propostos (três ao todo); e) dois questionários, sendo que um deles foi aplicado no início e no final da disciplina; f) esboços de planos de aula feitos pelos estudantes; e g) entrevista semiestruturada com gravação de vídeo.

No total, foram observados 28 encontros⁵⁶, totalizando 56 horas-aula de imersão. Nem sempre era possível acompanhar as discussões que ocorriam na sala de aula, muitas vezes, com falas simultâneas, de forma que foi frequente o uso do gravador de voz⁵⁷,

56 Sem levar em consideração os encontros destinados à realização de provas, trabalhos e resposta a questionários.

57 Os excertos de voz foram gravados por meio de um programa de celular e posteriormente salvos no computador onde os dados referentes à pesquisa foram armazenados.

possibilitando assim a transcrição de trechos que sem ele teriam se perdido. As tarefas prévias também forneceram muitas informações, principalmente com relação ao nível de entendimento dos estudantes sobre os conteúdos sendo trabalhados. Dos 70 questionários disponibilizados (7 x 10 tarefas prévias = 70), 55 foram respondidos (78%), um número razoável quando se considera a exigência das tarefas. Os textos que os estudantes deveriam ler, assim como as questões que deveriam ser respondidas se encontram no Apêndice B. Os relatórios também forneceram valiosas informações, já que neles os estudantes poderiam escrever suas ideias de forma livre e refletida, de forma que o pesquisador pode ter uma compreensão mais aprofundada sobre seus conhecimentos. Porém apenas 13 de um total de 21 relatórios (7 x 3 relatórios) foram entregues (62%).

Antes da primeira aula da disciplina, foi aplicado um questionário aos estudantes da turma (ver Apêndice B). Esse questionário, chamado de Questionário 1, tinha o objetivo de inferir a compreensão dos estudantes sobre conhecimentos centrais da transposição didática na acepção da TAD, e seus conhecimentos sobre o conceito de hipótese. Por exemplo, no Questionário 1 havia uma questão em que o estudante era solicitado a comentar sobre a afirmação: *“Não devemos transformar o conhecimento produzido pelos cientistas nas aulas de Física. Por isso, o conhecimento explorado nas aulas de Física deve ser tão próximo do conhecimento original (construído pelos cientistas) quanto possível”*. O objetivo dessa pergunta era elucidar se o estudante tinha noção de que o conhecimento a ser ensinado tem adaptações. Ao todo foram cinco perguntas sobre a transposição didática. Sobre os conhecimentos de hipóteses, havia apenas uma pergunta, que foi a seguinte: *“O que é uma hipótese científica? Quais são as características das hipóteses sob as quais os cientistas se apoiaram quando construíram a MC? Qual era a origem dessas hipóteses?”*.

Após o encerramento das discussões sobre a Mecânica newtoniana e referenciais não inerciais, os estudantes responderam a um segundo questionário, denominado Questionário 2 (ver Apêndice B). Com ele, tinha-se por objetivo: a) coletar informações sobre as impressões do estudante sobre o andamento da disciplina; b) colocar os estudantes em situações hipotéticas de docência, possibilitando a coleta de informações sobre implicações das aulas da disciplina nas suas noções sobre a prática docente; c) verificar a adaptabilidade das práticas docentes dos estudantes frente a mudanças no contexto de ensino; d) verificar se os estudantes evidenciam que planejam exercer a vigilância epistemológica, posicionando-se de forma crítica frente a uma situação real. Por exemplo, os estudantes deveriam explicar detalhadamente como procederiam para ensinar as leis de Newton e reagir a comentários hipotéticos de alunos estando na condição de professor. A situação real mencionada é um trecho de livro didático.

Outro instrumento de coleta de dados foi um plano de aula sobre Gravitação Universal que deveria ser confeccionado pelos estudantes. Ele foi aplicado logo após o professor encerrar o conteúdo sobre Gravitação e pode ser visto no Apêndice B. Além de elementos típicos de todos os planos de aula, como objetivos e metodologia de ensino a ser empregada, o estudante deveria reagir a comentários hipotéticos feitos por seus alunos, imaginando-se, novamente, na condição de professor. Por exemplo, um comentário hipotético foi: “*Professor(a), de verdade, ainda não entendi como a Terra e a Lua se atraem. Pra mim isso é magia*”. Nesse caso, tinha-se como objetivo avaliar o repertório de explicações do estudante e, ao mesmo tempo, verificar se ele exerceria a vigilância epistemológica. Ele poderia citar explicações alternativas, embasadas em raciocínios primordiais, como a interpretação mecânica da gravidade, que faz mais sentido ao aluno do que o argumento de autoridade de que a interação gravitacional é à distância; porém, isso seria feito chamando a atenção que existem descrições modernas com a teoria da relatividade geral, que explica a gravidade em termos da curvatura do espaço-tempo. Essa estratégia de coleta de dados funcionou bem no Questionário 1, porque os estudantes eram mais específicos em suas respostas quando emulavam explicações. Em geral, suas respostas tendiam a ser um tanto genéricas, de forma que em algumas situações o pesquisador teve que consultar o(a) estudante para esclarecer o que ele(a) quis dizer.

O último instrumento de coleta de dados foram as entrevistas semiestruturadas, feitas após o término das aulas (ver roteiro da entrevista no Apêndice B) e conduzidas com cada participante individualmente. Os objetivos da entrevista eram avaliar conhecimentos sobre a transposição didática e sobre o conceito de hipóteses. Cada participante teve a oportunidade de expressar suas vivências, percepções e compreensões em suas próprias palavras, o que permitiu a obtenção de *insights* valiosos. As entrevistas funcionaram como complementos valiosos aos outros métodos de coleta de dados utilizados.

A utilização e combinação de diferentes fontes de evidência permitiu a construção de uma imagem mais completa e robusta da experiência na disciplina, contribuindo significativamente para a qualidade e profundidade das análises e conclusões obtidas. A Figura A.5 ilustra cronologicamente os momentos da aplicação dos instrumentos de coleta de dados.

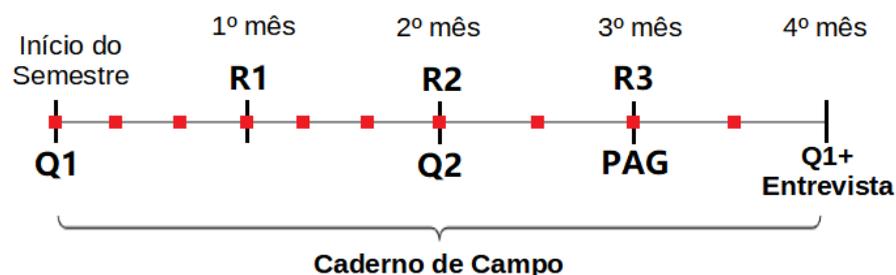


Figura A.5: Linha do tempo representando o semestre e os momentos de aplicação dos instrumentos de coleta de dados, que são o caderno de campo, as tarefas prévias (quadrados vermelhos), os relatórios dos trabalhos (R1, R2 e R3), os questionários (Q1 e Q2), o Plano de Aula sobre Gravitação (PAG) e a entrevista semiestruturada.

Os estudantes de Licenciatura em Física da turma em que a experiência foi realizada eram todos do curso diurno e o semestre letivo da aplicação foi 2022/2. Havia oito estudantes matriculados na disciplina, mas apenas sete compareceram regularmente até o final. Desses sete, havia cinco homens e duas mulheres, com média de idade de 23,9 anos e desvio padrão de 4,1 anos. A presença média nas aulas foi de 87%. A média das notas finais dos estudantes aprovados, em uma escala de zero a dez, foi de 7,5 pontos com desvio padrão 0,9 pontos. Apenas um estudante foi reprovado. Até aqui, descreveu-se a estrutura da disciplina reformulada, bem como os instrumentos de coleta de dados. A seguir, os resultados da experiência são apresentados.

Com base na análise das evidências, foi possível concluir que a compreensão da noção de hipótese pelos estudantes é um fator correlacionado com o desenvolvimento de conhecimentos essenciais para o exercício da vigilância epistemológica. A exposição e compreensão das hipóteses basilares do conhecimento científico parecem ter desempenhado um papel crucial para despertar a complexidade e o caráter dinâmico da ciência na mente dos estudantes. Em diferentes graus, foi observado que os estudantes que conseguiram internalizar o conceito de hipótese e compreender sua importância na construção do conhecimento científico mostraram uma maior capacidade de exercer a vigilância epistemológica. Comparado com seus conhecimentos antes da disciplina, esses estudantes conseguiram desenvolver uma compreensão mais profunda sobre a natureza da Ciência, evidenciando uma postura mais crítica e reflexiva diante das transformações e simplificações que frequentemente ocorrem na transposição didática. Apenas um estudante permaneceu com uma compreensão insatisfatória do conceito de hipótese. Nesse caso, parece ter havido um impacto negativo na capacidade de exercer a vigilância

epistemológica, indicando que a compreensão deste conceito é uma pré-condição para a habilidade de monitorar e refletir sobre o processo de transposição didática.

Foi possível identificar que o ensino centrado na explicitação das hipóteses basilares da MC despertou nos estudantes a consciência sobre alguns aspectos da natureza da ciência. Pelas evidências coletadas, parece que a transposição didática pretendida pelos estudantes é balizada por esses fatores. O primeiro deles é referente à **natureza hipotético dedutiva do conhecimento científico**. Outro aspecto que parece ter sido despertado na mente dos estudantes foi a **complexidade do fazer científico**. O último aspecto despertado é a consciência de que **o conhecimento a ser ensinado deve minimamente remeter à sua essência, isto é, ao conhecimento original**.

