



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA**

RICARDO ROBINSON CAMPOMANES SANTANA

**ANÁLISE FILOSÓFICA DE MODELOS NA FÍSICA:
UM DIÁLOGO ENTRE BUNGE E LAKATOS**

**CUIABÁ - MT
2026**

RICARDO ROBINSON CAMPOMANES SANTANA

**ANÁLISE FILOSÓFICA DE MODELOS NA FÍSICA:
UM DIÁLOGO ENTRE BUNGE E LAKATOS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Filosofia do Instituto de Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Paulo Da Cas Cichoski.

**CUIABÁ-MT
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S232a Santana, Ricardo Robinson Campomanes.

Análise filosófica de modelos na física [recurso eletrônico] : Um diálogo entre Bunge e Lakatos / Ricardo Robinson Campomanes Santana. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 87 f., il. color., pdf). -- 2026.

Orientador: Luiz Paulo da Cas Cichoski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Programa de Pós-Graduação em Filosofia, Cuiabá, 2026.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. modelos científicos. 2. prática científica. 3. física. 4. Mario Bunge. 5. Imre Lakatos. I. Cichoski, Luiz Paulo da Cas, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise Filosófica de modelos na física: um diálogo entre Bunge e Lakatos

AUTOR (A): MESTRANDO : Ricardo Robinson Campomanes Santana

Dissertação defendida e aprovada em 26 de FEVEREIRO de 2026.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Paulo Da Cas Cichoski (Presidente/Orientador - UFMT)
Prof. Dr. Maurício Fernando Bozatski (Examinador Interno - UFMT)
Prof. Dr. Rogério Passos Severo (Examinador Externo - UFRGS)
Prof. Dr. Breno Ricardo Guimarães Santos (Suplente - UFMT)

CUIABÁ, 26/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ PAULO DA CAS CICHOSKI**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 27/02/2026, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Passos Severo**, **Usuário Externo**, em 01/03/2026, às 06:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO FERNANDO BOZATSKI**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/03/2026, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Robinson Campomanes Santana**, Usuário **Externo**, em 10/03/2026, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **8951026** e o código CRC **C73F9A23**.

Referência: Processo nº 23108.005398/2026-15

SEI nº 8951026

Dedico este trabalho à minha mãe, Elizabeth, que despertou em mim o amor pelo conhecimento; à minha esposa, Rosângela, pelo apoio constante; e ao meu filho de coração, Victor, pela leveza e alegria que sempre traz.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus comum, fonte de inspiração e sentido em minha vida.

À minha mãe, Elizabeth, por ter me ensinado desde a infância o amor pelo conhecimento; à minha esposa, Rosângela, pelo apoio constante, carinho e presença harmoniosa; e ao meu filho de coração, Victor, pela jovialidade e pelas conversas cotidianas sempre alegres e instigantes sobre música, futebol, política e tantos outros temas.

Ao professor Luiz, pela amizade, dedicação e orientação atenciosa, fundamentais para a realização deste trabalho.

Às amigas e colegas de Filosofia Adriana e Simone, também orientandas do professor Luiz, pela parceria intelectual, pelas discussões produtivas e pelos momentos descontraídos de estudo e convivência.

Aos amigos Jackson e João Paulo, pela companhia constante e pelas boas conversas partilhadas nos intervalos para o café.

À secretária da pós-graduação Jussara, pela amizade, pela atenção sempre prestativa e pelo apoio nas questões administrativas e acadêmicas.

E, finalmente, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, o meu sincero agradecimento

Nenhuma grande descoberta foi feita sem um palpite ousado.

(Newton, 1704)

RESUMO

Esta dissertação analisa, sob uma perspectiva filosófica, a prática científica na Física a partir dos modelos científicos. Para isso, coloca em diálogo a concepção de modelos proposta por Mario Bunge com a Metodologia dos Programas de Investigação Científica (MPIC) de Imre Lakatos, buscando compreender tanto a estrutura epistemológica dos modelos quanto sua dinâmica histórica no interior da ciência. Inicialmente, são abordadas as concepções de ciência desses autores, destacando seus compromissos com o realismo científico, a racionalidade, a objetividade e a falibilidade do conhecimento. Em Bunge, enfatiza-se a distinção entre teoria geral, modelo teórico e objeto-modelo, segundo a qual os modelos desempenham um papel mediador essencial entre abstrações teóricas e sistemas reais, sendo centrais para a explicação e a testagem empírica dos fenômenos. Em seguida, propõe-se uma interpretação do papel dos modelos na MPIC de Lakatos. Embora Lakatos não tenha formulado explicitamente uma teoria dos modelos, argumenta-se que eles exercem função estratégica na heurística positiva dos programas de investigação, orientando a formulação de hipóteses, a resposta a anomalias e o desenvolvimento progressivo do conhecimento científico. Essa interpretação é ilustrada por meio da análise do programa gravitacional newtoniano e da discussão sobre modelos iniciais e aprimoramento teórico. O arcabouço conceitual desenvolvido é então aplicado a estudos de caso da Física, em particular aos modelos da mola helicoidal e do escoamento de fluidos. Esses casos evidenciam um processo de amadurecimento epistemológico caracterizado pela transição de modelos predominantemente descritivos para modelos mais estruturados, capazes de incorporar mecanismos internos relevantes e ampliar o poder explicativo dos modelos. Além disso, a MPIC é empregada para interpretar o conjunto articulado de modelos associados ao estudo das molas — o grupo-modelo de molas — como um programa de investigação científica, indicando que práticas consolidadas da chamada ciência normal também podem ser analisadas de modo frutífero em termos lakatosianos. Por fim, discutem-se as implicações epistemológicas e educacionais desses resultados, defendendo que a explicitação do papel dos modelos favorece uma compreensão mais crítica da ciência e aproxima o ensino de Física da prática científica efetiva.

Palavras-chave: Modelos científicos, Prática Científica, Física, Mario Bunge, Imre Lakatos.

ABSTRACT

This dissertation analyzes, from a philosophical perspective, scientific practice in Physics through the lens of scientific models. To this end, it brings into dialogue the conception of models proposed by Mario Bunge with Imre Lakatos's Methodology of Scientific Research Programmes (MSRP), seeking to understand both the epistemological structure of models and their historical dynamics within science. Initially, the conceptions of science advanced by these authors are examined, highlighting their commitments to scientific realism, rationality, objectivity, and the fallibility of knowledge. In Bunge's framework, emphasis is placed on the distinction between general theory, theoretical model, and model object, according to which models play an essential mediating role between theoretical abstractions and real systems, being central to explanation and empirical testing of phenomena. Next, an interpretation of the role of models within Lakatos's MSRP is proposed. Although Lakatos did not explicitly formulate a theory of models, it is argued that models perform a strategic function within the positive heuristic of research programmes, guiding the formulation of hypotheses, responses to anomalies, and the progressive development of scientific knowledge. This interpretation is illustrated through an analysis of the Newtonian gravitational programme and a discussion of initial models and theoretical refinement. The conceptual framework thus developed is then applied to case studies in Physics, particularly the models of the helical spring and fluid flow. These cases reveal a process of epistemological maturation characterized by a transition from predominantly descriptive models to more structured ones, capable of incorporating relevant internal mechanisms and enhancing the explanatory power of models. In addition, the MSRP is employed to interpret the articulated set of models associated with the study of springs—the spring group-model—as a scientific research programme, indicating that established practices of so-called normal science can also be fruitfully analyzed in Lakatosian terms. Finally, the epistemological and educational implications of these results are discussed, arguing that making the role of models explicit fosters a more critical understanding of science and brings the teaching of Physics closer to actual scientific practice.

Keywords: Scientific models, Scientific practice, Physics, Mario Bunge, Imre Lakatos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. CONCEPÇÃO DE CIÊNCIA DE BUNGE E DE LAKATOS	19
2.1 Concepção de ciência de Mario Bunge	19
2.1.1 <i>O realismo científico de Bunge</i>	21
2.1.2 <i>O método científico segundo Bunge</i>	24
2.1.3 <i>Concepção de teoria científica segundo Bunge</i>	26
2.1.3.1 <i>Teoria de Caixa Negra</i>	27
2.1.3.2 <i>Teorias Representacionais ou de Caixa Translúcida</i>	28
2.1.4 <i>Maturação da ciência segundo Bunge</i>	29
2.2 Concepção de ciência de Imre Lakatos	33
2.2.1 <i>Programas de investigação científica: breve introdução</i>	33
2.2.2 <i>Popper e Kuhn: críticas e influências na Metodologia dos Programas de Investigação Científica</i>	34
2.2.3 <i>Racionalidade científica e historicidade</i>	35
2.2.4 <i>Contra o formalismo na matemática: racionalidade e descoberta</i>	36
3. CONCEPÇÃO DE MODELOS DE BUNGE E DE LAKATOS	37
3.1 Modelo teórico segundo Bunge	38
3.1.1 <i>Concepção de modelo teórico</i>	38
3.1.2 <i>Processo de elaboração de modelo teórico</i>	40
3.2 O papel dos modelos na Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Lakatos	43
3.2.1 <i>Metodologia dos Programas de Investigação Científica</i>	43
3.2.2 <i>O papel dos modelos na heurística positiva</i>	47
3.2.3 <i>Exemplo histórico do papel dos modelos no interior da MPIC: o programa newtoniano</i>	48
3.2.4 <i>Modelos ingênuos e amadurecimento teórico</i>	49
3.3 Modelos em Bunge e na MPIC de Lakatos: aproximações e diferenças	50
3.3.1 <i>Semelhanças e Diferenças</i>	50
3.3.1.1 <i>Semelhanças</i>	50
3.3.1.2 <i>Diferenças</i>	51
3.3.2 <i>Implicações epistemológicas</i>	53
4. APLICAÇÕES DA DISCUSSÃO DE MODELOS DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA NA FÍSICA	55
4.1 A Transição do modelo de caixa negra para o modelo de caixa translúcida na Física indica amadurecimento científico?	56
4.1.1 <i>Modelos de caixa negra e modelos de caixa translúcida segundo de Bunge</i>	57
4.1.2 <i>A aplicação da noção bungeana de modelo</i>	58
4.1.2.1 <i>Transição do modelo teórico de uma mola helicoidal</i>	58
4.1.2.2 <i>Transição no escoamento de água: do modelo não dissipativo ao dissipativo</i>	61
4.1.3 <i>Evolução de Modelos e amadurecimento científico</i>	68

4.1.4 Importância epistemológica dos modelos da mola helicoidal e do escoamento de água	70
4.1.5 Contribuições dos estudos de caso para o ensino de Física	72
4.2 Grupo-modelo de molas como programa de investigação científica	75
4.2.1 Núcleo Firme	77
4.2.2 Cinturão Protetor	78
4.2.3. Heurísticas positivas e negativas	79
4.2.4 Avaliação do Programa: Progressivo ou Degenerativo?	80
4.2.5 Importância epistemológica do grupo-modelo de molas e implicações para o ensino de Física	80
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS	86

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação defende a tese que o desenvolvimento progressivo dos modelos científicos constitui um indicador fundamental do amadurecimento científico e um princípio epistemológico estruturante para o ensino de Física. Na perspectiva de Mario Bunge, esse progresso manifesta-se pela transição de modelos meramente descritivos para representações que explicitam mecanismos explicativos e se integram mais profundamente à teoria. Já na perspectiva de Imre Lakatos, os modelos desempenham um papel estratégico no interior dos programas de investigação científica, evoluindo no cinturão protetor sem comprometer o núcleo firme teórico, o que permite ampliar o alcance empírico e explicativo da teoria. Exemplos como o desenvolvimento dos modelos no programa gravitacional newtoniano mostram que o avanço científico ocorre por meio do refinamento progressivo dos modelos. No ensino, essa compreensão permite apresentar a Física como uma prática racional, histórica e explicativa, e não como um conjunto estático de fórmulas. É com base nessa tese — de que o progresso científico e sua compreensão pedagógica dependem do desenvolvimento e da análise filosófica dos modelos — que se estrutura o presente trabalho.

O presente trabalho tem como objetivo analisar, sob uma perspectiva filosófica, a prática científica na Física a partir dos modelos científicos. Para isso, propõe-se inicialmente uma interpretação do papel dos modelos na Metodologia dos Programas de Investigação Científica (MPIC) de Imre Lakatos (1978), buscando reconstruir como eles operam no interior dos programas de investigação, mesmo na ausência de uma teoria explícita dos modelos por parte do autor. Em seguida, essa interpretação é colocada em diálogo com a concepção de modelo desenvolvida por Mario Bunge (1973, 1974), segundo a qual o modelo atua como mediador entre teorias gerais e sistemas reais¹. À luz dessa concepção, analisam-se dois estudos de caso na Física — o modelo da mola helicoidal e o modelo do escoamento de fluido — com o intuito de mostrar como a passagem de modelos de caixa negra para modelos de caixa translúcida pode ser compreendida como um indicador de amadurecimento científico. Por fim, com base na MPIC, analisa-se um conjunto de modelos associados ao estudo das molas, oriundos de

¹ Evidentemente, as concepções de Bunge e Lakatos representam abordagens específicas no interior do amplo campo da filosofia da ciência e não esgotam a diversidade de interpretações existentes acerca do papel dos modelos científicos. A comparação aqui proposta não pretende oferecer uma visão exaustiva, mas explorar um terreno conceitual compartilhado que se mostra particularmente fértil para a análise da relação entre teoria, modelo e prática científica, bem como para a reflexão sobre o ensino de Física.

pesquisas na Física e nas Engenharias, interpretando-o como um programa de investigação científica.