Também se observou que, de forma geral, a capacidade de exercer a vigilância epistemológica não se refletiu nas explicações dos estudantes em situações em que a adequação do conhecimento a ser ensinado em relação ao saber de referência poderia ser questionada. Em apenas dois casos, foi possível observar indícios de que houve a reflexão com relação ao conhecimento a ser ensinado, já que as explicações dos estudantes nessas situações chamavam a atenção para suas diferenças em relação ao conhecimento como ele foi originalmente concebido. Mesmo assim, isso ocorreu apenas ao final da disciplina, de forma bastante tímida ou incompleta por parte de dois estudantes. Esses estudantes apresentaram um repertório de explicações mais amplo que seus colegas, sem se restringir ao que é utilizado tradicionalmente para se ensinar os conteúdos. Nas referidas situações, foram evocados conhecimentos que haviam sido trazidos previamente na disciplina, como as concepções originais de Kepler e Newton sobre a gravidade. Assim, foi possível evidenciar que esses estudantes foram capazes de reestruturar a transposição didática, pois têm conhecimento das adaptações e transformações pelas quais a MC passou ao longo do tempo.

Sobre esse aspecto, percebeu-se nitidamente uma tendência de modulação do discurso dos estudantes quando eles transitavam entre a explicação dirigida ao aluno e aos pares (professor da disciplina/pesquisador). Essa modulação não é apenas no sentido de tornar a explicação mais ou menos complexa. Em vez disso, observou-se que os estudantes optavam deliberadamente por atitudes que denotam o fechamento da consciência didática quando explicavam para o aluno e por atitudes que denotam sua abertura quando explicavam aos seus pares. Essa percepção foi a mais comum do estudo. As afirmações sobre a abertura ou fechamento da consciência didática são feitas com base na inferência pelas ações dos estudantes, isto é, são evidências indiretas. Isso ocorreu, por exemplo, quando alguns estudantes modularam seu discurso trazendo elementos contextuais,

destacando as transformações no conhecimento a ser ensinado e apontando as limitações do modelo da Gravitação Universal. A partir disso, pode-se inferir que eles refletiram sobre o processo de transposição didática e questionaram o conteúdo a ser ensinado. Em outras palavras, os estudantes mostraram alguma capacidade em reestruturar a transposição do saber a ensinar, evidenciando, ao menos de forma indireta, a abertura da consciência didática.

Pode-se aventar que um aspecto limitante no exercício da vigilância epistemológica é a dificuldade envolvida no ensino de Física com conhecimentos históricos, muitos dos quais novos aos estudantes. De fato, o volume de informações foi grande para uma disciplina de 60 horas-aula e, como mostrado nas evidências, alguns estudantes relataram ter avaliado a disciplina como difícil. Entretanto, a dificuldade de assimilar conhecimentos históricos e conceituais não parece ter sido um desafio relevante, já que os estudantes demonstravam possuir tal conhecimento quando se dirigiam aos seus pares. Ainda, a correção das provas dos estudantes mostra que suas dificuldades foram predominantemente relacionadas com o formalismo matemático, não com os conceitos da Física. Como relatado pelos estudantes, em nenhuma outra disciplina na universidade ou na escola, eles haviam sido expostos ao conteúdo da forma como foram nesta, pois predominantemente tiveram ensino tradicional. Como se sabe que ocorre nessas situações, quando alguém precisa ensinar, acaba recorrendo à forma como foi predominantemente ensinado. Foi exatamente o que foi observado nesta implementação da disciplina. Assim, mantendo as atividades hipotéticas de docência que foram realizadas (como o plano de aula sobre gravitação no Apêndice B), provavelmente seria preciso mais tempo do que um semestre letivo para que os estudantes fossem capazes de realizar uma transposição didática efetiva, capaz de proporcionar um olhar crítico sobre a relação entre os saberes de referência e os saberes escolares.

Assim, pode-se concluir que a explicitação do papel das hipóteses na construção da MC favoreceu a abertura da consciência didática dos licenciandos que participaram da experiência didática, que passaram a dispor de conhecimentos necessários para a realização da vigilância epistemológica. Entretanto, ter o conhecimento não é suficiente para garantir a sua mobilização em situações práticas de docência. Mesmo que os licenciandos valorizem e tenham consciência do papel dos episódios históricos na construção do conhecimento, isso não é suficiente para que ampliem seus repertórios de explicações didáticas a partir do exercício da vigilância epistemológica.

Apêndice B - Instrumentos de coleta de dados (Relato de Experiência)

Neste apêndice, são apresentados alguns dos instrumentos de coleta de dados utilizados como fontes de evidências para as conclusões obtidas na primeira implementação da disciplina de Mecânica Clássica para a Licenciatura, conforme descrito no Apêndice A. As referidas fontes são:

- Questionários das tarefas prévias;
- Questionário 1;
- Questionário 2;
- Plano de aula sobre gravitação;
- Roteiro da Entrevista.

QUESTIONÁRIOS DAS TAREFAS PRÉVIAS

Ao final de todo o questionário havia a seguinte questão: “Relate suas dificuldades de compreensão do texto e os aspectos que mais lhe chamaram a atenção”, omitida para evitar repetição.

Tarefa prévia 1 – Razões vs Proporções na Mecânica (Data: 22/11/2022): Leitura das páginas 165-180 do artigo “*O formalismo da Mecânica Clássica, de Aristóteles a Galileo*” (MARTINS, 2021). Questões:

- O que diferenciou Aristóteles dos pensadores anteriores e contemporâneos no que diz respeito a forma de descrever sua Filosofia Natural?
- Explique porque uma equação como “ $F=ma$ ” não faz sentido para um erudito do século XV.
- Quais elementos físicos e metafísicos são usados por Aristóteles para justificar sua lei da alavanca?

Tarefa prévia 2 - Força Impresa e a Física do Ímpetus (Data: 29/11/2022): Leitura das páginas 89-94 do artigo “*Desenvolvimento histórico da dinâmica: referente para a evolução das concepções dos estudantes sobre força e movimento*” (HARRES, 2002). Questões:

- Qual a concepção de movimento dominante sobre o movimento de projéteis entre estudantes? Como essa concepção se diferencia da concepção aristotélica?
- Como as discussões sobre a força impresa e Ímpetus estão ligadas com os embates sobre a existência ou não do vácuo?

- A Física aristotélica versava sobre o “mundo real” e a nova Física sobre o “mundo inventado”. Explique essa frase por meio de um exemplo.

Tarefa prévia 3 – Aceleração Centrífuga (Data: 06/12/2022) – Leitura integral do texto "*O desenvolvimento do formalismo da Mecânica Clássica, de Christiaan Huygens e Isaac Newton até Leonhard Euler*" (MARTINS, 2021). Questões:

- O que é força centrífuga na concepção de Huygens? Para ele, essa força existe ou é só um artifício matemático?
- Como a força centrífuga é medida em termos geométricos? Qual o papel do movimento inercial na dedução da força centrífuga?

Tarefa prévia 4 – A Conservação da Força (Data: 20/12/2022): Leitura das seções I – III (p. 63-77) do texto: "*Mayer e a Conservação da Energia*" (MARTINS, 1984). Questões:

- O período de 1842 a 1847 foi muito fértil para as ideias relacionadas à conservação da energia, ou melhor, da “força”. Quais argumentos metafísicos foram adotados pelos pioneiros para justificar seus princípios de conservação? Que experimentos corroboram suas teses?
- A controvérsia envolvendo Mayer e Joule é um aspecto pouco explorado nos livros didáticos, sendo o crédito da “descoberta” da conservação da energia predominantemente reservado à Joule. Colocando esse aspecto de lado, quais eram os pontos em comum da teoria dos dois físicos e que os diferenciava de outros como Faraday e Helmholtz?

Tarefa prévia 5 – As Forças Fictícias São, na Verdade, Reais? (Data: 17/01/2023): Leitura integral do texto: "Experimento do Balde e Espaço Absoluto" (PESSOA, 2019). Questões:

- Newton propôs dois experimentos para demonstrar a existência de movimento e espaço absoluto (“sensorio divino”), fundamental para suas leis. Berkeley, Leibniz e Mach figuram entre os críticos mais eminentes desta visão, advogando em favor da existência apenas de movimentos relativos. Explique como Newton usou o experimento do balde e das esferas tensionadas para argumentar a favor de suas ideias.
- Segundo Einstein, o Princípio de Mach influenciou fortemente na construção da Teoria da Relatividade Geral. Explique como as forças fictícias podem ser entendidas como reais por meio deste princípio.

Tarefa prévia 6 – Padres Jesuítas e o Efeito de Coriolis! (Data: 24/01/2023): Leitura da primeira seção do texto "*Early descriptions of Coriolis effect*" (GRANAY, 2017). Por se tratar de uma leitura de apenas uma página, não foi oferecida uma tradução para o português desse texto. Questões:

- Explique o argumento do padre jesuíta Claude François Milliet Dechaes sobre o movimento de queda de um corpo largado do alto de uma torre. Qual foi a conclusão do seu raciocínio?
- Quais elementos da Mecânica Clássica já eram aceitos por Dechaes em seu argumento Anti-copernicano?

Tarefa prévia 7 – A História da Maçã (Data: 31/01/2023): Leitura das páginas 167-180 do texto "*A maçã de Newton: história, lendas e tolices*" (MARTINS, 2006). Questões:

- Quais eram as primeiras concepções de Newton sobre a gravidade? O que a causava?
- Qual a importância dos resultados de Huygens para as conclusões de Newton sobre a queda da maçã?
- Sobre o episódio da queda da maçã, qual foi a mudança conceitual mais significativa que se operou no pensamento de Newton sobre a gravidade? Como essa mudança contraria a concepção, hegemônica em sua época, sobre o movimento dos astros?