A reflexão filosófica sobre a ciência tem destacado que o conhecimento científico não se constrói por uma relação direta entre teoria e realidade. Entre essas instâncias intermedeiam-se representações, idealizações e estruturas conceituais que tornam os fenômenos inteligíveis, previsíveis e, em certos casos, controláveis. Nesse contexto, os modelos científicos ocupam um lugar central na prática efetiva da ciência, especialmente nas ciências físicas, ao mediar teorias abstratas e sistemas concretos investigados empiricamente.

Apesar dessa centralidade, o estatuto epistemológico dos modelos nem sempre foi tratado de modo sistemático na filosofia da ciência do século XX, tradicionalmente mais voltada às teorias como unidades fundamentais do conhecimento científico. Apenas progressivamente passou-se a reconhecer que a atividade científica cotidiana se organiza em torno da construção, do uso, do ajuste e da substituição de modelos, tornando necessário compreender como eles se relacionam com as teorias e como evoluem ao longo do tempo.

Entre os autores que contribuíram para essa discussão, destaca-se Mario Bunge², que elaborou uma concepção explícita e sistemática dos modelos científicos, articulando noções como objeto-modelo, modelo teórico e teoria geral. Para Bunge³, os modelos são construções hipotético-dedutivas integradas a teorias gerais e desempenham papel indispensável na explicação e na testagem empírica. Já Imre Lakatos⁴, buscou compreender a dinâmica do desenvolvimento científico, não a partir de teorias isoladas, mas de programas de investigação científica que se desenvolvem ao longo do tempo, interagindo com outros programas concorrentes. Nesse enquadramento, os modelos assumem um papel estratégico na heurística positiva, compondo sucessões de representações que orientam o avanço teórico e empírico.

² Mario Bunge (1919–2020) nasceu na Argentina e doutorou-se em Ciências Físico-Matemáticas em 1952 pela Universidade Nacional de La Plata, sob orientação de Guido Beck. Entre 1956 e 1966, atuou como professor de Física Teórica e Filosofia na Universidade de Buenos Aires. A partir de 1966, passou a lecionar Lógica e Metafísica na Universidade McGill, em Montreal, onde consolidou sua projeção internacional como um dos principais filósofos da ciência latino-americanos (Bunge, 2017). Autor de mais de 80 livros e cerca de 500 artigos, abordando temas da física teórica, métodos científicos, modelos teóricos e a relação entre teoria e realidade.

³ A escolha de Mario Bunge decorre de pesquisa desenvolvida desde o pós-doutorado em Ensino de Física na UFRGS (2018-2019), quando se passou a adotar sistematicamente sua concepção de modelos científicos. Tal perspectiva fundamentou publicações posteriores, em colaboração com o Prof. Heidemann, articulando modelagem científica, epistemologia e ensino de Física.

⁴ Filósofo húngaro (1922-1974), doutorou-se em filosofia em 1961 na Universidade de Cambridge. Foi discípulo de Popper entre os anos de 1960 e 1969, cuja influência foi fundamental para o desenvolvimento de sua *MPIC*. Durante esse período, ele trabalhou como pesquisador na *London School of Economics*.

Esta dissertação parte da hipótese de que uma leitura articulada das concepções de Bunge e Lakatos permite esclarecer o papel epistemológico dos modelos científicos e compreender, de modo mais preciso, como ocorre o amadurecimento do conhecimento na Física. Defende-se que a transição de modelos descritivos para modelos mais desenvolvidos, de tipo caixa translúcida, constitui um indicador relevante desse amadurecimento, ao incorporar mecanismos explicativos, entidades não diretamente observáveis e maior articulação teórica.

Além de sua relevância filosófica, essa discussão possui implicações importantes para o ensino de Física. Frequentemente, os modelos são apresentados no contexto educacional como aplicações diretas de leis estabelecidas ou como simplificações instrumentais, o que tende a obscurecer a dinâmica da prática científica. Ao explicitar o papel dos modelos na construção do conhecimento, torna-se possível aproximar o ensino da Física da lógica efetiva da investigação científica, favorecendo uma compreensão mais crítica, reflexiva e epistemologicamente fundamentada da ciência.

A dissertação organiza-se da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta as concepções de ciência de Mario Bunge e de Imre Lakatos, estabelecendo o quadro conceitual que orienta as análises subsequentes. O Capítulo 3 dedica-se à reconstrução e à comparação das concepções de modelo em Bunge e ao papel dos modelos na MPIC de Lakatos. O Capítulo 4 aplica esse arcabouço teórico à análise de estudos de caso da Física e à interpretação de um grupo-modelo de molas como programa de investigação científica. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais, retomando os principais resultados do trabalho.

Justificativa

O autor⁵ do trabalho é físico de formação, com mestrado e doutorado em Física realizado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Ao longo da minha trajetória acadêmica, atuei em pesquisa em Física, com ênfase em ciências dos materiais. Nessa formação, usava os modelos teóricos como ferramentas consolidadas, sem que houvesse, uma reflexão filosófica mais sistemática sobre seu papel epistemológico.

Esse quadro começou a se modificar durante o estágio de pós-doutorado em Ensino de Física realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), entre 2018 e 2019. Nesse período, ao cursar como aluno ouvinte as disciplinas “História e Epistemologia da Ciência” e “Filosofia da Ciência”, surgiu o interesse pela reflexão filosófica sobre a prática científica. O contato com autores da Filosofia da Ciência, em especial Mario Bunge, foi decisivo. A leitura de *Teoria e Realidade* (1974) contribuiu para repensar o papel dos modelos científicos como mediadores entre teorias gerais e sistemas reais, reflexão que resultou na publicação do artigo “Modelo de associação de molas em paralelo em atividades de ensino de Física: uma análise do domínio de validade” (Campomanes et al., 2020).

A partir desse momento, passei a desenvolver de forma mais sistemática estudos sobre modelos científicos aplicados ao ensino superior, linha de investigação que se consolidou por meio de colaborações acadêmicas posteriores. Em agosto de 2023, o ingresso no Programa de Mestrado em Filosofia da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) representou um novo desafio intelectual. Embora exigente, essa experiência tem sido enriquecedora, ampliando minha capacidade crítica e aprofundando minha compreensão epistemológica dos modelos.

No âmbito profissional, o mestrado tem contribuído diretamente para minha atuação no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECM), no qual pretendo propor a criação da disciplina “Introdução à Filosofia da Ciência” e dar continuidade às investigações sobre a articulação entre modelos, epistemologia e ensino. Considerando que muitos discentes são professores da Educação Básica, essa formação mostra-se especialmente relevante para promover uma compreensão crítica da ciência e enfrentar desafios contemporâneos, como o negacionismo científico.

⁵ É professor da UFMT, integra desde 2019, o Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências da Natureza e Matemática, desenvolvendo pesquisas em Ensino por Investigação e Modelagem Científica no ensino de Física.

2. CONCEPÇÃO DE CIÊNCIA DE BUNGE E DE LAKATOS

Neste capítulo estudaremos a visão de ciência de Bunge e Lakatos. Na concepção de ciência de Bunge estudaremos o realismo científico, o método científico, a concepção de teoria científica e o amadurecimento das teorias. Pela perspectiva de Lakatos, serão analisados, sucintamente, sua Metodologia dos Programas de Investigação Científica, as críticas dirigidas tanto ao falsificacionismo de Karl Popper quanto ao convencionalismo de Thomas Kuhn, como as influências recebidas por esses filósofos. Serão apresentados uma exposição concisa sobre a racionalidade, a historicidade e a crítica ao formalismo na matemática.

2.1 Concepção de ciência de Mario Bunge

A concepção de ciência formulada por Mario Bunge se apoia em três pilares centrais que serão explicados neste capítulo: realismo científico, método científico e estrutura das teorias. Esses pilares não apenas estruturam sua visão epistemológica, como também orientam sua concepção de modelo, assunto principal deste trabalho. Bunge (1972) define a ciência como um corpo crescente de ideias construídas racionalmente, voltado à compreensão do mundo. Trata-se de um conhecimento racional, sistemático, preciso, verificável e, ao mesmo tempo, falível. Esse conhecimento possibilita representar conceitualmente a realidade e intervir nela de forma mais segura e eficiente.

Ele distingue dois grandes grupos: (i) ciências formais e (ii) ciências factuais.

- (i) *As ciências formais*: como a lógica e a matemática, estudam estruturas e relações abstratas que não dependem de observação empírica. Trabalham com entidades ideais, construídas pela mente humana, e validam seus teoremas por dedução a partir de axiomas, não por comparação com fatos.
- (ii) *As ciências factuais*: estudam fenômenos naturais e sociais, formulando hipóteses e teorias que precisam ser verificadas empiricamente. A lógica é necessária, mas insuficiente: somente a observação e a experimentação podem confirmar, ainda que provisoriamente, a adequação das explicações sobre fatos e processos do mundo real. Exemplos de ciências factuais, naturais, são a física, química e biologia, que

estudam a natureza e suas leis; e sociais, como a sociologia, economia e psicologia, que analisam o comportamento humano e suas interações.

Segundo Bunge, "As proposições factuais não analíticas — isto é, as afirmações referentes a fatos, mas que não podem ser decididas apenas com a ajuda da lógica — precisam concordar com os dados empíricos ou ajustar-se a eles." (1972, p.34), ou seja, existem proposições sobre o mundo que não podem ser verificadas apenas por raciocínio lógico. A lógica e a matemática são consideradas formais porque não tratam de coisas ou processos reais, mas de formas abstratas. Ainda assim, tais formas podem receber diferentes interpretações e funcionar como moldes para representar conteúdos factuais. Bunge (1972, p. 7) ilustra essa ideia afirmando que “os números não existem fora de nossos cérebros, e mesmo lá existem em um nível conceitual, não fisiológico”, e acrescenta que alguns objetos materiais podem ser contados, mas não são números, nem suas propriedades correspondem a números puramente abstratos. Ele enfatiza: “No mundo real, encontramos 3 livros; no mundo da ficção construímos 3 discos voadores. Mas quem já viu um 3, um simples 3?” (1972, p.7).

Por essa razão, ciências como física, química, fisiologia ou economia recorrem constantemente à matemática para reconstruir, com maior precisão, as relações complexas entre os fatos. Nessas áreas, não se confundem objetos formais com objetos reais; ao contrário, interpreta-se o formal à luz da experiência. Assim, embora as ciências formais não descrevam diretamente o mundo, elas se tornam indispensáveis às ciências empíricas ao oferecer estruturas conceituais que, por meio de regras de correspondência, permitem formalizar e compreender afirmações empíricas.

Com base nessa distinção entre formas lógicas e conteúdos factuais, Bunge (1972) enfatiza que, nas ciências factuais: a coerência lógica é necessária, mas não suficiente para a validade do conhecimento. Para declarar afirmações sobre o mundo exigem confronto com dados empíricos — isto é, com observações e experimentos — para serem consideradas plausíveis. No entanto, a experiência não garante que a hipótese seja a única válida — apenas que é plausível, podendo futuras investigações oferecer explicações conceituais mais precisas. Ou seja, Bunge nos indica que o conhecimento é provisório: mesmo quando uma hipótese parece adequada com base na experiência, ela não é definitiva ou absoluta. E que a ciência está sempre tentando melhorar suas descrições e explicações do mundo, sabendo que elas são por natureza, imperfeitas e sujeitas a revisão. Bunge acrescenta (1972, p. 9): “As ciências formais demonstram ou provam: as ciências factuais verificam (confirmam ou desconfirmam) hipóteses

que são em sua maioria provisórias. A demonstração está completa e final; A verificação está incompleta e, portanto, temporária.”

Segundo Bunge (1972), o conhecimento produzido pelas ciências naturais e sociais possui duas características essenciais: racionalidade e objetividade. Esses elementos definem o modo como a ciência constrói e valida seu entendimento sobre o mundo.

- i) O conhecimento científico é racional porque se apoia em conceitos, proposições e inferências lógicas, e não em percepções isoladas. Embora o cientista observe, imagine e manipule objetos, seu trabalho começa e termina em ideias. Tais ideias são articuladas por regras lógicas que permitem produzir novas conclusões e expandir a compreensão. Além disso, não se acumulam de forma dispersa: organizam-se em teorias, isto é, sistemas ordenados de proposições.
- ii) A objetividade significa que o conhecimento busca corresponder à realidade e avaliar suas hipóteses por meio de observações e experimentos controláveis. Esse contato sistemático com os fatos pode ser verificável e, em parte, reproduzível, garantindo que as ideias sejam confrontadas com a realidade antes de serem aceitas como adequadas.

Para Bunge (1972), a racionalidade e a objetividade são características que não podem ser separadas no trabalho científico. A racionalidade aparece quando o cientista deduz consequências lógicas de suas hipóteses; a objetividade se manifesta quando essas consequências são submetidas a testes experimentais. Assim, ciência não é apenas observar, nem apenas raciocinar: é integrar raciocínio rigoroso com testes empíricos controlados. Essa combinação é o que define o modo particular de produzir conhecimento científico. Assim, por exemplo, o que geralmente se verifica por meio do experimento é alguma consequência — extraída por via dedutiva — de alguma hipótese. Outro exemplo: o cálculo não apenas segue a observação, mas também é sempre indispensável para planejá-la e registrá-la.