Tarefa prévia 8 – Determinismo na Física (Data: 28/02/2023): Leitura da introdução e da seção 1 (p. 465-476) do texto: "*A noção de determinismo na Física e seus limites*" (PATY, 2004). Questões:

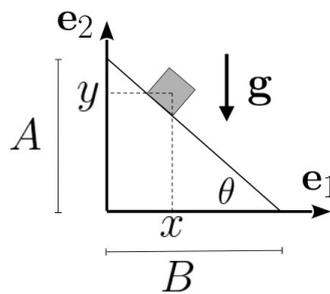
- O que é o determinismo laplaciano? Como ele se diferencia da causalidade de D'Alembert?
- Poincaré se declarava um "determinista absoluto". Entretanto, sua crença era atenuada em relação à de Laplace. Explique esse aspecto.

Tarefa prévia 9 – O Princípio do Trabalho Virtual (Data: 14/03/2023): Leitura integral da seção 1 e parcial da seção 2 (subseções 2.1 e 2.2, p. 7) do texto "*Um esboço da história do conceito de trabalho virtual e suas aplicações*" (CINDRA, 2008). Questões:

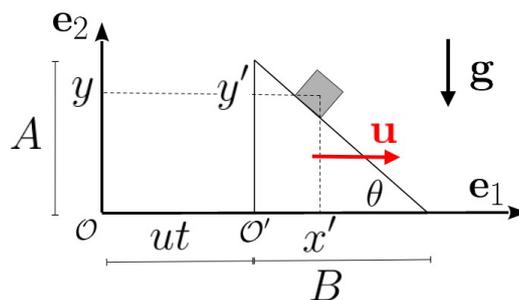
- No texto o autor relata que Simon Stevin (1548-1620) e Galileu Galilei (1564-1642) foram os primeiros a utilizar o princípio do trabalho virtual para resolver problemas da Mecânica, sem contudo, reconhecer a importância e generalidade da relação. Esse

princípio, cuja provável origem remonta à antiguidade clássica, foi o primeiro da Física e hoje é considerado o fundamento da Mecânica Analítica, que nós passaremos a estudar. Qual a limitação desse princípio quando se estuda sistemas mecânicos?

- O princípio do trabalho virtual depende do conceito de deslocamento virtual. No texto, evidenciam-se três tipos de deslocamentos: o real, o possível e o virtual. Sobre isso, vamos fazer dois exercícios.
 - Considere o sistema representado pela figura abaixo. As forças atuantes no sistema são a força da gravidade e a força de vínculo. Determine as equações que representam os deslocamentos: possível, virtual e real do bloco. *Dica: A equação de vínculo $f(x,y)=0$ é originada a partir da relação entre as coordenadas y e x : $y=A-(A/B)x$.*



- Considere o mesmo sistema da questão anterior, porém agora o plano se desloca com velocidade constante u . Determine as equações que representam os deslocamentos: possível, virtual e real do bloco. *Dica: Descreva o movimento a partir do observador O' , depois a partir do observador O por meio das transformações de Galileu.*



Tarefa prévia 10 - O que É, de Fato, Energia Potencial? (Data: 28/03/2023): Leitura integral do texto “*An Historico-Critical Account of Potential Energy: Is PE Really Real?*” (HECHT, 2003). Uma tradução deste texto para o português, feita por este doutorando, foi disponibilizada aos estudantes no Moodle. Questões:

- Por que muitos cientistas do início do século XX não estavam dispostos a admitir que a energia potencial existia de fato? Para esses cientistas, o que era a energia potencial?
- Como surgiu a noção de que a energia potencial é “armazenada no campo”? Para onde vai a energia cinética de uma pedra ao ser lançada para cima?

QUESTIONÁRIO 1

Sobre a transposição dos conhecimentos e a didática no ensino de MC, responda:

Conhecimentos sobre o(s)/a(s)...	Questões relacionadas à TAD:
Consciência de que todo processo de transposição envolve transformações.	Comente sobre a seguinte afirmação: “Não devemos transformar o conhecimento produzido pelos cientistas nas aulas de Física. Por isso, o conhecimento explorado nas aulas de Física deve ser tão próximo do conhecimento original (construído pelos cientistas) quanto possível”. Explique sua posição e comente sobre isso tratando especificamente da MC.
Abertura da consciência didática	Ao ensinar certo conteúdo da MC, você precisa transpor o conhecimento disponível para os seus alunos. Esse conhecimento disponível é muito mais amplo do que o efetivamente abordado em sala de aula. No processo de transposição, o que é mais importante para você?
Natureza e processo de construção de conhecimento da/pela Ciência	Em que aspectos a história da Física relacionada aos conteúdos da MC pode auxiliar em sua prática docente? Você acredita que um ensino que leva em conta o desenvolvimento histórico dos conhecimentos pode ser útil? Explique dando exemplos.
Fechamento da consciência didática	Durante a prática docente, há situações em que você considera razoável/legítimo negligenciar, propositalmente, a origem, contexto e motivação de certos conhecimentos da MC (ou seja, só “focar no conteúdo”)? Se sim, quais seriam essas situações?
Hipóteses	O que é uma hipótese científica? Quais são as características das hipóteses sob as quais os cientistas se apoiaram quando construíram a MC? Qual era a origem dessas hipóteses?

QUESTIONÁRIO 2

1. Comente sobre a disciplina Mecânica Clássica para a licenciatura. Fique à vontade para comentar sobre as suas impressões sobre as atividades, as tarefas, os temas e as

discussões realizadas, assim como a sua aprendizagem e as possíveis implicações da disciplina em suas futuras práticas como docente.

2. Imagine a situação em que você foi contratado(a) como professor(a) de Física de uma escola para dar aulas para uma turma do primeiro ano do ensino médio. A escola lhe concedeu autonomia para trabalhar da forma como deseja, desde que a legislação vigente seja cumprida (número de horas, conteúdos, etc.). A escola possui estrutura completa para proporcionar ensino e aprendizagem (recursos multimídia, laboratório de Física, etc) e seus estudantes têm conhecimentos amplos e sólidos. O primeiro assunto que você decide abordar com seus estudantes é “Leis de Newton”. Os estudantes não tiveram contato com esse conteúdo previamente.

- 2.1 Sobre suas ações de planejamento das aulas para esses estudantes, responda:
 - 2.1.1 Como você iniciaria a discussão sobre o conteúdo?
 - 2.1.2 De que forma você planeja introduzir o conhecimento que pretende explorar com os estudantes?
 - 2.1.3 Por que você procederia desse modo?
- 2.2 Sobre as três leis de Newton em si, responda:
 - 2.2.1 Como você faria, especificamente, para abordá-las?
 - 2.2.2 Quais seriam suas ações específicas até construir o enunciado de cada uma das três leis com os estudantes?
- 2.3 Dê um exemplo de modificações em suas ações anteriores (itens 2.1 ao 2.2.2) que você realizaria caso os estudantes tivessem deficit de aprendizagem (decorrentes de uma formação escolar insuficiente) e/ou a escola tivesse estrutura insuficiente.
- 2.4 Como você responderia as seguintes perguntas, feitas por um(a) estudante da turma em frente a todos os seus colegas (assuma que você responde a pergunta para toda a classe):
 - *“Professor(a), não entendi bem o que é força. Esse é um conceito relacionado com aceleração, certo? Poderia me explicar melhor?”*
 - *“Professor(a), não entendi bem o que é um referencial. Existem referenciais certos e errados? Onde fica o referencial certo? Poderia me explicar melhor?”*

3. Leia atentamente o trecho de um livro didático para o ensino médio:

“Introduzindo o método experimental para o estudo dos fenômenos físicos, Galileu realizou uma série de experiências que o levaram a conclusões diferentes daquelas de Aristóteles. Estando uma esfera em repouso sobre uma superfície horizontal, Galileu observou que, empurrando-a com uma certa força, ela entrava em movimento. Entretanto, a esfera continuava a se mover, percorrendo uma certa distância, mesmo depois que ele deixava de empurrá-la. [...] Baseando-se em uma série de experiências semelhantes, Galileu concluiu que o corpo parava, após cessado o empurrão, em virtude da ação do atrito entre a superfície e o corpo [...]. Generalizando suas conclusões, Galileu chegou ao seguinte resultado:

Se um corpo estiver em repouso, é necessária a ação de uma força sobre ele para colocá-lo em movimento. Uma vez iniciado o movimento, cessando a ação das forças que atuam sobre o corpo, ele continuará a se mover indefinidamente, em linha reta, com velocidade constante.

[...] As experiências de Galileu o levaram a atribuir a todos os corpos uma propriedade, denominada inércia, pela qual um corpo tende a permanecer em seu estado de repouso ou de movimento. [...] Ao estruturar os princípios da Mecânica, Newton se baseou em estudos de grandes físicos que o precederam, entre eles Galileu. Assim, a 1ª lei de Newton não é nada mais do que uma síntese das ideias de Galileu relativas à inércia e, por isso mesmo, ela é também denominada lei da inércia:

Primeira Lei de Newton (Lei da Inércia de Galileu): Na ausência de forças, um corpo em repouso continua em repouso e um corpo em movimento move-se em linha reta, com velocidade constante."

Fonte: MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. Física - Ensino Médio, vol. 1, Editora Scipione, 2006, .p. 110-113).

Considerando a explicação dos autores sobre o desenvolvimento do princípio da inércia:

- 3.1 Avalie o trecho do ponto de vista de sua acurácia conceitual e histórica.
- 3.2 Destaque os pontos (se eles existem) que você optaria por explicar de forma diferente aos estudantes caso fosse ensinar o conceito de inércia.

PLANO DE AULA SOBRE GRAVITAÇÃO

Professor(a) regente: _____ . **Turma:** 202M.

Aula(s): 16-20.

Tema da aula: Gravitação Universal (GU).

Conteúdos a serem trabalhados: Lei da Gravitação Universal e Leis de Kepler.