2.1.1 O realismo científico de Bunge

Em “*Racionalidad y Realismo*” (1985), Bunge inicia sua análise distinguindo os diferentes sentidos do termo “realismo” e defendendo uma posição explicitamente realista contra as diversas formas de antirrealismo contemporâneo. Para o autor, o debate não é meramente terminológico, mas envolve uma questão central na filosofia: saber se o mundo

existe independentemente de nossas representações e se pode ser conhecido por meio de investigação racional e científica. Ao assumir uma postura realista, Bunge sustenta que a ciência moderna pressupõe tanto a existência objetiva da realidade quanto a possibilidade de conhecê-la progressivamente, ainda que de modo parcial e falível.

O termo “realismo” apresenta diversos significados na tradição filosofia, e o mesmo ocorre na filosofia da ciência. Bunge concentra-se no chamado Realismo Gnosiológico como a “doutrina filosófica que sustenta que o mundo existe por si mesmo e que o ser humano pode conhecê-lo, mesmo que apenas em parte e aos poucos” (1985, p. 42, tradução nossa). Esse tipo de realismo difere do realismo metafísico, de origem platônica, que sustenta que ideias ou entidades gerais (como número ou justiça) possuem existência própria, independentemente de nossos cérebros. Bunge rejeita essa ideia: para ele, tais entidades não existem como realidades separadas, mas como construções conceituais úteis produzidas pelo pensamento humano.

Segundo Bunge (1985, p. 43, tradução nossa), há três variedades de Realismo Gnosiológico: ingênuo, crítico e científico.

- i) O realismo ingênuo sustenta que “o mundo é exatamente como aparenta ser: que o Sol tem o tamanho de uma moeda, que os sólidos são maciços, que tudo o que existe é perceptível, etc.” (Bunge, 1985, p.43, tradução nossa)
- ii) O realismo crítico “sustenta que o mundo real às vezes difere do que aparenta ser: como algumas aparências enganam, não podemos aceitar dogmaticamente os dados dos sentidos” (Bunge, 1985, p.43, tradução nossa). Diferentemente do empirista, que confia apenas na experiência, o realista crítico confia na capacidade da razão para representar tanto o que é perceptível quanto o que é imperceptível.
- iii) O realismo científico é “a variedade do realismo crítico segundo a qual a ciência proporciona o melhor conhecimento da realidade, ainda que seja imperfeito. Essa tese pode ser chamada de cientificismo: a tese da supremacia da ciência sobre todos os outros tipos de conhecimento” (Bunge, 1985, p.45, tradução nossa). Segundo o realismo científico, a experiência e a razão, longe de se bastarem por si mesmas na tentativa de conhecer a realidade, necessitam uma da outra. A referência de razão dessa gnoseologia é a teoria científica dotada de formalismo matemático, e sua referência de experiência é o experimento projetado, controlado e interpretado com o auxílio de teorias científicas. O realista científico não reconhece dogmas: mais do que crítico, é supercrítico.

Bunge (1985) explica que o realismo científico não se limita a afirmar que podemos conhecer o mundo (aspecto gnosiológico). Ele também afirma como o mundo é (aspecto ontológico). Ele assume a ontologia típica da ciência moderna, segundo a qual a realidade é composta apenas por entidades concretas — objetos materiais, sistemas físicos, seres vivos, campos, estruturas sociais — todas elas mutáveis e regidas por leis. Ou seja, não há espaço para entidades sobrenaturais ou imateriais: tudo o que existe pertence ao domínio do natural e é, em princípio, investigável pela ciência.

A seguir no Quadro 1, a exemplo feito por Brandão (2012), apresentamos alguns princípios descritivos do realismo científico de Bunge (1985, p. 45).

Quadro 1 – Princípios descritivos e normativos do realismo científico de Bunge.

Princípios Descritivos			
D1	O mundo existe em si (por si mesmo), isto é, existam ou não sujeitos cognoscentes.	D2	Podemos chegar a conhecer o mundo, ainda que apenas em parte, de forma imperfeita e gradualmente.
D3	O conhecimento é aprendizado, e o conhecimento de um indivíduo consiste na totalidade do que ele aprendeu.	D4	Todas as faculdades cognitivas se desenvolvem ao longo da vida e são resultado de um longo processo evolutivo.
D5	Os seres humanos podem conhecer apenas objetos de duas classes: entes materiais e objetos conceituais (construtos), ou seja, conceitos, proposições e sistemas destas (teorias).	D6	Alguns construtos derivam de preceitos, enquanto outros são inventados.
D7	Dado um sistema ⁶ qualquer que possa ser conectado por sinais a um pesquisador, este pode conhecer alguns dos componentes do sistema, algumas das coisas presentes em seu entorno e algumas das relações incluídas na estrutura do sistema ⁷ .	D8	Toda ação cognoscitiva está sujeita a erro, mas todo erro é corrigível. (Corolário: toda correção envolve algum erro, o qual, por sua vez, é corrigível.).

Fonte: Adaptado (Brandão, 2012)

⁶ Segundo Bunge (1983), sistema é um conjunto de elementos inter-relacionados que formam uma totalidade organizada, caracterizada por uma estrutura interna (as relações entre seus componentes) e uma estrutura externa (as relações entre o sistema e seu entorno). Todo sistema possui composição (seus componentes), ambiente (o meio em que está inserido), estrutura (as relações internas e externas) e mecanismo (os processos que regem seu funcionamento). Essa visão sistêmica é fundamental para a compreensão de fenômenos em diversas áreas do conhecimento, desde a física e a biologia até a sociedade e a tecnologia.

⁷ A estrutura do sistema é igual à união de sua estrutura interna e sua estrutura externa. A primeira é a coleção das relações entre os componentes do sistema, enquanto a segunda é a coleção das relações entre esses componentes e os componentes do entorno do sistema.

Em resumo do Quadro 1, os princípios descritivos (D1-D8) tratam de que o mundo existe independente do ser humano, e de como podemos conhecê-los, ainda de forma parcial, gradual e sujeito a erros. Os princípios D1 e D2 afirmam a existência objetiva do mundo independentemente dos sujeitos cognoscentes e a possibilidade de conhecê-lo, ainda que de modo parcial, provisório e falível. Já os princípios D3 e D4 enfatizam o caráter histórico, evolutivo e cumulativo do conhecimento, entendido como resultado de processos de aprendizagem individuais e coletivos. Nos princípios D5 e D6, destaca-se a distinção entre entes materiais e objetos conceituais, indicando que a ciência envolve tanto a investigação do mundo real quanto a construção de conceitos, proposições e teorias para compreendê-lo. Por fim, os princípios D7 e D8 reforçam o caráter crítico e autocorretivo da atividade científica: o conhecimento de sistemas reais é sempre limitado pelas interações possíveis entre o pesquisador e o objeto investigado, o que implica que toda ação cognitiva está sujeita ao erro. Contudo, esse erro não é visto como definitivo, mas como parte constitutiva do processo científico, uma vez que pode ser identificado e corrigido ao longo da investigação.

Em conjunto, esses princípios descritivos mostram que, para Bunge, a ciência é uma atividade ao mesmo tempo realista e crítica: parte da existência objetiva do mundo, mas reconhece os limites do conhecimento humano. O avanço científico depende tanto de uma atitude intelectual rigorosa quanto de uma postura ética e prática do pesquisador, marcada pela autonomia, pela abertura à correção do erro e à revisão.

2.1.2 O método científico segundo Bunge

Os princípios descritivos apresentados anteriormente indicam que, para Bunge, a ciência é uma atividade simultaneamente realista e crítica: parte do pressuposto de que o mundo existe independentemente do sujeito, mas reconhece que o acesso a ele é sempre limitado, provisório e sujeito a erro. Essa concepção implica que o avanço científico não depende apenas de técnicas e dados empíricos, mas também de uma atitude crítica e rigorosa do pesquisador, aberta à revisão e à correção contínua do conhecimento. É nesse contexto que se insere a concepção bungeana de método científico.

Para Bunge (1985), não existem caminhos rígidos ou receitas pré-estabelecidas para a ciência. Em vez disso, há uma espécie de “bússola” que auxilia o pesquisador a avaliar se está

seguindo uma trajetória promissora. Essa bússola é o método científico, que não produz conhecimento automaticamente, mas ajuda a evitar que se perca no aparente caos dos fenômenos, sobretudo ao orientar como não formular inadequadamente os problemas e como não se deixar conduzir por preconceitos.

A ideia de Bunge sugere que a ciência não segue um caminho linear ou predefinido, mas utiliza o método científico como um guia (bússola) para explorar o desconhecido. Enfatiza a importância da objetividade, incentivando os cientistas a desafiar suas próprias hipóteses e vieses através de testes rigorosos, em vez de buscar apenas a confirmação de crenças pessoais.

Para Bunge, a pesquisa não é aleatória; ela segue um método, um conjunto de procedimentos para ser considerada válida e confiável. No entanto, dentro desse método, há espaço para flexibilidade. Os dados e fatos observados não ditam uma única hipótese correta. Os cientistas (ou investigadores) devem usar sua criatividade e intelecto para "inventar" possíveis explicações (hipóteses) para esses fatos.

Bunge (1972, p. 33) resume o que é o método científico:

O que hoje chamamos de "método científico" não é mais uma lista de receitas para encontrar as respostas certas para questões científicas, mas sim o conjunto de procedimentos pelos quais: a) os problemas científicos são formulados e b) as hipóteses científicas são testadas. O estudo do método científico é, em suma, a teoria da pesquisa. Essa teoria é descritiva na medida em que descobre padrões na pesquisa científica (e aqui a história da ciência entra em cena, fornecendo exemplos). A metodologia é normativa na medida em que mostra quais regras procedimentais podem aumentar a probabilidade de um trabalho frutífero. Mas as regras discerníveis na prática científica bem-sucedida são passíveis de aprimoramento; não são cânones intocáveis, pois não garantem a obtenção da verdade; contudo, facilitam a detecção de erros.

A caracterização de método científico, segundo Bunge, reforça a concepção, desenvolvida ao longo desta seção, de que a ciência não avança por meio de procedimentos mecânicos ou receitas infalíveis, mas por práticas racionais orientadas à formulação rigorosa de problemas e ao teste crítico de hipóteses. Ao caracterizar a metodologia científica como simultaneamente descritiva e normativa, Bunge articula dois níveis complementares: de um lado, o descritivo, voltado à reconstrução dos padrões efetivos da pesquisa científica; de outro, o normativo, voltado à proposição de regras metodológicas que, embora falíveis e revisáveis, aumentam a probabilidade de investigações frutíferas. O valor dessas regras não reside em garantir a verdade, mas em favorecer a identificação de erros e a correção de rumos. Assim, o método científico aparece menos como um caminho seguro para certezas finais e mais como um instrumento racional para orientar a prática investigativa.

2.1.3 Concepção de teoria científica segundo Bunge

Segundo Bunge (1974), o conhecimento da noção de teoria científica é de bastante importância nos estudos de modelos. Ele classifica as teorias em dois tipos: teorias formais e teorias factuais. As primeiras, como as da lógica e da matemática, independem da observação empírica e são avaliadas principalmente com base em critérios de consistência e coerência lógica. Já as teorias factuais têm como objeto sistemas e processos do mundo real; por essa razão, embora também recorram à lógica e à matemática para estruturar e formalizar seus conceitos, requerem confirmação experimental ou observacional para sua aceitação. Nesse contexto, os modelos científicos desempenham um papel relevante, pois constituem construções teóricas por meio das quais as teorias factuais representam, de forma idealizada, determinados aspectos dos sistemas investigados.

Bunge (1974) concebe a teoria científica, no caso das ciências factuais, como um sistema ordenado de conceitos, leis e hipóteses destinado a explicar fenômenos com base em princípios verificáveis. Diferentemente de hipóteses isoladas, uma teoria científica deve apresentar sistematicidade, consistência lógica, poder explicativo e abertura à crítica e ao aprimoramento. Bunge (1974, p. 55) enfatiza que a “melhor maneira de apresentar uma teoria científica é formulá-la axiomáticamente, i. é, especificando explicitamente todas as assunções e distinguindo claramente os conceitos básicos e hipóteses dos que são seus derivados.”. Nesse sentido, a axiomatização da geometria por Euclides é mencionada por Bunge como um exemplo paradigmático de rigor e transparência conceitual, ilustrando um ideal metodológico de precisão lógica que, embora não elimine a necessidade de confronto empírico nas ciências factuais, orienta a construção de teorias científicas bem estruturadas.

No que diz respeito à necessidade de uma nova teoria, observa-se que, em qualquer campo das ciências factuais, os pesquisadores enfrentam o desafio de decidir que tipo de teoria deve ser explorado. Bunge considera que cabe ao cientista escolher se deve direcionar seus esforços para um nível maior de detalhamento e profundidade, o que implicaria no aumento da população de entidades teóricas; ou se deveria evitar especular sobre que ocorre nos recessos mais profundos da realidade e, em vez disso, concentrar-se apenas no ajuste de dados, valendo-se exclusivamente de variáveis que possam ser observadas de forma razoavelmente direta. O próprio Bunge complementa: “deverá a teoria futura ser representacional ou fenomenológica,

deverá ser concebida como um quadro fiel da realidade ou apenas como uma ferramenta mais efetiva para sumariar e prever observações?” (1974, p. 67, grifo nosso)

Dando mais elementos para elucidar essa escolha, Bunge (1974) classifica as teorias científicas segundo o grau de transparência que oferecem sobre os mecanismos internos do sistema estudado. Ele distingue dois tipos principais: a teoria de caixa negra – em grande parte de caráter fenomenológico, pois descrevem regularidades observáveis sem explicitar mecanismos ocultos – e a teoria de caixa translúcida, denominadas de representacionais, que explicita os processos internos da caixa.

A seguir será explicado cada uma delas:

2.1.3.1 Teoria de Caixa Negra

Segundo Bunge (1974), uma teoria de caixa negra descreve a relação entre variáveis observáveis – de entradas e saídas de um sistema –, mas ela não considera os mecanismos internos. Ou seja, essa teoria explica o que acontece globalmente, mas não como ocorre internamente. São úteis quando tais mecanismos são desconhecidos, inacessíveis ou irrelevantes, ou não são o foco principal da investigação.

Exemplos de teorias de caixa negra:

- i) **Cinemática:** ou estudo do movimento de um corpo, sem indagar porque se move, somente descreve a relação de entrada (tempo) com as saídas (seja posição e/ou velocidade).
- ii) **Óptica Geométrica:** ou a teoria dos raios luminosos, que não faz suposição acerca da natureza e estrutura da luz.
- iii) **Psicologia Behaviorista:** corrente da psicologia, iniciada por B.F. Skinner e John Watson, analisa apenas os estímulos e respostas no comportamento humano, sem investigar os processos mentais internos.
- iv) **Economia Clássica:** modelos econômicos tradicionais analisam a relação entre oferta, demanda e preços, sem detalhar os processos cognitivos e sociais que influenciam as decisões individuais dos consumidores.

2.1.3.2 Teorias Representacionais ou de Caixa Translúcida

Elas oferecem uma explicação parcial dos mecanismos internos, descritas por meio de variáveis “internas” (constructos hipotéticos), do sistema estudado. Elas revelam parte do funcionamento interno, permitindo um melhor entendimento dos processos envolvidos.

Exemplos de teorias de caixa translúcida:

- i) **Dinâmica:** estudo do movimento de um corpo levando em conta as forças envolvidas que agem no corpo.
- ii) **Óptica Física:** teoria que aborda a luz como uma onda eletromagnética explicando fenômenos como interferência, difração e polarização.
- iii) **Mecânica Estatística:** teoria que aborda a natureza e o movimento dos constituintes do sistema.
- iv) **Teoria Cognitiva da Aprendizagem:** Diferente do behaviorismo (caixa negra), essa teoria explica alguns processos internos do cérebro, como a formação da memória e o processamento de informações, sem abranger todo o funcionamento neural.

Bunge esclarece (1974), as teorias de caixa negra e as teorias fenomenológicas são conceitos próximos, mas não são exatamente iguais. Elas pertencem ao mesmo nível de descrição científica, porém diferem quanto ao grau de explicação que oferecem. Para ele, toda teoria de caixa negra é fenomenológica, mas nem toda teoria fenomenológica é necessariamente uma teoria de caixa negra. Isso ocorre porque ambas descrevem regularidades observáveis; entretanto, as teorias fenomenológicas podem possuir uma estrutura conceitual mais rica do que uma simples relação entre entradas e saídas. A seguir, destacam-se as semelhanças, as diferenças e alguns exemplos dessas teorias.

- i) *Semelhanças:* Tanto as teorias fenomenológicas quanto as teorias de caixa negra têm como característica principal descrever regularidades empíricas observáveis, sem necessariamente explicar os mecanismos internos que produzem tais fenômenos. Em ambas, o objetivo principal é estabelecer relações entre variáveis mensuráveis, permitindo previsões experimentais. Por isso, são muito úteis em áreas onde os mecanismos internos ainda não são conhecidos, são difíceis de investigar ou não constituem o foco imediato da pesquisa. Em ambos os casos, busca-se

descrever e prever o comportamento global do sistema, mesmo que sua estrutura interna permaneça oculta.

- ii) *Diferenças:* A diferença fundamental está no grau de simplificação do sistema estudado. As teorias de caixa negra limitam-se a estabelecer relações entre entradas e saídas observáveis, sem formular hipóteses sobre a constituição interna do sistema. Já as teorias fenomenológicas, embora também não expliquem diretamente os mecanismos internos, podem organizar os fenômenos em leis empíricas mais gerais, introduzindo parâmetros, equações ou regularidades que estruturam melhor a descrição. Assim, uma teoria fenomenológica pode apresentar maior generalidade e estrutura conceitual, enquanto a teoria de caixa negra representa a forma mais simples desse tipo de abordagem.
- iii) *Exemplo de teoria de caixa negra – Cinemática clássica:* A cinemática descreve o movimento de um corpo por meio de relações entre tempo, posição e velocidade, mas não explica as causas do movimento. Ela apenas descreve o comportamento do sistema.
- iv) *Exemplo de teoria fenomenológica – Termodinâmica clássica:* A termodinâmica formula leis gerais — como a conservação da energia e o aumento da entropia — que permitem explicar e prever fenômenos térmicos. Contudo, ela não descreve diretamente os mecanismos microscópicos das partículas, que só seriam explicados posteriormente pela mecânica estatística.

Para Bunge, as teorias fenomenológicas “são, amiúde, *elogiadas* devido à sua conhecida generalidade [...], abstendo-se de introduzir entidades ocultas dúbias, tais como átomos ou a vontade” (1974, p. 68, grifo nosso). Nessa citação, Bunge está argumentando que o elogio à “generalidade” da fenomenologia é superficial, pois ela evita o trabalho essencial da ciência: propor e testar a existência de entidades “ocultas” (não diretamente observáveis), para explicar o mundo de forma objetiva. No entanto, o autor adverte que “o resultado líquido será que caixas negras são necessárias, mas não suficientes, e o caixa-negrismo tende a impedir o progresso do conhecimento” (1974, p. 68). Essa crítica conduz diretamente à noção de amadurecimento científico, tema que será desenvolvido a seguir.

2.1.4 Maturação da ciência segundo Bunge

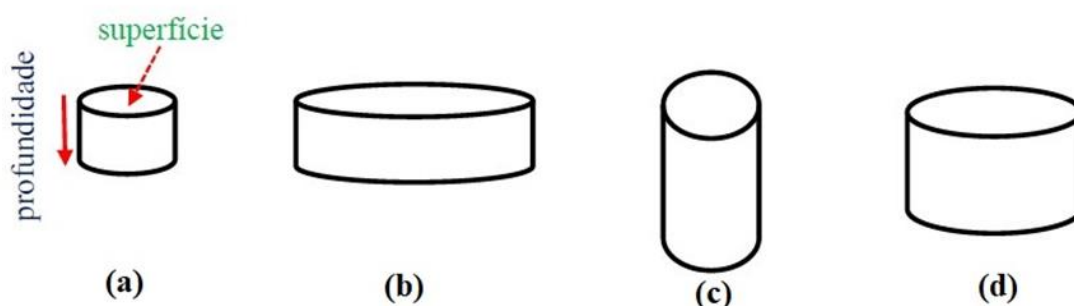
Para Bunge (1974), o que dificulta o progresso do conhecimento não é a multiplicação de teorias da caixa negra, mas sim uma filosofia que exalta as teorias fenomenológicas como a forma mais elevada de sistematização científica, ao mesmo tempo em que desvaloriza as teorias representacionais. A crítica de Bunge é direcionada à filosofia que considera a descrição fenomenológica como o auge da ciência, pois segundo ele, desencoraja a busca por explicações mais profundas e representações realistas do mundo. Para ele, o progresso científico reside no desenvolvimento de teorias representacionais, capazes de desvendar os mecanismos da realidade.

Bunge associa a maturidade científica à superação da dependência exclusiva de teorias fenomenológicas, avançando para teorias representacionais mais profundas, ele enfatiza a importância desse desenvolvimento ao afirmar:

O que se deve tolerar ou, melhor ainda, encorajar, é a proliferação de teorias comprováveis de toda espécie, fenomenológicas ou representacionais, cinemáticas ou dinâmicas, precavidas ou atrevidas – mas sempre conservando em mente que as teorias não-fenomenológicas e a epistemologia realista que estimula a sua construção devem ser, em última análise, preferidas, pois apresentam maior conteúdo, assumem o maior risco e são as mais férteis. (1974, p. 90).

Para explicar o amadurecimento de uma teoria, Bunge recorre à metáfora de um volume geométrico, utilizando a imagem do crescimento de um sólido como forma de representar o avanço do conhecimento científico. Para facilitar a compreensão, pode-se considerar o volume de um cilindro (ver Figura 1), no qual o crescimento científico pode ocorrer em três situações:

Figura 1 - Analogia do crescimento da ciência usando como analogia o volume de um cilindro: a partir de uma situação inicial (a), pode se dar em: (b) superfície, (b) profundidade, ou (c) em ambas superfície e profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

- (i) *Crescimento em superfície (Fig. 1.b)*: quando novas descobertas ampliam o escopo de uma teoria existente sem necessariamente aprofundar sua estrutura conceitual. Isso ocorre somente por acúmulo, generalização e sistematização de dados. Se aplicam teorias existentes a novos fenômenos ou se descobrem novas regularidades sem modificar os princípios fundamentais da ciência. Ex., a descoberta de novos planetas fora do Sistema Solar (exoplanetas), que expandiu a aplicação das leis da mecânica celeste sem mudar sua base teórica.
- (ii) *Crescimento em profundidade (Fig. 1.c)*: ocorre pela inclusão de forma ousada de novas ideias que reexaminam os dados existentes e os ressignificam. Ou seja, introdução de novas entidades e leis fundamentais (ex. da mecânica clássica à mecânica quântica; que aprofundou a compreensão da matéria em escalas subatômicas).
- (iii) *Crescimento em superfície e profundidade (Fig. 1.d)*: Combinação ideal, onde há crescimento tanto em superfície quanto em profundidade. Ou seja, quando uma teoria não apenas se expande para novos domínios, mas também sofre reformulações conceituais que a tornam mais precisa; exemplificada pela teoria de evolução, que uniu descobertas empíricas a avanços conceituais na genética e biologia molecular.

Bunge (1974, p. 92) alerta “crescimento apenas em superfície é cego e obrigado a parar por falta de ideias, enquanto crescimento exclusivo em profundidade corre o risco de terminar em especulação não controlada”, ou seja, sem nexos com a realidade. O tipo de desenvolvimento mais comum é, sem dúvida, o crescimento em superfície, que ocorre quando a atenção se concentra na descrição e sistematização dos fenômenos, em detrimento da formulação teórica. Ele enfatiza que “O crescimento em superfície é necessário, mas insuficiente para alcançar a maturidade, e a ciência madura deve ser a meta de nosso esforço, mesmo se a maturidade completa for (provisoriamente) inatingível” (1974, p. 92).

Segundo Bunge (1974), o processo de maturação ideal envolve três movimentos em direção à invenção de teorias que: *i*) empregam não observáveis, que *ii*) conectam hipóteses para formar mecanismos explicativos do fenômeno que, por sua vez, *iii*) são organizados axiomáticamente.

- i) Pela introdução de hipóteses que envolvem não-observáveis, como átomos, campos ou forças. Essas entidades são introduzidas para explicar o que é observado e ampliar o poder explicativo da teoria,
- ii) Pela invenção de mecanismos supostamente responsáveis pelos fatos em consideração,
- iii) a profundidade é bem explorada quando acompanhada por uma organização lógica. A melhoria na organização deveria contribuir para a maturidade científica: ao formalizar ou axiomatizar um corpo de ideias, reconhecemos seus elementos essenciais, distinguindo aqueles indispensáveis e fundamentais.

Bunge (1974, p. 98) enfatiza que é possível observar uma tendência semelhante em qualquer ciência factual: a progressão desde a organização de dados até a formulação de hipóteses fenomenológicas e, posteriormente, de hipóteses de mecanismo. À medida que a ciência amadurece, torna-se mais profunda, ou seja, introduz cada vez mais hipóteses de mecanismo, desde que estas não sejam incoerentes nem totalmente improváveis.

Esse desenvolvimento das ciências factuais, mostra que a maturidade científica está ligada à transição de uma criteriosa organização de dados para a formulação de hipóteses mais profundas sobre os mecanismos subjacentes aos fenômenos. Esse processo reflete o crescimento do conhecimento em profundidade, pois à medida que a ciência avança, busca não apenas descrever regularidades observáveis, mas também explicá-las por meio de estruturas teóricas mais sofisticadas.

As ideias de Bunge estão, parcialmente, em consonância com a Teoria de Kuhn (2017) no que diz respeito ao crescimento do conhecimento científico. Para Kuhn, a profundidade pode estar associada à introdução de um novo paradigma, que inicialmente possui grande complexidade teórica, mas pouco suporte empírico. Durante a ciência normal, ocorre um acúmulo gradual de conhecimento, tanto em extensão (superfície) quanto em profundidade, fortalecendo o paradigma vigente. No entanto, quando o crescimento se dá apenas somente em superfície, sem aprofundamento teórico, começam a surgir anomalias – fenômenos que o paradigma atual não consegue explicar. Essas anomalias, quando se acumulam, instauram um período de crise, no qual os limites do paradigma tornam-se evidentes e se abre espaço que pode levar à substituição do paradigma vigente. Nesse contexto, o aprofundamento do conhecimento torna-se essencial para a formulação de uma nova teoria capaz de superar as limitações da teoria anterior.

2.2 Concepção de ciência de Imre Lakatos

Imre Lakatos (1922–1974) foi um pensador perspicaz, capaz de articular erudição matemática com sensibilidade histórica. Ele deixou marcas em sua filosofia: uma atenção aguda ao contexto histórico da ciência e, ao mesmo tempo, um forte compromisso com a racionalidade crítica (Musgrave & Pigden, 2023).