1. Objetivos (o que você quer que os(as) estudantes aprendam relacionado com a GU?):
2. Metodologia (como você proporcionará a aprendizagem dos(as) estudantes aprendam? Destaque ações específicas):
3. Ao final de uma das aulas, uma estudante comenta: *“Professor(a), de verdade, ainda não entendi como a Terra e a Lua se atraem. Pra mim isso é magia”*. Reaja a esse comentário como se estivesse respondendo à estudante.
4. Motivado pela pergunta da colega, outro estudante lhe pergunta: *“Tá... E as Leis de Kepler? Pra mim também foi ‘do nada’ essa história de órbita elíptica!”*. Reaja a esse comentário como se estivesse respondendo ao estudante.

ROTEIRO DA ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA

- Poderia começar contando um pouco sobre a sua experiência no curso de Mecânica Clássica? Como você caracterizaria a sua experiência? Do que você gostou ou não gostou? O que pensa que deveria ser diferente?
- Avalie a seguinte frase: *“Não devemos transformar o conhecimento produzido pelos cientistas nas aulas de Física. Por isso, o conhecimento explorado nas aulas de Física deve ser tão próximo do conhecimento original quanto possível”*
- Estudamos a MC levando em conta o contexto histórico de vários cientistas (Aristóteles, Galileu, Descartes, Newton, Lagrange, etc). Acredita que tendo aprendido MC dessa forma terá alguma implicação na sua prática docente? Se sim, como e por quê?
- Durante a prática docente, têm situações em que você considera importante “focar no conteúdo”, isto é, negligenciar, propositalmente, a origem, contexto e motivação de certos conhecimentos? Se sim, explique porque isso é justificável.

- Vimos que a construção da Mecânica Clássica é assentada sobre hipóteses. Por exemplo, Aristóteles atribuía as propriedades maravilhosas da alavanca ao círculo, a figura perfeita; Newton especulou que o campo gravitacional é gerado por uma corrente de éter; Maupertuis acreditava que o caminho percorrido por um sistema minimiza a ação, já que Deus não comete excessos. Na disciplina, vimos que é difícil identificar essas hipóteses porque elas são implícitas e não fazem parte dos livros-texto. Sobre isso, responda:
 - O que é uma hipótese? Que tipos de hipóteses discutimos?
 - O que dirige um cientista na hora de formular uma hipótese?
 - Hipóteses podem ser provadas?
- Ao preparar uma aula, você precisa transpor o conhecimento disponível para seus alunos. Esse conhecimento é muito mais amplo do que o que é possível abordar em sala de aula. No processo de transposição, quais elementos são mais importantes para ti?
- Considere o seguinte trecho de um livro didático muito usado em cursos de Mecânica Clássica:

“Para contornar algumas das dificuldades práticas que surgem na tentativa de aplicar a Mecânica newtoniana aos problemas particulares [o autor se refere ao problema de encontrar as forças de vínculo], pode-se desenvolver métodos alternativos. Todas essas abordagens são, em essência, a posteriori, já que nós sabemos de antemão que um resultado equivalente às equações newtonianas devem ser obtidos. Assim, para simplificar as coisas, não precisamos formular uma nova teoria de Mecânica - a teoria de Newton é correta! -, apenas vislumbrar um método alternativo e geral para lidar com problemas complicados. Esse método está contido no Princípio de Hamilton, e as equações de movimento que resultam da aplicação desse princípio chamam-se Equações de Lagrange.

Se as equações de Lagrange se constituem em descrições corretas da dinâmica de uma partícula, elas devem ser equivalentes às equações de Newton. [...] O Princípio de Hamilton não nos forneceu nenhuma teoria nova, mas nos permitiu uma unificação satisfatória de muitas teorias individuais com um único postulado. Considerando tudo, esse não é um exercício fútil de ser feito, já que um dos objetivos de uma teoria física é não apenas fornecer uma formulação matemática

precisa para os fenômenos observados, mas também descrever esses efeitos com uma economia de postulados fundamentais de forma mais unificada possível.”

Traduzido de Thornton e Marion (2004, p. 228-229)

- Considerando a explicação dos autores sobre a relação entre as Leis de Newton, as equações de Lagrange e o Princípio de Hamilton:
 - Avalie o trecho do ponto de vista de sua acurácia conceitual e histórica.
 - Como você introduziria o Princípio de Hamilton?

Apêndice C - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Estudo 2)

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa intitulada “O papel das hipóteses na abertura da consciência didática de futuros docentes”, que tem como pesquisadores responsáveis o Dr. Leonardo Albuquerque Heidemann (leonardo.h@ufrgs.br) e a Dr^a. Eliane Angela Veit (eav@if.ufrgs.br), docentes do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A pesquisa será realizada por Rodrigo Weber Pereira (rodrigo.weber@ufrgs.br), estudante de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE nFís/UFRGS).

Esta pesquisa é motivada pelo interesse em proporcionar aos futuros professores uma formação que os prepare para que estejam aptos a realizar a transposição didática da Mecânica Clássica (MC) tendo em vista as suas hipóteses basilares, garantindo que as transformações incorporadas aos conteúdos ensinados com fins didáticos sejam adequadas aos diferentes contextos de ensino. À luz da Teoria Antropológica do Didático (TAD) e da noção de hipótese proposta por Lima e Heidemann, vamos explorar formas de ensino dos conteúdos de MC que tenham potencial de favorecer os aspectos acima mencionados. A pesquisa envolverá a realização de discussões em grupo, gravação eventual de falas (sem identificação pessoal), resposta a questionários e entrevistas semiestruturadas.

Nesse contexto, informamos que:

- sua participação é inteiramente voluntária;
- não haverá despesas para sua participação nesta pesquisa, assim como você não será remunerado(a) para tal;
- as informações coletadas serão utilizadas apenas para a pesquisa e poderão ser divulgadas em eventos e publicações científicas, porém sem trazer sua identificação explícita;
- a pesquisa não oferece riscos aos participantes, a não ser algum constrangimento pelas respostas fornecidas. Para evitar este risco, buscaremos sempre manter seu anonimato;
- você poderá se recusar a responder qualquer pergunta da entrevista, ou qualquer outra solicitação que lhe seja feita;
- você poderá retirar seu consentimento ou interromper sua participação na pesquisa a qualquer momento antes da divulgação dos resultados, bastando para isso comunicar a algum dos pesquisadores;
- esse termo de consentimento foi elaborado em duas vias, sendo uma via para você, participante da pesquisa, e outra para o pesquisador responsável;

Desta forma, uma vez tendo lido e entendido tais esclarecimentos e, por estar de pleno acordo com o teor do mesmo, eu _____, CPF _____, dato e assino este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Porto Alegre, ____ de _____ de 20____.

Assinatura do Participante

Assinatura do doutorando,
Rodrigo Weber Pereira

Assinatura do orientador,
Leonardo Albuquerque Heidemann

Apêndice D - Relato circunstanciado de aplicação da Metodologia da Ensino utilizada no Estudo 2.

Conforme explicado na Seção 6.3, a metodologia de ensino é empregada no contexto da busca por respostas a uma série de questões, iniciando por uma questão geradora. Antes de introduzir a questão geradora, buscou-se envolver os licenciandos em discussões sobre elementos da natureza da ciência e do processo de construção do conhecimento científico. Um aspecto particular que se destacou nas discussões foi a importância de promover, no ensino de tópicos da Física, a compreensão do caráter hipotético do conhecimento. Tomando a teoria da queda dos graves de Galileu como exemplo de um tópico recorrente no ensino médio, lançou-se a seguinte questão: “Q0 - *Como ensinar a teoria da queda dos graves destacando o caráter hipotético-dedutivo da ciência e a razão de ser do conhecimento?* Tal questão suscita naturalmente outras questões, como “Q1 – *Quais elementos contextuais e hipotéticos (elementos teóricos) foram assumidos por Galileu na construção de sua teoria?*”, “Q2 - *Quais tipos de tarefas (elementos práticos) podem ser úteis, no contexto do Ensino Médio, para evidenciar o caráter hipotético-dedutivo do conhecimento?*”, “Q3 – *Que tarefas específicas podem dar sentido a um único par de elementos teóricos e práticos?*” e “Q4 - *Quais questões problemáticas que, no contexto do Ensino Médio, explicitam a razão de ser do conhecimento relacionado à queda dos graves?*”. Essas questões foram respondidas ao longo de nove encontros.

A busca coletiva por respostas a essas questões faz parte do processo de construção de um MER e MDR relacionados com as praxeologias a serem ensinadas e para o ensino, que estão inseridas na praxeologia da profissão docente. Evidentemente, trata-se de uma parte pequena dessa praxeologia, já que os conhecimentos se referem apenas à teoria da queda dos graves. Apesar disso, a avaliação das condições e restrições relacionadas a esse processo de construção serão úteis no Estudo 3, onde o MER e MDR serão expandidos para abranger mais elementos praxeológicos da Mecânica. A seguir, descreve-se como as questões foram introduzidas e abordadas.

Para responder à questão Q1, optou-se por fornecer aos licenciandos uma versão adaptada do estudo exposto na Subseção 5.2.1, sendo esse texto a principal *media* à disposição dos licenciandos. O texto foi modificado apagando as referências explícitas a conceitos tanto da TAD quanto do referencial de hipóteses adotados. Por exemplo, retirou-se do corpo do texto a menção à natureza das hipóteses, que no estudo são classificadas como cosmovisivas, ontológicas e representacionais (Weber, Heidemann, 2024). Ao longo do estudo, referiu-se ao texto adaptado como “texto da disciplina”. Mesmo indicando um texto específico, a leitura de outros materiais foi encorajada. Após indicada a leitura do texto,

pedia-se que os licenciandos respondessem, em até uma semana, a um questionário com as questões Q1 e Q2. Tal questionário, na forma de um *Google Forms*, foi enviado de forma eletrônica aos licenciandos. As respostas individuais foram rotuladas com códigos de identificação, compiladas pelo pesquisador e expostas em um repositório digital denominado portfólio, ao qual os estudantes tinham acesso irrestrito, porém sem permissão de edição, via plataforma *Google Docs*⁵⁸. O portfólio foi usado como registro de todos os elementos gradualmente incorporados ao *milieu*, sendo um testemunho da mesogênese da investigação.