Ao abordar a ciência, Lakatos recusou o falsificacionismo estrito de Popper bem como o relativismo de Kuhn que enfatiza acentuadamente fatores sociológicos e psicológicos na mudança científica. Sua proposta buscou uma alternativa metodológica que preservasse critérios racionais de avaliação sem ignorar a dinâmica real da prática científica: explicar como as comunidades científicas realmente trabalham, como lidam com as anomalias, desenvolvem estratégias heurísticas e promovem progresso — sem abdicar da ideia de que é possível julgar teorias e programas com critérios racionais (Allan, 2016). As contribuições de Popper e Kuhn foram, contudo, decisivas para a formulação dessa proposta.

Esta subseção apresenta as linhas gerais da concepção lakatosiana da ciência: a noção de programas de investigação, sua posição frente às concepções de Popper e Kuhn, sua compreensão da racionalidade científica como histórica e comparativa e, por fim sua crítica ao formalismo matemático. A Metodologia dos Programas de Investigação Científica será examinada com maior profundidade no Capítulo 3.

2.2.1. *Programas de investigação científica: breve introdução*

Lakatos propõe, em vez de avaliar teorias isoladas, avaliar programas de investigação científica, entendidos como estruturas teóricas duradouras que orientam a pesquisa ao longo do tempo. Cada programa organiza um conjunto de hipóteses, instrumentos, modelos e problemas que os cientistas abordam coletivamente.

De forma muito esquemática: o programa tem um núcleo firme (com princípios mantidos como irrefutáveis por decisão metodológica), um cinturão protetor (de hipóteses auxiliares passíveis de modificação), e é orientado por heurísticas que guiam como expandir ou

proteger o programa. A heurística positiva sugere caminhos para o desenvolvimento teórico e empírico do programa. A heurística negativa, por sua vez, protege o núcleo firme de mudanças ocasionais, direcionando as modificações para a cintura protetora (Lakatos, 1978).

O critério central de avaliação racional é comparativo e histórico. Programas são considerados progressivos quando conduzem a novas previsões corroboradas; tornam-se degenerativos quando recorrem apenas a ajustes ad hoc para acomodar anomalias já conhecidas (Lakatos, 1978). Essa concepção será detalhada e exemplificada no Capítulo 3.

2.2.2 Popper e Kuhn: críticas e influências na Metodologia dos Programas de Investigação Científica

A Metodologia dos Programas de Investigação Científica emerge do diálogo crítico de Lakatos com Karl Popper e Thomas Kuhn, cujas concepções exerceram influência decisiva sobre o debate epistemológico do século XX (Chalmers, 1993). Embora divergentes, ambas forneceram elementos fundamentais para a formalização lakatosiana da dinâmica científica.

Popper concebeu a ciência como um empreendimento essencialmente crítico, no qual teorias devem ser constantemente submetidas a testes severos com o objetivo de serem refutadas. Tal posição constituiu uma crítica decisiva ao indutivismo⁸ e levou à formulação da falseabilidade como critério de demarcação entre ciência e pseudociência (Popper, 1982). Lakatos, contudo, observou que essa concepção enfrenta dificuldades quando confrontada com a prática científica concreta. Anomalias isoladas raramente levam ao abandono imediato de teorias centrais, uma vez que os resultados empíricos dependem de hipóteses auxiliares, condições experimentais e pressupostos instrumentais (Chalmers, 1993). Com base nessa constatação, Lakatos caracterizou essa posição como um “falsificacionismo metodológico ingênuo” (1978, p. 36).

A análise histórica de Kuhn (2017) ofereceu uma imagem distinta da ciência, enfatizando períodos prolongados de “ciência normal”, nos quais os pesquisadores trabalham dentro de um paradigma compartilhado, resistindo à presença de anomalias. Para Kuhn, dados conflitantes não levam automaticamente à rejeição de teorias, pois sua interpretação é mediada pelo paradigma dominante. Mudanças científicas profundas ocorrem apenas em momentos de

⁸ O problema da indução é que: Pode-se observar milhões de cisnes brancos – não prova que *todos os cisnes são brancos*; basta apenas uma única observação de um cisne negro para refutar a teoria universal (Popper, 1982).

crise, por meio de revoluções científicas que instauram novos paradigmas. Lakatos reconheceu que essa descrição era mais fiel à história da ciência do que o esquema popperiano estrito. Contudo, criticou Kuhn por atribuir peso desproporcional a fatores sociológicos e psicológicos (Lakatos, 1978), correndo o risco de enfraquecer a possibilidade de avaliação racional entre teorias rivais. Se paradigmas são incomensuráveis e a mudança depende de conversão, torna-se difícil explicar por que uma revolução científica representaria progresso e não mera substituição de visões de mundo.

A MPIC incorpora elementos centrais das concepções de Popper e Kuhn, reinterpretando-os de forma sistemática. De Popper, Lakatos preserva a ideia de que a ciência é uma atividade racional, orientada pela crítica e pela avaliação comparativa de teorias. A falseabilidade não desaparece, mas é deslocada do nível de teorias individuais para o nível de programas de investigação em competição. De Kuhn, Lakatos absorve a percepção de que a ciência real envolve resistência a anomalias e desenvolvimento histórico estruturado. Contudo, ao substituir o conceito de paradigma pelo de programa de investigação, Lakatos oferece critérios racionais para julgar transições científicas. Mudanças profundas deixam de ser vistas como irracionais ou puramente sociológicas e passam a ser interpretadas como escolhas fundamentadas entre alternativas metodologicamente avaliáveis.

A MPIC incorpora aspectos centrais dessas duas abordagens: preserva, de Popper, o ideal de crítica racional e, de Kuhn, a atenção à continuidade histórica e à resistência a anomalias. Ao substituir paradigmas por programas de investigação, Lakatos propõe um modelo que permite avaliar racionalmente a mudança científica sem reduzi-la nem a refutações instantâneas nem a fatores exclusivamente sociológicos (Frigg *et al.*, 2025).

2.2.3 Racionalidade científica e historicidade

Lakatos desloca a noção de racionalidade do momento imediato para a esfera histórica. Julgar uma teoria não é uma operação pontual; é comparar trajetórias. Um programa é mais bem avaliado quando, ao longo de sua história, amplia seu conteúdo teórico e gera novas previsões que se confirmam empiricamente. Assim, a racionalidade científica deixa de ser um julgamento sobre sucessos ou fracassos isolados e passa a ser uma apreciação das tendências e das capacidades explicativas de um programa ao longo do tempo.

No mesmo sentido, Hacking (1979) observa que Lakatos preserva a ideia de racionalidade normativa, isto é, a existência de critérios objetivos de progresso científico, mas reconhece que esses critérios só adquirem sentido dentro de uma história concreta de debates, revisões e reformulações.

Desse modo, a avaliação científica assume caráter comparativo e temporal. Quando um programa recorre repetidamente a ajustes *ad hoc* sem ampliar seu poder preditivo, ele tende a se degenerar; já outros, inicialmente frágeis, podem mostrar-se produtivos com o tempo. Lakatos, portanto, preserva o ideal de crítica racional, mas o insere no fluxo histórico e no debate coletivo entre alternativas (Allan, 2016).

Lakatos oferece, assim, uma visão de ciência ao mesmo tempo rigorosa e humana: rigorosa porque exige razões, previsões e evidências; humana porque reconhece o valor do erro, da tentativa e da discussão. É essa tensão fecunda — entre a coragem de imaginar e a disciplina de justificar — que faz da ciência uma das mais ricas formas de atividade intelectual coletiva (Musgrave & Pigden, 2023; Allan, 2016).

2.2.4 *Contra o formalismo na matemática: racionalidade e descoberta*

A contribuição de Lakatos estende-se também à filosofia da matemática, em *Proofs and Refutations: The Logic of Mathematical Discovery* (1976). Nessa obra, ele critica o chamado “programa euclidiano”, segundo o qual a matemática avançaria por meio de deduções lineares a partir de axiomas fixos e definições imunes à revisão.

Com base em estudos históricos, Lakatos mostra que a prática matemática envolve conjecturas, refutações, reformulações conceituais e debates críticos, em um processo análogo ao da ciência empírica. Provas não encerram definitivamente uma questão, mas frequentemente dão origem a contraexemplos e refinamentos teóricos.

Essa perspectiva reforça uma concepção ampliada de racionalidade, comum à ciência e à matemática: o conhecimento não é um produto acabado, mas um processo histórico de construção, no qual o erro desempenha papel heurístico fundamental (Lakatos, 1976). Essa unidade entre razão crítica e historicidade constitui um dos traços mais originais do pensamento lakatosiano.

3. CONCEPÇÃO DE MODELOS DE BUNGE E DE LAKATOS⁹

Este capítulo propõe uma interpretação do papel desempenhado pelos modelos na Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Imre Lakatos (1978) e a compara com a concepção de modelo de Bunge (1973, 1974). Busca-se esclarecer como os modelos operam em cada uma dessas abordagens, destacando convergências, diferenças e implicações metodológicas para a compreensão do desenvolvimento do conhecimento científico. Enquanto Bunge desenvolve uma teoria explícita e sistemática dos modelos, Lakatos não formula diretamente uma concepção de modelo; contudo, sua análise da dinâmica interna dos programas de investigação permite reconstruir o papel que os modelos desempenham na prática científica.

Na perspectiva de Bunge (1973, 1974), os modelos científicos ocupam uma posição subordinada às teorias – pois derivam diretamente de seus princípios e conceitos – mas exercem, ao mesmo tempo, um papel mediador entre a teoria e os fenômenos que ela busca explicar. Essa subordinação é compatível com a visão de Hartmann (1995), segundo o qual as teorias fornecem o corpo conceitual e os modelos operam como aplicações concretas desse corpo. Assim, os modelos cumprem a função de tornar operacionais as abstrações teóricas, conectando-as a situações concretas e passíveis de teste. Nas próximas subseções apresentaremos detalhes da concepção de modelo proposta por Bunge (1973, 1974).

Em Lakatos (1978), por outro lado, os modelos não são apenas aplicações derivadas de uma teoria, mas elementos dinâmicos dentro de um programa de investigação científica. Eles formam cadeias históricas que refletem a evolução interna do programa: começam como modelos ingênuos, passam por revisões progressivas e, quando bem-sucedidos, ampliam o poder explicativo e preditivo do núcleo teórico. Em vez de avaliar modelos e teorias isoladamente, Lakatos propõe que seu valor depende de sua inserção no programa, da heurística que os orienta e, sobretudo, da capacidade de gerar previsões novas e corroboradas. Assim, sua abordagem destaca o papel estruturante e evolutivo dos modelos na prática científica.

Este capítulo é organizado da seguinte forma: na Subseção 2.1, discutiremos a concepção de modelo teórico segundo Bunge; na 2.2, interpretaremos o termo “modelo” segundo Lakatos, a partir da obra *Falsificação e Metodologia dos Programas de Investigação Científica* (1978); e, finalmente, na 2.3, realizaremos uma comparação entre as duas perspectivas de modelo, enfatizando suas aproximações, divergências e possíveis complementaridades no entendimento da dinâmica científica.

⁹ Os resultados deste capítulo deram origem ao artigo intitulado “MODELOS EM BUNGE E LAKATOS: análise comparativa e implicações para o ensino”, recentemente submetido para publicação em periódico científico.

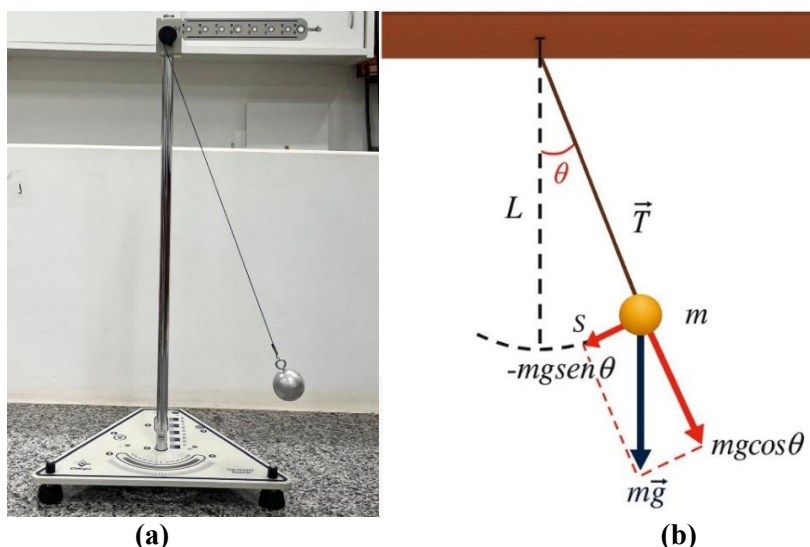
3.1 Modelo teórico segundo Bunge

3.1.1 Concepção de modelo teórico

Bunge (1974, p. 16) define modelo teórico, ou teoria específica, como “um sistema hipotético-dedutivo que concerne a um objeto-modelo, o qual, por sua vez, é a representação conceitual esquemática de uma coisa ou situação real ou suposta como tal”. Dessa citação, notamos que o modelo teórico articula quatro elementos centrais, um deles não especificado de grande relevância, a teoria geral: (i) hipóteses e proposições organizadas dedutivamente, (ii) um objeto real, situação real ou suposta como tal, (iii) um objeto-modelo idealizado, e (iv) uma teoria geral que sustenta sua formulação.

- i) *modelo teórico é um sistema hipotético-dedutivo*, significa que o modelo teórico é composto por hipóteses (pressupostos ou axiomas) e proposições, das quais se derivam conclusões por meio de regras lógicas de dedução.
- ii) *objeto real* é um objeto ou sistema físico, real ou suposto como tal (ver Figura 2.a), como um pêndulo, uma molécula, um cérebro ou um planeta, que pode ser representado por um objeto-modelo.
- iii) *objeto-modelo (ou modelo conceitual)*, que é uma representação idealizada ou simplificação do objeto real: seleciona aspectos considerados essenciais para o problema investigado e abstrai características tidas como irrelevantes (Ver Figura 2.b).
- iv) *Teoria Geral* é de bastante importância na perspectiva dos modelos de Bunge. Ela é um conjunto abrangente de conceitos, leis e princípios que estruturam um campo de conhecimento sem se restringir a casos específicos. A teoria geral – i.e., a mecânica de Newton, o eletromagnetismo ou a termodinâmica – fornece o arcabouço conceitual e formal que torna possível formular o modelo teórico.

Figura 2 - Exemplos de pêndulo: (a) pêndulo real, composto por um fio, uma bola e um suporte formado por base e haste, em conjunto, compõem o objeto real; (b) pêndulo simples é uma representação idealizada desse sistema, em que considera o fio de massa desprezível, a bola como uma partícula pontual e os atritos do ar e do ponto de fixação são desconsiderados, constituindo o objeto-modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Bunge detalha como se relacionam o objeto real – o referente – e o objeto-modelo que o representa, descrevendo os diferentes modos pelos quais essa representação pode ocorrer:

Uma representação esquemática de um objeto pode ser chamada de objeto-modelo. Se o objeto representado (ou referente) for concreto ou físico, então seu modelo é uma idealização desse objeto. A representação pode ser pictórica, como no caso de um desenho, ou conceitual, como uma fórmula matemática. Ela pode ser figurativa, como o modelo de esfera e bastão de uma molécula; semissimbólica, como o mapa de contorno dessa mesma molécula; ou simbólica, como o operador hamiltoniano¹⁰ associado a esse objeto.

A representação de um objeto concreto é sempre parcial e mais ou menos convencional. O objeto-modelo não reproduz todas as características de seu referente, podendo incluir elementos imaginários e capturar apenas aproximadamente as relações entre os aspectos que incorpora. Em particular, muitas variações individuais dentro de uma classe são deliberadamente ignoradas, assim como a maioria dos detalhes dos eventos envolvendo esses indivíduos. (1973, p. 92, tradução nossa).

A citação acima nos indica que um objeto-modelo é uma representação simplificada de um objeto real. Essa representação pode assumir diferentes formas – desde desenhos até expressões matemáticas — variando quanto ao grau de simbolismo e abstração. Em todos os casos, porém, ela é necessariamente parcial: não pretende reproduzir fielmente o referente, mas selecionar e organizar apenas alguns de seus aspectos considerados relevantes para a investigação científica. Para isso, ignora variações individuais, omite detalhes secundários e pode incorporar idealizações ou elementos imaginários.

¹⁰ É um operador matemático que, quando aplicado à função de onda (ψ) da molécula, permite calcular os níveis de energia possíveis e o comportamento dos elétrons dentro dessa molécula.

Desse modo, na concepção de Bunge, o ponto de partida da modelagem científica é o objeto-modelo, isto é, uma representação idealizada de um sistema real, construída por meio de simplificações controladas e que pode assumir diferentes formas — geométricas, simbólicas ou matemáticas. Contudo, essa representação, tomada isoladamente, ainda não possui estatuto explicativo pleno. O modelo teórico emerge quando o objeto-modelo é integrado a uma teoria geral, passando a ser interpretado à luz de leis, princípios e conceitos teóricos mais amplos. É essa integração que confere ao modelo teórico sua capacidade explicativa e preditiva. Assim, enquanto o objeto-modelo funciona como uma representação estruturada do sistema real, o modelo teórico constitui uma construção conceitual mais rica, formulada com apoio da lógica e da matemática, que atua como mediador entre a teoria geral e a realidade. Compreender como se dá esse processo de passagem do objeto-modelo ao modelo teórico é fundamental para entender a prática científica baseada em modelos, tema desenvolvido a seguir.

3.1.2 Processo de elaboração de modelo teórico

A fim de compreender com maior profundidade como se articulam os conceitos de objeto-modelo, modelo teórico e teoria geral, recorreremos à seguinte citação de Bunge, que esclarece o processo de construção de um modelo teórico no interior da prática científica:

Preocupar-nos-emos com objetos-modelo e modelos teóricos como esboços hipotéticos de coisas e fatos supostamente reais. Assim um fluido pode ser modelado como um contínuo dotado de certas propriedades e semelhante objeto-modelo pode ser enxertado em uma das várias teorias gerais, digamos a mecânica clássica ou mecânica relativística geral. Do mesmo modo é possível modelar um organismo de aprendizagem como uma caixa negra equipada com determinados terminais de entrada e saída e pode-se desenvolver este objeto-modelo em um sistema dedutivo hipotético. Em qualquer dos casos produz-se uma teoria específica ou modelo teórico de um objeto concreto. O que se pode submeter a provas empíricas são tais modelos teóricos: as teorias gerais despreocupadas com particulares permanecem incomprováveis, a menos que sejam enriquecidas com modelos de seus referentes. E os objetos-modelo mantêm-se estéreis a não ser que sejam introduzidos ou desenvolvidos em alguma teoria (Bunge, 1974, p. 31).

Para tornar essa passagem mais acessível, apresentamos uma análise explicativa apoiada no Quadro 2 de Brandão et. al (2008, p.12; 2012, p. 41), com algumas adaptações. Nesse quadro, os autores descrevem de forma esquemática o processo da modelagem científica por meio de exemplos da Física, evidenciando a sequência que vai do objeto real, passa pela

concepção do objeto-modelo adotado pelo pesquisador, pela escolha da teoria geral pertinente, até a formulação do modelo teórico.

Quadro 2: Exemplos do processo da modelagem na Física, segundo a visão de Bunge.

Objeto Real	Objeto-Modelo	Teoria Geral	Modelo Teórico
Escoamento da água no interior de uma tubulação	Fluído contínuo sem viscosidade	Mecânica dos Fluidos	Modelo de fluído ideal
	Fluído contínuo com viscosidade		Modelo de fluído viscoso
Certa quantidade de gás num recipiente fechado	Sistema de partículas termicamente isolado que não interagem entre si	Mecânica Estatística	Modelo do gás ideal clássico
		Mecânica Quântica	Modelo do gás ideal quântico
Comportamento da matéria em nível microscópico	Sistema planetário	Mecânica Clássica e Eletromagnetismo	Modelo atômico de Rutherford
Movimento dos planetas do sistema solar		Mecânica Clássica	Modelo planetário de Newton

Fonte: Adaptado (Brandão, 2012, p.41).

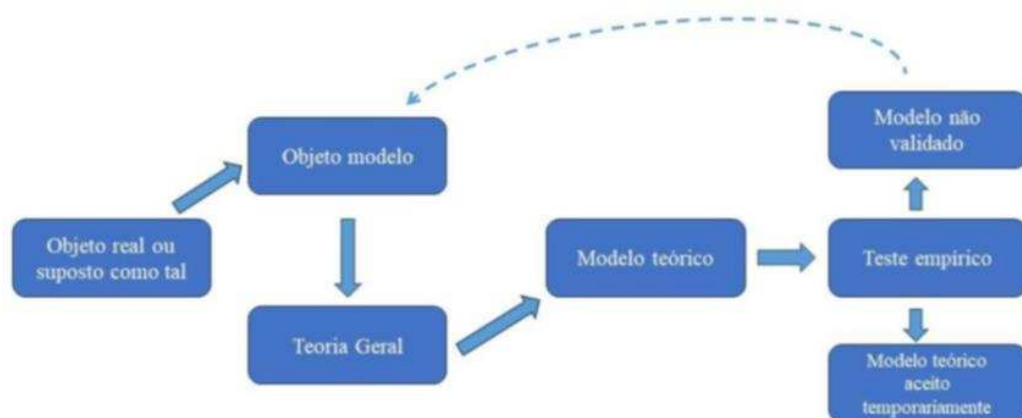
Na primeira linha do Quadro 2, ao se estudar o escoamento da água em uma tubulação, o objeto-modelo pode ser um fluído contínuo sem viscosidade ou um fluído contínuo viscoso. Com base na mecânica dos fluídos como teoria geral, esses objetos-modelo levam à construção, respectivamente, de um modelo de fluído ideal e de um modelo de fluído viscoso. Ambos se referem ao mesmo sistema físico, mas produzem modelos teóricos diferentes devido às hipóteses adotadas.

Bunge destaca que apenas os modelos teóricos, e não as teorias gerais, podem ser diretamente submetidos a teste empírico. Na afirmação “*as teorias gerais despreocupadas com particulares permanecem improváveis*”, essa ideia pode ser esclarecida a partir de duas considerações. A primeira é que os modelos teóricos, por serem representações aplicadas a situações específicas, precisam ser validados empiricamente – ainda que essa validação seja sempre aproximada, limitada e provisória. A segunda é que as teorias gerais não podem ser verificadas diretamente: seus enunciados são gerais demais para serem submetidos a experimentos, pois não tratam de casos particulares. A função da teoria geral, portanto, é fornecer a estrutura lógica e conceitual que possibilita a transformação do objeto-modelo em um modelo teórico, passível de confrontação com os dados empíricos.

Para Bunge, validar empiricamente significa confrontar um modelo teórico com dados de observação ou experimento. Esse teste não prova um modelo de maneira definitiva; apenas mostra que, *até o momento*, provisoriamente ele se ajusta de modo satisfatório aos fatos observados. Trata-se, portanto, de um teste de adequação entre representação e realidade. A invalidação ocorre quando os resultados empíricos contradizem as previsões do modelo teórico. Nesses casos, o modelo, ou parte dele, precisa ser ajustado. Já às teorias gerais, por serem abstratas, não são diretamente invalidadas; os modelos é que sofrem esse impacto.

A Figura 3 esquematiza as etapas de construção de um modelo teórico: O percurso se inicia com a idealização do objeto real, representado pela seta de traço mais espesso, que conduz à concepção do objeto-modelo. Este ao ser integrado a uma teoria geral e desenvolvido por meio de operações lógico-matemáticas, atinge-se à formulação do modelo teórico dotado de poder explicativo e preditivo. Na sequência, o modelo teórico é submetido ao teste empírico: (i) se os resultados forem satisfatórios, o modelo é provisoriamente aceito; (ii) se os dados empíricos o refutarem, retorna-se – conforme indicado pelas setas tracejadas – à etapa do objeto-modelo, com o objetivo de revisar as hipóteses e reformulá-las, ajustando a idealização inicial, os pressupostos adotados ou as relações matemáticas utilizadas. O ciclo, assim, se repete, obedecendo à mesma lógica procedimental.

Figura 3 - Etapas da modelagem segundo Bunge. As setas indicam o movimento articulado que cada etapa deve passar para o desenvolvimento do modelo teórico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A submissão do modelo ao teste empírico não marca o fim do processo de modelagem. Ao contrário, os resultados obtidos podem indicar a necessidade de revisar as idealizações iniciais, os pressupostos adotados ou mesmo as relações matemáticas empregadas. Nesse

sentido, a modelagem científica deve ser compreendida como uma atividade racional e dinâmica, na qual objeto-modelo, teoria geral e modelo teórico atuam de forma articulada e complementar. Essa compreensão contribui para esclarecer o estatuto epistemológico dos modelos na concepção de Bunge e estabelece a base conceitual a partir da qual serão desenvolvidos, na Seção 4.1, os modelos de caixa negra e de caixa translúcida e aplicações com dois estudos de caso.

Na próxima Subseção será analisada a noção de “modelo” segundo Lakatos, a partir da obra *Falsificação e Metodologia dos Programas de Investigação Científica* (1978). Em seguida, essa interpretação de modelo será comparada com a concepção de modelo de Bunge, destacando suas convergências, diferenças e possíveis complementaridades na compreensão da dinâmica do desenvolvimento científico.

3.2 O papel dos modelos na Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Lakatos

Convém esclarecer que Lakatos não apresenta uma teoria explícita dos modelos científicos. O que se propõe nesta subseção é uma reconstrução conceitual do papel funcional que os modelos desempenham no interior da MPIC, a partir das análises metodológicas e exemplos históricos do autor.

3.2.1 Metodologia dos Programas de Investigação Científica

A Metodologia dos Programas de Investigação Científica proposta por Imre Lakatos (1978), como mencionado na Subseção 2.2.2, representa um esforço de síntese entre o falsificacionismo de Popper e a concepção histórica de Kuhn.

Um programa de investigação científica possui dois componentes principais o núcleo firme e o cinturão protetor (Lakatos, 1978). Esses elementos não correspondem a partes isoladas, mas a funções distintas e complementares no desenvolvimento histórico e metodológico de um programa científico.

1. *Núcleo firme* – conjunto de princípios, leis, ou axiomas considerados irrefutáveis por decisão metodológica. Sua função é garantir a identidade e a continuidade do programa

ao longo do tempo, e estabelecer estabilidade teórica, protegendo a base conceitual do programa (ver Figura 4).

2. *Cinturão protetor* – composto por hipóteses auxiliares, modelos específicos, condições iniciais e suposições adicionais que envolvem o núcleo firme. Diferentemente do núcleo firme, os elementos do cinturão são passíveis de modificação, ajuste ou substituição, funcionando como a principal zona de contato do programa com os testes empíricos.

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática dessa estrutura. Nela, o núcleo firme aparece como o centro conceitual do programa, enquanto o cinturão protetor o circunda, indicando seu papel de absorver o impacto das anomalias empíricas e das refutações potenciais. A figura tem caráter didático e analítico, pois permite visualizar como a estabilidade teórica do núcleo é preservada por meio da flexibilidade dos modelos e hipóteses que compõem o cinturão, aspecto central para compreender a dinâmica dos programas de investigação.