Nas aulas dois a quatro, enquanto os estudantes ainda dispunham de tempo para ler o texto da disciplina e responder às questões Q1 e Q2, foram ministradas aulas sobre teorias e elementos contextuais relevantes para a construção do pensamento de Galileu. Na segunda aula, a ênfase foi na origem da teoria das razões e proporções na antiguidade, bem como suas aplicações nas primeiras leis da Física, como a lei da alavanca, os intervalos pitagóricos e o modelo cosmológico de Eudoxo. Devido à sua importância nos desenvolvimentos científicos subsequentes, a terceira aula abordou elementos da ciência grega, com especial foco na concepção aristotélica. Os tópicos discutidos incluíram: o paradigma platônico-pitagórico da adoração ao círculo; a dicotomia razão vs. observação na construção do conhecimento; a visão aristotélica do mundo, com destaque para as noções de espaço, os mundos sublunar e supralunar, os tipos de movimento (natural ou violento), e as causas (p. ex., causa eficiente e finalística), além do movimento de projéteis. Na quarta aula, avançou-se rapidamente na história até o Renascimento, passando pelas contribuições dos filósofos medievais árabes e europeus na descrição do movimento de projéteis, assim como pela redescoberta dos textos clássicos. A discussão focou particularmente nas noções de força impressa e o conceito de impetus, pois esses conceitos são posteriormente retomados por Newton e Descartes, respectivamente.

Na quinta aula, após as respostas dos estudantes terem sido devidamente compiladas e incluídas no portfólio na forma de elementos teóricos (hipóteses + elementos contextuais) e práticos (tipos de tarefas), foram realizadas discussões avaliando a pertinência dos elementos teóricos e práticos levantados. Neste ponto, diversas críticas construtivas foram realizadas pelo professor, assim como elogios. Solicitou-se aos estudantes que postaram elementos teóricos ou práticos equivocados que arrumassem sua contribuição no portfólio tendo em vista as discussões realizadas em aula. Assim, o portfólio

58 Uma versão anônima desse portfólio, com as respostas de todos os licenciandos participantes da pesquisa pode ser consultada por meio deste link: http://www.if.ufrgs.br/gpef/mc_licenciatura/Portfolio_Anonimo_Milieu_Queda_dos_Graves.pdf Último Acesso: 30/09/2024.

passou a sofrer constantes modificações ao longo da unidade, sempre em razão do feedback e das discussões em aula. Ainda na quinta aula, iniciou-se a discussão sobre a Física de Galileu, com ênfase na linguagem utilizada por ele, ou seja, a teoria das razões e proporções, que já havia sido abordada na ciência grega. Paralelamente, foi proposta a questão Q3: “*Que tarefas específicas podem dar sentido a um único par de elementos teóricos e práticos?*”. Para responder a essa pergunta, cada estudante deveria construir, no prazo de uma semana, duas tarefas explicitando: os elementos teóricos e práticos correspondentes, bem como a relação entre esses elementos e os procedimentos didáticos. Os estudantes foram orientados a utilizar necessariamente os elementos teóricos e práticos do portfólio, referenciando-os pelo código de identificação. Assim, as exposições e os debates em aula foram fundamentais para a construção das tarefas, já que o portfólio, neste ponto, acumulava modificações realizadas pelos estudantes desde a tarefa anterior. Na sexta aula, ainda com os elementos do portfólio como referência, discutiram-se as concepções de movimento segundo Galileu, com foco nos movimentos naturais, violentos e neutros.

Novamente, um formulário eletrônico foi utilizado para coletar as tarefas produzidas pelos estudantes, que foram integradas ao portfólio pelo pesquisador, com um código de identificação próprio. Assim, na sétima aula, as tarefas produzidas foram discutidas em grupo, avaliando sua adequação para aplicação no Ensino Médio e suas justificativas, conforme será detalhado na seção de resultados. Além das discussões em aula, os estudantes foram incentivados a interagir no ambiente virtual, postando perguntas e comentários de forma pública ou anônima sobre as tarefas uns dos outros. Foi enfatizado que os estudantes deveriam ser responsáveis em suas produções, já que, conforme explicado, esses materiais seriam disponibilizados ao coletivo para uso nas tarefas subsequentes. O último tópico estudado foi a teoria da queda dos graves, que incorporou muitos dos elementos discutidos nas aulas anteriores.

Ao final da sétima aula, enunciou-se a questão Q4: “*Quais questões problemáticas que, no contexto do EM, explicitam a razão de ser do conhecimento relacionado à queda dos graves?*”. Para responder a essa questão, foi proposta a confecção de um diagrama Q-R, inspirado nos mapas tipicamente usados nos PEP (Winsløw *et al.*, 2013; Barquero *et al.*, 2018). Os estudantes deveriam formular uma questão geradora que, ao ser respondida por meio de uma arborescência de questões e respostas derivadas, tivesse o potencial de esclarecer o máximo de conhecimentos relacionados à teoria da queda dos graves. Além disso, foi solicitado que os estudantes associassem as tarefas elaboradas a algumas respostas do diagrama Q-R, sempre que considerassem pertinente para esclarecer algum

aspecto da teorização. O prazo para a realização da atividade foi, novamente, de uma semana. No encontro seguinte, foi disponibilizado tempo de aula para que os estudantes iniciassem a construção do diagrama Q-R e pudessem esclarecer dúvidas. Após o prazo de entrega, os diagramas finalizados foram anexados ao portfólio.

Assim delineado, o diagrama Q-R é particularmente adequado para fomentar o esclarecimento da razão de ser dos saberes. Isso porquê, ao associar questões, respostas e tarefas, cria-se uma vinculação entre o bloco teórico e prático da praxeologia sendo descrita. Por construção, os conhecimentos, na forma das respostas (R), são colocados como consequências de questões (Q), evidenciando sua razão de ser. Ao vincular a tarefa com a resposta, obtém-se o mesmo resultado: as tarefas têm o propósito de esclarecer um conhecimento que é anteriormente motivado por uma questão. Assim, ao estimular a busca pelas questões geradoras, a construção do diagrama exercita o questionamento dos saberes com relação ao saber de referência, favorecendo assim a vigilância epistemológica.

Por fim, no último encontro, a unidade didática foi encerrada com discussões sobre os diagramas Q-R e as atividades realizadas, destacando que os diagramas representam interpretações individuais de uma construção coletivamente elaborada. A resposta final coletiva à questão Q0 foi integrada ao portfólio, encerrando a investigação. A ênfase principal da avaliação dos diagramas foi em estabelecer se as respostas (R) e tarefas correspondiam às questões (Q) vinculadas de forma satisfatória. O vínculo era considerado satisfatório quando os pares de questões e respostas, junto com as tarefas vinculadas, vistos como um todo, evidenciavam a preocupação em esclarecer as hipóteses basilares da teoria da queda dos graves, evocando sua razão de ser.

Assim, fica elucidada a topogênese do processo de estudo: os estudantes tinham a responsabilidade individual de se apropriar da teoria e produzir elementos teóricos, práticos, tarefas e diagramas Q-R para alimentar o portfólio. Ao mesmo tempo, a construção de alguns desses elementos depende de uma responsabilidade coletiva: os estudantes precisavam integrar elementos teóricos e práticos dos colegas na construção das tarefas e no diagrama Q-R; precisavam responder aos questionamentos uns dos outros no portfólio; deveriam realizar as tarefas no prazo estipulado, etc. As três dialéticas até aqui referidas caracterizam as principais etapas do estudo (evolução das questões e respostas parciais), os subsídios para construção da resposta final à questão geradora (evolução do *milieu*) e a forma como as tarefas são atacadas (evolução das responsabilidades).

Os estudantes foram avaliados com base na entrega dos questionários, do diagrama Q-R e na resposta das indagações recebidas no portfólio⁵⁹. Não foram disponibilizadas listas de exercícios específicas sobre o tema.

59 Os exercícios específicos realizados sobre a Física de Galileu foram realizados em aula e estão disponíveis nos slides das aulas ministradas, podendo ser acessados neste link: http://www.if.ufrgs.br/gpef/mc_licenciatura/Slides_Queda_dos_Graves.pdf. Último Acesso: 30/09/2024.

Apêndice E - Roteiro da entrevista semiestruturada (Estudo 2)

TEMA 1 – QUADRO TEÓRICO-PRÁTICO

1.1) O que você tem a dizer sobre a construção do quadro que lhe foi solicitado? Sentiu dificuldades para elencar os elementos teóricos e práticos a partir do texto fornecido? Qual a sua maior dificuldade?

1.2) Você acredita que a explicitação dos elementos teóricos aprimorou sua compreensão da teoria sobre a “Queda dos Graves” em algum nível? Explique.

1.3) Sobre o portfólio...

1.3.1) Você acha que o portfólio foi uma ferramenta útil para realizar as atividades propostas?

1.3.2) Você acompanhava de forma mais ou menos regular a construção do portfólio ao longo das aulas?

1.3.3) Em algum momento a contribuição de outros colegas lá no portfólio foi útil para sua produção?

TEMA 2 - CONSTRUÇÃO DAS TAREFAS

2.1) O que você tem a dizer sobre a construção dessas tarefas? Qual foi a sua maior dificuldade ao ter que levar em conta os elementos teóricos e práticos?

2.2) Você acredita que os elementos práticos explicitados no portfólio foram uma boa fonte de inspiração para a concepção das tarefas elaboradas?