Figura 4 - Estrutura de um programa de investigação científica segundo Lakatos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Essa estrutura é operacionalizada por meio das Heurísticas¹¹ do programa, que funcionam como diretrizes metodológicas para o trabalho científico. A heurística negativa estabelece a proibição de ataques diretos ao núcleo firme, assegurando sua preservação metodológica. Já a heurística positiva orienta a construção, modificação e refinamento do

¹¹ É uma estratégia, método ou abordagem que facilita a resolução de problemas ou a tomada de decisões, muitas vezes por meio de regras práticas. Em vez de analisar todas as possibilidades, as heurísticas ajudam a chegar a soluções de maneira mais rápida e eficiente, ainda que possam levar erros em alguns casos.

cinturão protetor, sugerindo caminhos para novas investigações, a formulação de novos problemas e a proposição de soluções teóricas e empíricas. Desse modo, as heurísticas articulam a dimensão estrutural do programa com sua dinâmica de desenvolvimento ao longo do tempo.

Segundo Lakatos (1978), um programa de investigação é considerado bem-sucedido quando seu desenvolvimento conduz a uma progressão racional dos problemas científicos, isto é, quando gera novas previsões e amplia, de forma sistemática, seu poder explicativo. Um programa progressivo não se caracteriza pela simples acumulação de resultados, mas pela capacidade de orientar ajustes no cinturão protetor — hipóteses auxiliares e modelos — de modo a antecipar fatos inéditos, preservando o núcleo firme. Lakatos ilustra essa noção de progressividade com o programa relativístico de Einstein, que não apenas resolveu anomalias da mecânica newtoniana, como também previu fenômenos novos, como a deflexão da luz por campos gravitacionais, posteriormente confirmada empiricamente. Esse exemplo evidencia o caráter progressivo do programa, e não a estrutura geral de um programa de investigação.

De modo contrário, um programa é degenerativo, quando em vez de gerar novas previsões bem-sucedidas, apenas ajusta suas hipóteses auxiliares para acomodar anomalias sem oferecer avanços significativos. Quando um programa precisa recorrer constantemente a modificações *ad hoc*¹² para evitar a falsificação, ele tende a se tornar degenerativo. Um exemplo disso foi o modelo geocêntrico de Ptolomeu que adicionava epiciclos para justificar as órbitas planetárias observadas, mas não conseguia fornecer previsões novas e inovadoras, sendo substituído pelo modelo heliocêntrico de Copérnico¹³.

Lakatos também enfatiza que o desenvolvimento da ciência não é marcado pela existência de um único programa de investigação dominante, mas pela coexistência e competição contínua entre diferentes programas que buscam explicar os mesmos fenômenos. Essa competição não se restringe a momentos iniciais, mas constitui um traço permanente da dinâmica científica. Nesse cenário plural, programas estabelecidos e emergentes disputam espaço explicativo e empírico ao longo do tempo. Contudo, Lakatos ressalta que programas de investigação jovens não devem ser descartados prematuramente apenas por ainda não apresentarem desempenho empírico superior ao de seus concorrentes mais consolidados. Enquanto for possível reconstruir racionalmente sua estrutura teórica e heurística, esses

¹² Para Chalmers (1993, p. 78), uma modificação *ad hoc* é: “Uma modificação numa teoria, tal como o acréscimo de um postulado extra ou uma mudança em algum postulado existente, que não tenha consequências testáveis, e que já não fossem consequências testáveis da teoria não-modificada.”

¹³ O modelo copernicano também usava epiciclos e tinha seus próprios problemas (como a falta de paralaxe estelar observável). No entanto, Lakatos argumenta que ele era heurísticamente superior: oferecia um caminho de pesquisa mais promissor, com explicações mais simples e elegantes para alguns fenômenos (como a ordem dos planetas e as retrogradações).

programas devem ser metodologicamente protegidos por um período, a fim de permitir seu desenvolvimento. Como afirma o autor: “Enquanto for possível reconstruir racionalmente [...] um programa de investigação nascente, ele deverá ser protegido durante algum tempo de um rival poderoso estabelecido” (1978, p.82). Dessa forma, não há, para Lakatos, experimentos decisivos capazes de eliminar imediatamente um programa de investigação.

Um exemplo ilustrativo dessa situação pode ser encontrado durante a pandemia de Covid-19, quando diferentes plataformas tecnológicas no sentido biomédico — isto é, conjuntos de princípios, métodos e infraestruturas experimentais para o desenvolvimento de vacinas — passaram a competir. Sob a lente da MPIC, é possível interpretar essas plataformas, como RNA mensageiro (Pfizer/BioNTech), vetor viral (AstraZeneca/Oxford) e vírus inativado (CoronaVac), como programas de investigação, cada um estruturado em torno de um princípio operacional distinto no modo de apresentação do antígeno ao sistema imunológico (Gong et al., 2021). No entanto, é crucial notar que todos compartilhavam um paradigma imunológico subjacente comum.¹⁴

Além dos exemplos clássicos oriundos das ciências naturais, a Metodologia dos Programas de Investigação Científica tem sido aplicada em diferentes áreas do conhecimento, o que evidencia sua flexibilidade analítica e seu alcance explicativo. Na parasitologia, por exemplo, Cabaret e Denegri (2008) demonstraram que os conceitos de núcleo firme e cinturão protetor auxiliam a organizar a pesquisa sobre helmintos, integrando hipóteses biológicas e procedimentos metodológicos. Na economia Williams (2023) utilizou o arcabouço da MPIC para avaliar criticamente a teoria do capital do conhecimento, identificando seu caráter degenerativo ao não gerar novas previsões empíricas. Já, na teologia Doug (2008) discute como programas teóricos podem evoluir ou se esgotar conforme sua capacidade de responder a problemas centrais. Esses são exemplos de aplicação que ilustram o potencial da MPIC de Lakatos.

Sumarizando, Lakatos defendia um pluralismo teórico onde graças à disputa de programas de investigação adversários a ciência progride. Essa competição entre programas de pesquisa é essencial para o avanço da ciência, pois permite que hipóteses e teorias sejam comparadas em termos de sua capacidade de previsão, coerência e crescimento progressivo. Programas mais bem-sucedidos (progressivo), que expandem o conhecimento e resolvem

¹⁴ A intensa disputa foi impulsionada não apenas por esta divergência de rotas tecnológicas (heurísticas positivas), mas também, e de forma decisiva, por fatores pragmáticos como velocidade de desenvolvimento, capacidade de produção e interesses econômicos e geopolíticos. Nesse sentido, o episódio ilustra como, em contextos históricos concretos, a dinâmica entre programas pode envolver simultaneamente dimensões epistemológicas e tecnológicas, sem se reduzir a uma controvérsia puramente teórica sobre fundamentos.

problemas, tendem a se fortalecer, enquanto aqueles que não evoluem (programas degenerativos) ou se mostram inconsistentes, acabam sendo abandonados.

3.2.2 O papel dos modelos na heurística positiva

Lakatos insere, preliminarmente, o termo de modelo na heurística positiva. Segundo ele, (1978, p. 58, grifo nosso):

A heurística positiva traça um programa que registra uma cadeia de modelos de simulação da realidade cada vez mais complicados: a atenção do cientista está fixada na construção dos seus modelos seguindo instruções estabelecidas na parte positiva do seu programa.

Na citação acima, Lakatos sugere que a heurística positiva do programa de pesquisa orienta a construção progressiva de modelos científicos cada vez mais sofisticados. A heurística positiva fornece instruções para que os cientistas desenvolvam esses modelos de forma sistemática. Ela é descrita como um guia construtivo, que traça um caminho para o desenvolvimento progressivo do programa.

Lakatos (1978, p. 59, grifo nosso) propõe uma definição: “Um modelo é um conjunto de condições iniciais (possivelmente em conjunto com algumas das teorias observacionais) que se sabe estar sujeito a ser substituído durante o desenvolvimento ulterior do programa, sabendo-se até, mais ou menos, como”. Essa definição enfatiza o caráter transitório dos modelos: eles não são estruturas fixas, mas sim construções temporárias que evoluem conforme o programa avança.

Essa sequência de modelos, construída para representar aspectos da realidade, precisa ser acompanhada de hipóteses auxiliares observacionais, que permitem confrontar o modelo com dados experimentais. Em termos gerais, quanto mais elaborado é um modelo, maior tende a ser seu poder explicativo e preditivo, o que exige formas igualmente refinadas de observação e medição. Na perspectiva da MPIC de Lakatos, esse conjunto de hipóteses e procedimentos pode ser compreendido como parte do cinturão protetor do programa. Nesse contexto, as próprias teorias observacionais podem depender de modelos auxiliares, como ocorre, por exemplo, com a teoria dos telescópios¹⁵, necessária para interpretar corretamente observações astronômicas.

¹⁵ Um exemplo de modelo auxiliar da teoria dos telescópios é o modelo óptico de formação de imagem, que descreve a propagação da luz no sistema óptico, levando em conta idealizações, difração e possíveis aberrações. Esse modelo é essencial para interpretar adequadamente os dados observacionais e distinguir estruturas reais de artefatos instrumentais. Assim, quando um astrônomo identifica uma mancha luminosa como uma estrela binária,

3.2.3 Exemplo histórico do papel dos modelos no interior da MPIC: o programa newtoniano

À luz da Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Lakatos, o desenvolvimento histórico do programa gravitacional newtoniano pode ser interpretado como um processo na qual a sucessão de modelos desempenha papel central no progresso do programa. O primeiro modelo planetário de Newton era bastante simplificado, considerava o Sol fixo com apenas um planeta em órbita, em que tanto o Sol quanto o planeta eram tratados como pontos de massa. A partir desse modelo, Newton derivou a sua lei de gravitação, aplicando-a às órbitas elípticas descritas por Kepler. Porém, esse modelo inicial violava sua terceira lei¹⁶ e, por isso, precisou ser substituído por outro em que o Sol e o planeta giravam em torno de um centro de gravidade comum. Essa consideração tornou o modelo teoricamente mais consistente, mas ainda era limitado, porque não considerava as interações gravitacionais entre o Sol com os outros planetas conhecidos.

Com o avanço do programa, Newton incorporou ao modelo as forças heliocêntricas resultantes da interação do Sol com todos os planetas, mas ainda ignorava as forças interplanetárias. Posteriormente, aperfeiçoou o modelo ao tratar o Sol e os planetas como esferas, evitando o problema teórico de densidade infinita associado ao modelo de pontos. Essa mudança, porém, implicou enormes desafios matemáticos, que atrasaram a publicação dos *Principia* por cerca de dez anos (Lakatos, 1978).

Silveira (1996, p. 221), manifesta que os seguidores de Newton nunca duvidaram do núcleo firme do programa e continuaram sofisticando o modelo planetário,

quando foi observado pelos newtonianos que a órbita prevista para Urano era discordante com as observações astronômicas, eles não consideraram que a Mecânica Newtoniana estivesse refutada; Adams e Leverrier, por volta de 1845, atribuíram tal discordância à existência de um planeta ainda não conhecido - o planeta Netuno -, e portanto, não levado em consideração no cálculo da órbita de Urano. Essa hipótese permitiu também calcular a trajetória de Netuno.

essa interpretação depende do modelo do telescópio, que assegura que a imagem observada corresponde, dentro de certos limites, a uma configuração física real. O exemplo ilustra a tese lakatosiana de que os dados observacionais não são neutros, pois pressupõem modelos teóricos auxiliares.

¹⁶ Essa lei afirma que a toda ação corresponde uma reação de mesma intensidade e direção, porém sentido contrário. Newton colocava o Sol fixo e apenas o planeta em movimento. Isso violava a 3ª lei, pois se o planeta exerce força sobre o Sol, este deve reagir e acelerar, ainda que muito pouco. Ignorar esse movimento contrariava o princípio de ação e reação.

A hipótese formulada independentemente por Adams e Leverrier foi confirmada em 1846, fortalecendo o programa newtoniano e caracterizando-o como progressivo, no sentido lakatosiano de produzir uma previsão nova e empiricamente corroborada (Lakatos, 1978, p. 56). Esse episódio mostra como o refinamento de modelos e hipóteses auxiliares no interior do cinturão protetor pode impulsionar o progresso de um programa de investigação. Antes da previsão de Netuno, diversos ajustes intermediários — como correções orbitais e revisões de parâmetros do sistema planetário — foram introduzidos para acomodar as anomalias observadas na órbita de Urano. Embora esses ajustes, isoladamente, não tenham gerado previsões novas, eles foram metodologicamente relevantes, pois aprimoraram a estrutura do modelo planetário e tornaram possível a posterior previsão bem-sucedida de um novo planeta. Assim, para Lakatos, o progresso científico envolve tanto ajustes teóricos quanto ganhos empíricos efetivos.

3.2.4 Modelos ingênuos e amadurecimento teórico

Para Lakatos (1978), modelos iniciais ou ingênuos¹⁷ — como o primeiro modelo planetário de Newton — são parte natural do desenvolvimento científico. Eles servem como ponto de partida, mas contêm simplificações que, com o tempo, precisam ser corrigidos. O cientista persistente transforma esses modelos iniciais em estruturas mais sofisticadas, ampliando seu poder preditivo e explicativo.