2.3) Você usou elementos teóricos e práticos de outras pessoas (lá no portfólio) para construir as tarefas ou acabou usando só a sua produção?

2.4) Como você compara esse método de construir tarefas com a forma usual que você utiliza quando elabora tarefas para seus alunos? Vantagens e desvantagens?

TEMA 3 - DIAGRAMA Q-R

3.1) Você já tinha pensado em representar certo conhecimento como uma sequência de perguntas e respostas? Essa abordagem lhe parece interessante? Por quê?

3.2) Como você avalia a dificuldade do processo de construção do mapa Q-R? Você acredita que o quadro de elementos teóricos e práticos do portfólio lhe auxiliou em algum nível nesse processo?

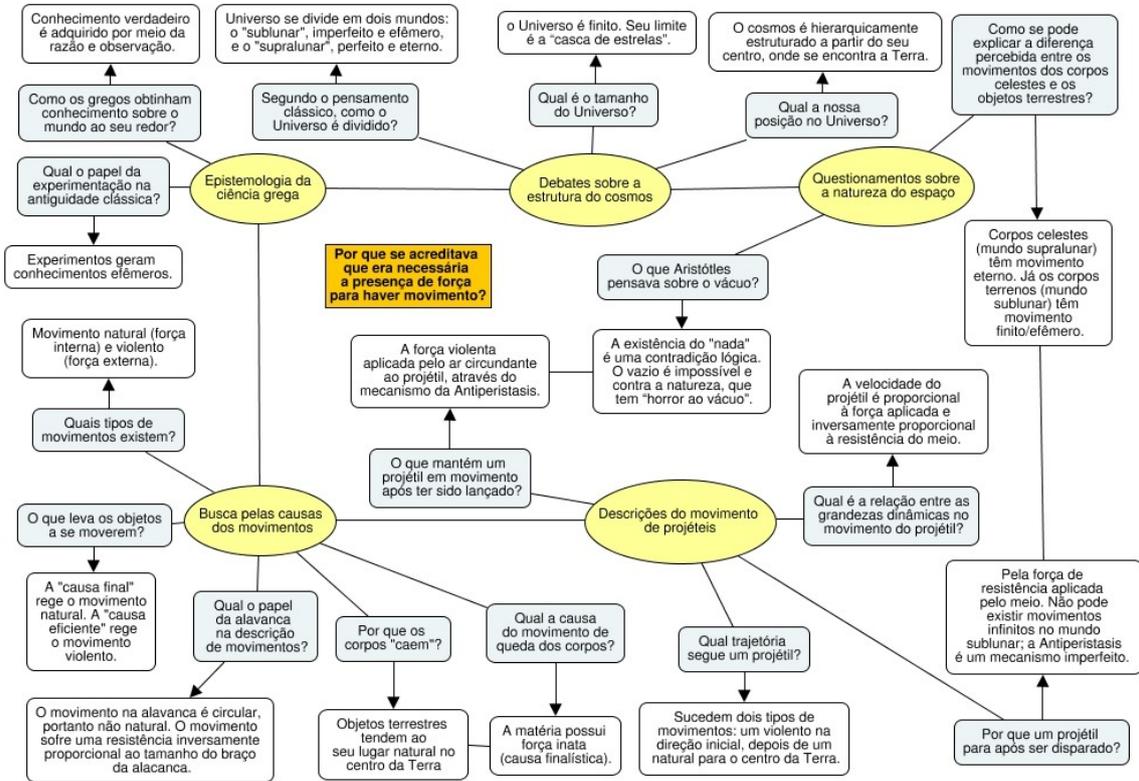
3.3) Você acredita que a vinculação das tarefas no diagrama Q-R pode ser útil no seu processo de transposição didática? Por quê?

TEMA 4 - PERGUNTAS GERAIS

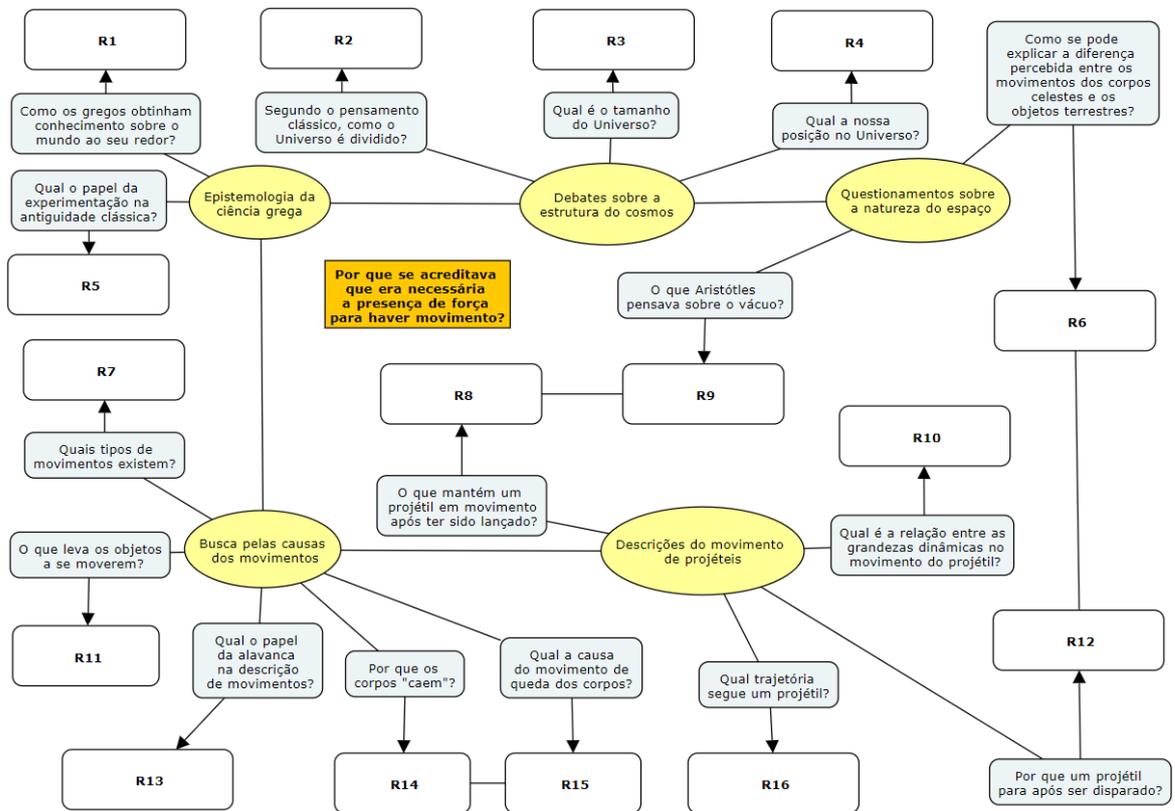
- 4.1) No todo, qual foi o impacto da metodologia utilizada no seu processo de aprendizagem sobre a “Queda dos Graves” e como ele se compara com sua aprendizagem habitual em outros contextos, fora da disciplina?
- 4.2) Qual foi sua principal dificuldade durante a aplicação? Quais tarefas foram mais difíceis de realizar?
- 4.3) Sinta-se livre para comentar algo que você ache pertinente sobre sua experiência.

Apêndice F - Diagramas Q-R (Estudo 3)

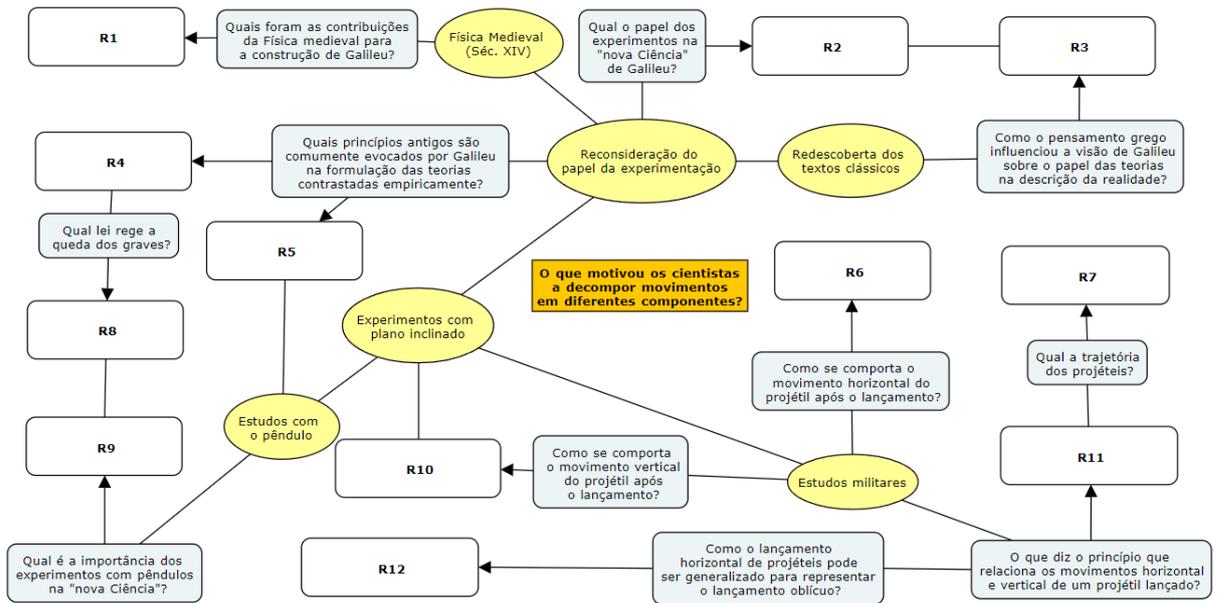
Antiperistasis – Diagrama Completo



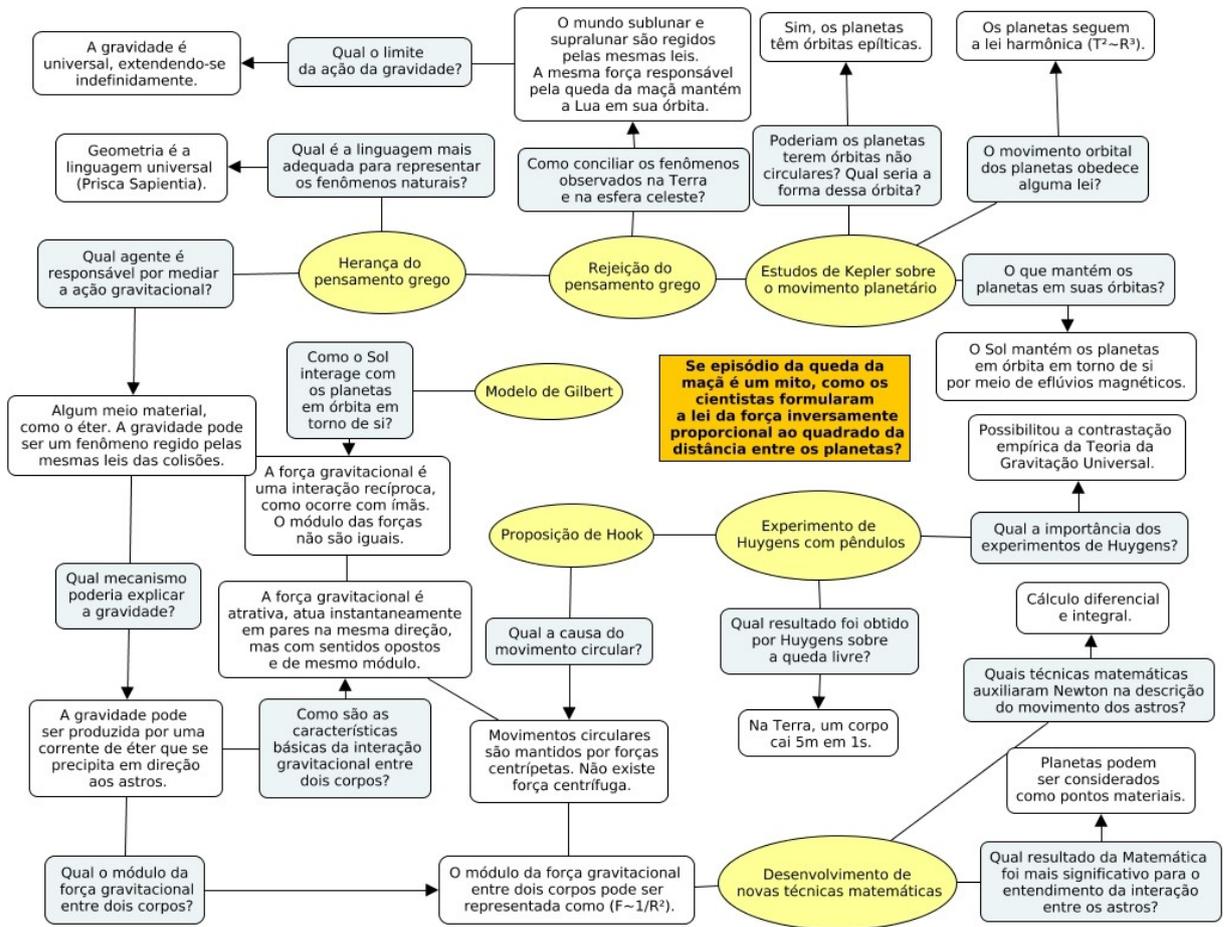
Antiperistasis – Diagrama Semipreenchido



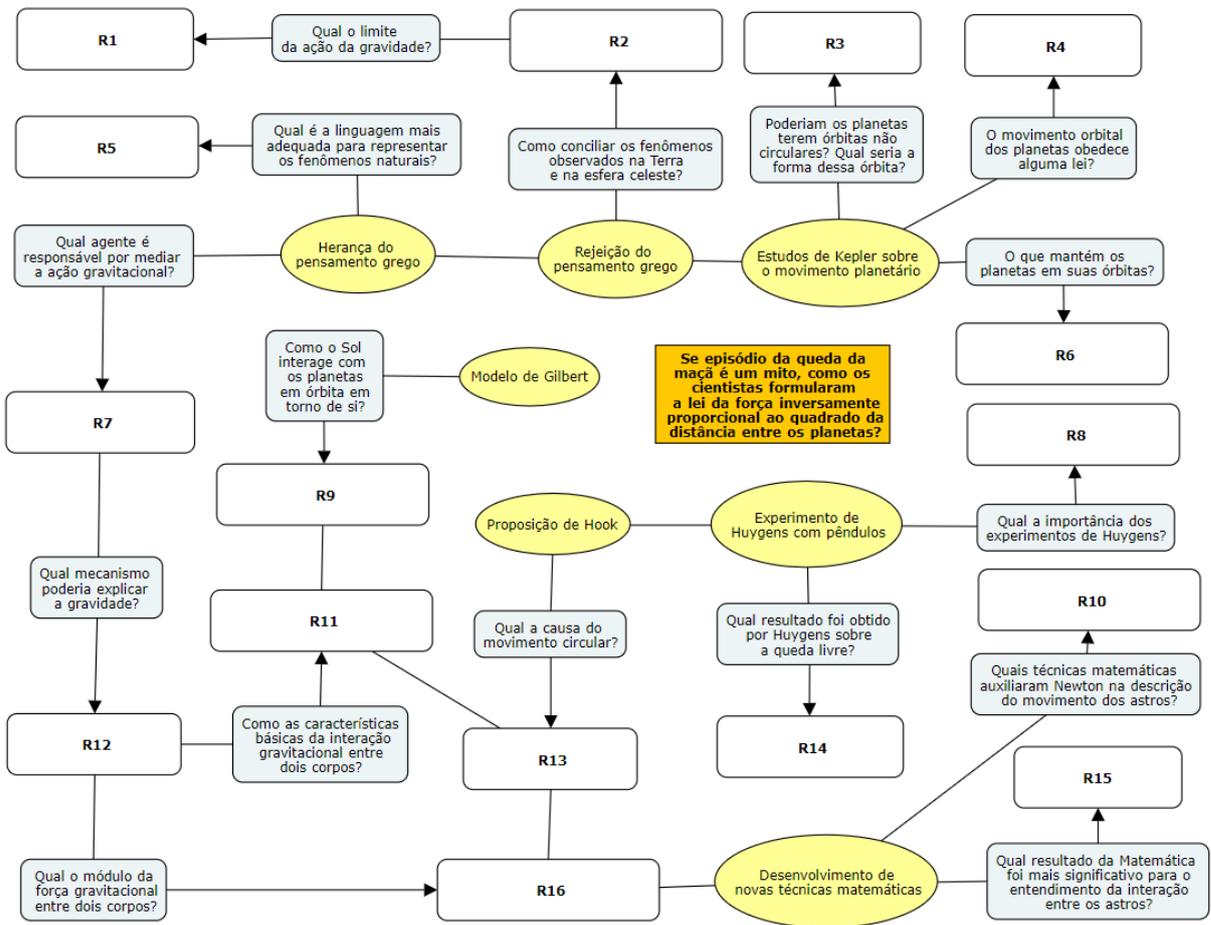
Queda dos Graves – Diagrama Semipreenchido



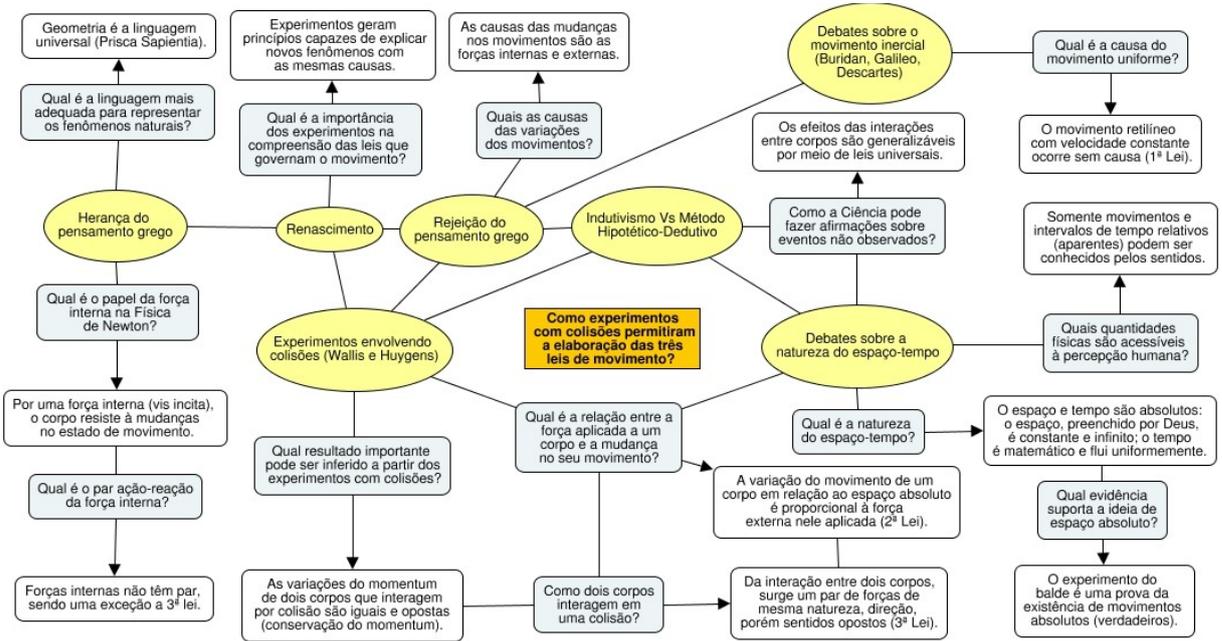
Teoria da Gravitação Universal – Diagrama Completo



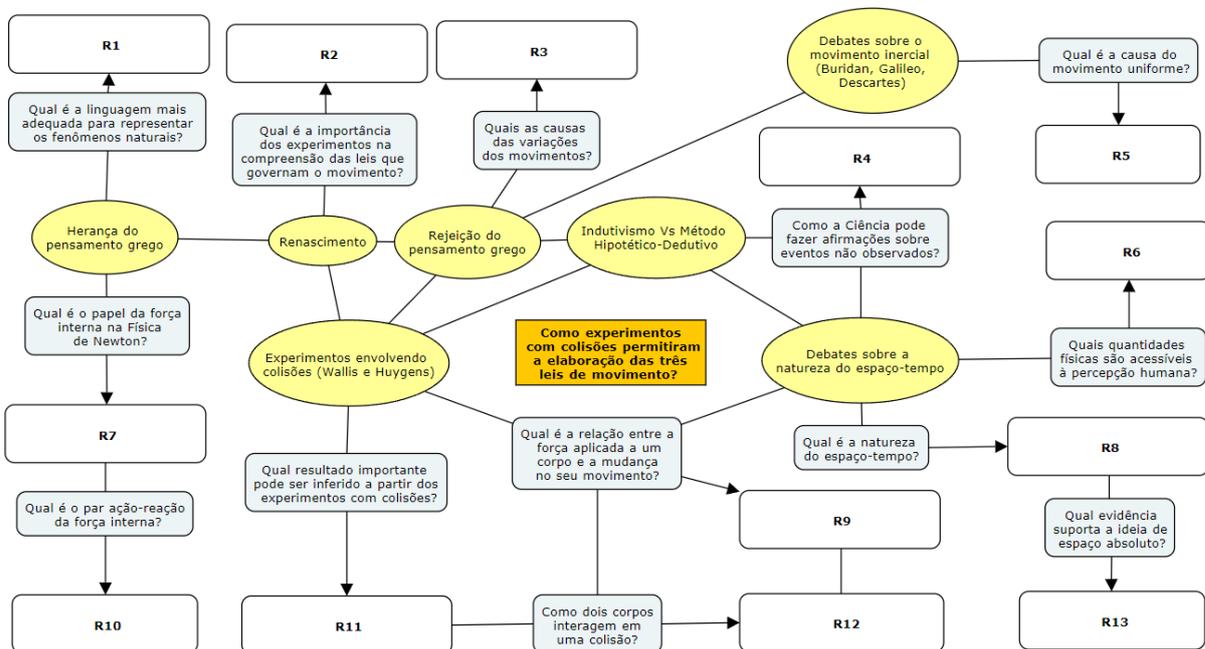
Teoria da Gravitação Universal – Diagrama Semipreenchido



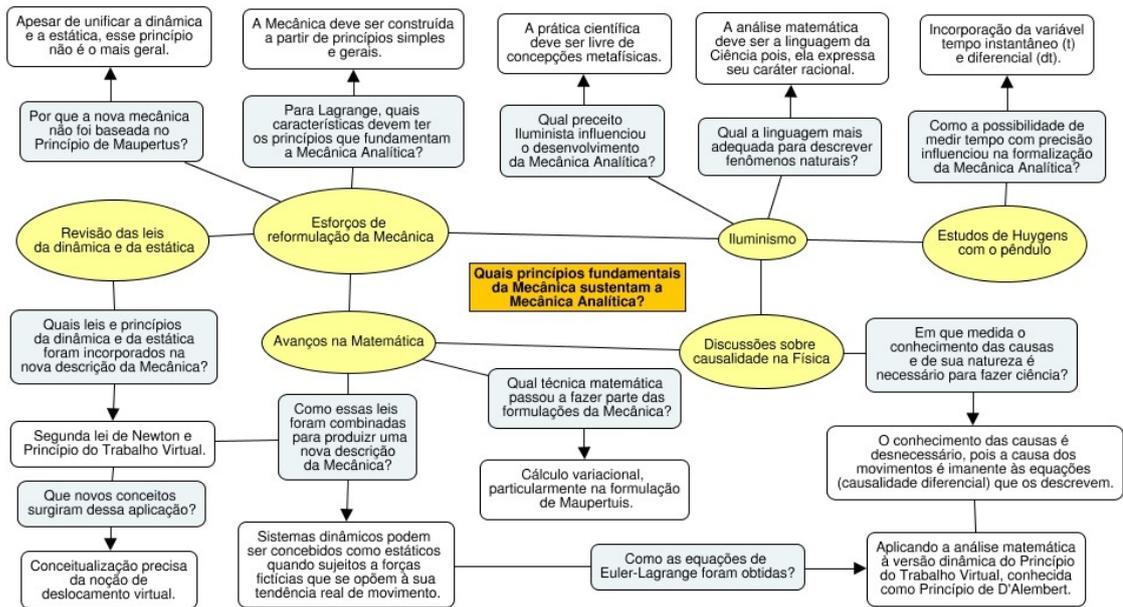
Leis de Newton – Diagrama Completo



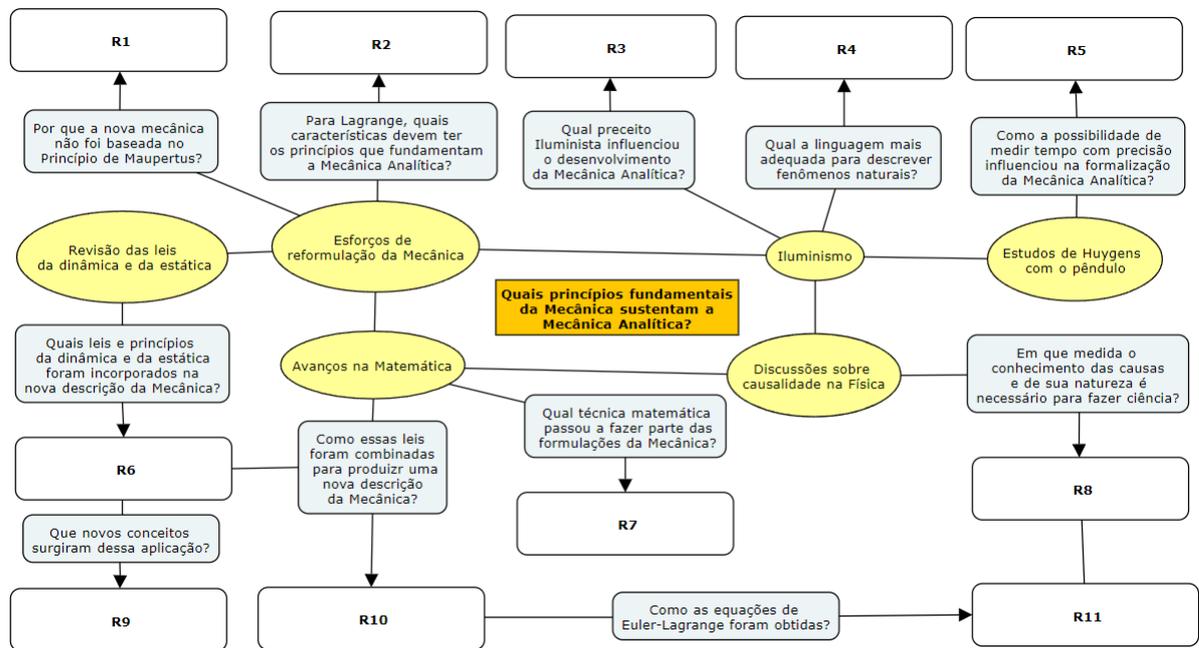
Leis de Newton – Diagrama Semipreenchido



Equações de Euler – Lagrange – Diagrama Completo



Equações de Euler – Lagrange – Diagrama Completo



Apêndice G - Tabelas para a construção das tarefas (Estudo 3)

Antiperistasis

Tipo de tarefa	Questões	Tarefa
Questionar concepções epistemológicas		
Explorar implicações ontológicas da negação do vácuo		
Analisar teorias cosmológicas		
Comparar fenômenos celestes com terrenos		
Especular sobre possíveis causas de diferentes movimentos		
Analisar movimentos quantitativamente		
Analisar o equilíbrio quantitativamente		
Descrever o lançamento de projéteis		

Queda dos Graves

Tipo de tarefa	Questões	Tarefa
Questionar concepções epistemológicas		
Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento		
Compreender as nuances relacionadas à medida do tempo e sua utilização na Física		
Estudar o movimento de queda livre		
Discutir o papel das idealizações na construção de teorias		
Estudar o movimento de projéteis		

Gravitação Universal

Tipo de tarefa	Questões	Tarefa
Questionar concepções epistemológicas		
Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico		
Evidenciar a natureza hipotética do conhecimento		
Discutir o papel das idealizações na construção de teorias		
Avaliar o efeito das forças centrípetas		
Avaliar o efeito das forças gravitacionais		

Leis de Newton

Tipo de tarefa	Questões	Tarefa
Questionar concepções epistemológicas		
Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico		
Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio da conservação do movimento		
Discutir a causalidade na Física		
Problematizar a noção de espaço e tempo absolutos.		
Avaliar o efeito da interação entre corpos por meio do conceito de força		

Equações de Euler-Lagrange

Tipo de tarefa	Questões	Tarefa
Questionar concepções epistemológicas		
Evidenciar elementos do processo de construção do conhecimento científico		
Considerar sistemas sujeitos a vínculos holônomos		
Discutir a causalidade na Física		
Resolver problemas de extremização de funcionais		
Estudar sistemas dinâmicos por meio do Princípio do Trabalho Virtual		