De forma resumida, pode-se afirmar que a “ingenuidade” não é um defeito, mas um passo necessário na elaboração teórica, pois permite identificar limitações e abrir caminhos para modelos mais consistentes. A abordagem de Lakatos mostra que o progresso científico não deve ser entendido como a simples falsificação de uma teoria tomada isoladamente; ele ocorre dentro de programas de investigação, onde teorias, modelos e hipóteses são avaliados em conjunto. Nesse contexto mais amplo, a heurística positiva orienta o aperfeiçoamento gradual das estruturas teóricas e a geração de novas previsões. Assim, o avanço é medido pela capacidade dos modelos sucessivos de produzir previsões inéditas, resolver problemas e aprofundar a compreensão dos fenômenos.

¹⁷ O termo “ingênuo” é empregado para indicar tanto a ausência de realismo nas hipóteses de um modelo quanto o seu caráter deliberadamente simplificado. Nas palavras de Lakatos (1978, p. 59): “A maior parte dos “puzzles” newtonianos, se não todos, [...], eram previsíveis na época do primeiro modelo ingênuo de Newton e, sem dúvida, Newton e seus colegas *anteviram-nos*: Newton deve ter tido consciência plena da falsidade banal das suas primeiras variantes.”

Na MPIC, Lakatos não atribui o progresso científico exclusivamente aos modelos, nem os toma como substitutos das teorias. Sua crítica dirige-se à concepção popperiana de falsificação imediata, segundo a qual um único contraexemplo bastaria para rejeitar uma teoria. Para Lakatos, a avaliação racional ocorre no nível do programa de investigação como um todo. Nesse quadro, o núcleo firme reúne os princípios teóricos centrais do programa, enquanto os modelos e hipóteses auxiliares, situados no cinturão protetor, constituem o nível operacional em que previsões são formuladas e testadas empiricamente. Um programa torna-se degenerativo quando esses modelos deixam de produzir previsões novas corroboradas. Assim, embora os modelos tenham papel central na avaliação empírica, esse papel só se compreende em articulação com a estrutura teórica do programa.

3.3 Modelos em Bunge e na MPIC de Lakatos: aproximações e diferenças

As concepções de Mario Bunge e de Imre Lakatos sobre modelos científicos partem de premissas diferentes, mas convergem em alguns pontos centrais. Ambas reconhecem que os modelos exercem um papel mediador entre teoria e realidade e que sua construção é fundamental para o avanço do conhecimento científico. Todavia, diferem na forma como esses modelos devem ser concebidos e aprimorados.

3.3.1 Semelhanças e Diferenças

3.3.1.1 Semelhanças

Entre as semelhanças possíveis entre a concepção de modelos de Bunge e a interpretação aqui proposta do papel dos modelos na MPIC de Lakatos, destaca-se o reconhecimento de que os modelos ocupam uma posição central na prática científica, pois são construídos a partir de princípios teóricos e colocados à prova na investigação empírica. Embora Lakatos não tenha formulado explicitamente uma teoria dos modelos, sua análise dos programas de investigação científica permite compreender os modelos como instrumentos conceituais que operacionalizam compromissos teóricos, viabilizam previsões e orientam o confronto sistemático com os dados empíricos. Em ambas as perspectivas, os modelos são representações idealizadas da realidade; essa idealização, longe de constituir uma limitação, funciona como

uma condição metodológica que permite isolar aspectos relevantes dos fenômenos e favorecer o avanço do conhecimento científico.

Ambos os autores convergem que os modelos estão inseridos em um quadro teórico mais amplo. Para Bunge, esse quadro é a teoria geral que fornece a base conceitual e formal para o modelo teórico. Assim, um modelo só adquire valor explicativo e preditivo quando está integrado a uma teoria geral. Para Lakatos, na interpretação aqui sugerida, esse quadro é o núcleo firme – um conjunto de princípios básicos preservados por decisão metodológica – que serve de alicerce para a construção dos modelos, os quais são continuamente desenvolvidos e refinados pela heurística positiva, que orienta o programa de investigação na formulação de novas hipóteses capazes de ampliar seu poder explicativo e preditivo.

Outro ponto de aproximação entre as duas abordagens diz respeito à forma como os modelos lidam com pressupostos necessários para sua aplicação empírica. Na concepção de Bunge, o modelo teórico já é, desde o início, uma construção hipotético-dedutiva: ele inclui idealizações, condições de aplicação e hipóteses que fazem parte de sua própria estrutura conceitual. Não há, portanto, uma separação nítida entre modelo e hipóteses “auxiliares”, pois estas integram o próprio modelo.

Na Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Lakatos, por sua vez, esses pressupostos aparecem de modo mais explícito como elementos ajustáveis que permitem confrontar o programa com os dados empíricos. Eles podem ser modificados para acomodar dificuldades experimentais sem que o núcleo conceitual do programa seja abandonado. Assim, embora Bunge e Lakatos utilizem linguagens diferentes, ambos reconhecem que a confrontação empírica não ocorre diretamente no nível das teorias mais gerais, mas por meio de construções intermediárias que tornam a investigação científica operável e testável.

3.3.1.2 Diferenças

A diferença central entre a concepção de modelos em Bunge e a interpretação aqui adotada do papel dos modelos na MPIC de Lakatos não reside simplesmente no fato de que os modelos possam ser desenvolvidos, aperfeiçoados ou substituídos — aspecto que também está presente em Bunge —, mas no estatuto metodológico que cada autor atribui a essas transformações ao longo do processo científico. Em Bunge, a substituição ou o refinamento de modelos ocorre quando representações iniciais, limitadas à descrição das regularidades observáveis, revelam-se insuficientes para satisfazer objetivos explicativos mais exigentes,

sendo então paulatinamente substituídas por modelos que passam a incorporar a estrutura interna e os mecanismos responsáveis pelo comportamento do sistema estudado¹⁸. Esse movimento expressa um ganho em inteligibilidade e poder explicativo, preservando a coerência lógica e a integração com a teoria geral. Em Lakatos, por sua vez, os modelos são avaliados principalmente por sua função dinâmica no interior de um programa de investigação, isto é, por sua capacidade de promover o progresso histórico do programa em comparação com programas rivais, independentemente de seu grau explicativo intrínseco em um dado momento.

Embora Bunge reconheça a legitimidade de aproximações iniciais mais simples — como modelos de caixa negra ou descrições fenomenológicas —, ele os considera insuficientes como ponto de chegada. Seu projeto epistemológico é normativo: os modelos devem ser gradualmente substituídos por representações mais profundas, capazes de explicitar os mecanismos internos responsáveis pelo comportamento dos sistemas reais. Assim, para Bunge, o aperfeiçoamento dos modelos é orientado por critérios internos de racionalidade, explicação causal e compromisso ontológico com a estrutura da realidade, e não apenas por seu sucesso empírico imediato.

Na abordagem lakatosiana, tal como aqui interpretada, o foco desloca-se do rigor inicial do modelo para o desempenho global do programa de investigação. Modelos iniciais simplificados ou mesmo ingênuos não são vistos como metodologicamente problemáticos, desde que estejam inseridos em uma cadeia de desenvolvimento orientada pela heurística positiva. O refinamento dos modelos não é avaliado isoladamente, mas em função de sua capacidade de gerar previsões novas, resolver anomalias e fortalecer o núcleo firme do programa. Diferentemente de Bunge, Lakatos não exige que cada modelo, tomado individualmente, satisfaça altos padrões explicativos desde o início; o critério decisivo é se a sucessão de modelos torna o programa progressivo ou degenerativo.

Outra diferença relevante diz respeito à estrutura conceitual na qual os modelos se inserem. Embora ambos reconheçam que os modelos se inserem em um quadro teórico mais amplo, a principal distinção refere-se à natureza e ao papel metodológico desse quadro. Em Bunge, o modelo é sempre subordinado a uma teoria geral bem definida, que fornece os princípios formais e ontológicos que garantem sua inteligibilidade e validade científica. Já em Lakatos, os modelos operam no interior de programas de investigação, que não se reduzem a uma teoria isolada, mas incluem um núcleo firme, um cinturão protetor de hipóteses auxiliares e diretrizes heurísticas. Essa estrutura confere aos modelos um papel estratégico e histórico:

¹⁸ A substituição ou o refinamento de modelos serão aprofundados no Capítulo 4.

eles são instrumentos de exploração teórica cuja avaliação depende do desenvolvimento de longo prazo do programa, e não apenas de sua adequação imediata à teoria ou aos dados.

Por fim, há uma diferença de ênfase explícita no tratamento filosófico do conceito de modelo. Bunge dedica obras inteiras à análise sistemática dos modelos científicos, definindo cuidadosamente noções como objeto-modelo, modelo teórico e teoria geral. Lakatos, por sua vez, não formula uma teoria explícita dos modelos; seu papel é reconstruído a partir da análise histórica e metodológica dos programas de investigação. Essa diferença reforça o caráter interpretativo da comparação aqui proposta: enquanto em Bunge os modelos ocupam um lugar conceitualmente definido e normativo, em Lakatos eles emergem como elementos funcionais do processo científico, cuja importância deriva de seu papel no progresso racional da ciência.

3.3.2 Implicações epistemológicas

A comparação entre a concepção de modelo em Bunge e a interpretação aqui proposta do papel dos modelos na MPIC de Lakatos permite explicitar duas maneiras distintas de compreender o desenvolvimento do conhecimento científico. Em Bunge, o modelo é avaliado prioritariamente segundo critérios lógico-metodológicos rigorosos e encontra-se subordinado a uma teoria geral bem definida. Essa exigência expressa um ideal normativo de ciência, no qual a clareza conceitual, a coerência interna e o compromisso ontológico com a estrutura da realidade constituem condições fundamentais para o progresso científico.

Na perspectiva lakatosiana — tal como reconstruída neste trabalho — o foco desloca-se da avaliação isolada de modelos para a dinâmica histórica dos programas de investigação. Embora Lakatos não formule explicitamente uma teoria dos modelos, sua metodologia permite compreendê-los como elementos funcionais do desenvolvimento científico, integrados ao cinturão protetor e orientados pelas heurísticas positiva e negativa. Modelos e hipóteses não são julgadas individualmente, mas em função de seu papel no desempenho global do programa ao longo do tempo. Nesse contexto, a tolerância a inconsistências provisórias não configura um defeito metodológico, desde que o programa seja capaz de gerar novos problemas, previsões corroboradas e aprofundamentos teóricos.

Do ponto de vista epistemológico, essa comparação evidencia que as duas abordagens não são excludentes, mas ressaltam dimensões complementares da prática científica, cuja articulação será aprofundada no capítulo seguinte. Bunge oferece critérios normativos para a construção de modelos conceitualmente sólidos e ontologicamente comprometidos. Lakatos,

por sua vez, fornece instrumentos para compreender como esses modelos efetivamente se transformam, são testados e substituídos no curso histórico da ciência. Assim, a articulação entre ambas as perspectivas permite uma compreensão mais rica da relação entre teoria, modelo e realidade, combinando exigência racional, mediação modelar e historicidade no entendimento do progresso científico.

4. APLICAÇÕES DA DISCUSSÃO DE MODELOS DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA NA FÍSICA

Este capítulo tem como objetivo analisar, sob uma perspectiva filosófica, a prática científica na Física a partir do papel desempenhado pelos modelos científicos. Com base nas concepções discutidas nos capítulos anteriores, busca-se explicitar como modelos operam concretamente na investigação física, atuando como instrumentos de mediação entre teoria e sistemas reais, desempenhando um papel relevante nos processos de explicação, previsão e compreensão dos fenômenos físicos.

Em um primeiro momento, busca-se responder afirmativamente ao questionamento sobre se a transição do modelo de caixa negra para o modelo de caixa translúcida na Física indica amadurecimento científico. Para fundamentar essa resposta, inicia-se pela explicação das noções de modelos de caixa negra e de caixa translúcida segundo a concepção de Mario Bunge. Essa noção de modelos, de caixa negra e caixa translúcida, é adotada, para sustentar a argumentação, para examinar dois estudos de caso clássicos da Física: o modelo de uma mola helicoidal e o modelo do escoamento de um fluido. A análise concentra-se no processo de construção desses modelos, que se inicia com a idealização do sistema físico concreto que conduz à definição do objeto-modelo e, por meio de operações matemáticas apropriadas, culmina na formulação de um modelo teórico integrado a uma teoria geral. Esses modelos tornam-se passíveis de teste empírico, sendo aceitos na medida em que apresentam adequação satisfatória aos dados experimentais. A partir desse percurso, argumenta-se que, dentro de uma teoria geral consolidada, a transição de modelos do tipo *caixa negra* para modelos do tipo *caixa translúcida* constitui um indicador relevante de amadurecimento científico na Física, na medida em que envolve maior profundidade explicativa e um compromisso com a elucidação dos mecanismos subjacentes aos fenômenos investigados.

Em um segundo momento, o capítulo explora a possibilidade de interpretar o conjunto de modelos associados ao estudo das molas à luz da Metodologia dos Programas de Investigação Científica, proposta por Lakatos. Para esse fim, recorre-se de modo pontual à noção de *grupo-modelo*, introduzida por Chall (2020), entendida aqui apenas como um recurso terminológico útil para designar conjuntos articulados de modelos que compartilham princípios fundamentais e evoluem de maneira coordenada. O enquadramento conceitual e metodológico adotado permanece, contudo, essencialmente lakatosiano, sendo a proposta aplicada a um

domínio clássico da Física, no qual há uma teoria geral bem estabelecida, coexistindo com uma pluralidade de modelos que desempenham funções distintas.

Desse modo, o capítulo pretende mostrar que a análise filosófica dos modelos científicos não apenas esclarece aspectos centrais da prática científica real, como também oferece subsídios conceituais relevantes para o ensino de Física. Ao evidenciar o caráter representacional, provisório e explicativo dos modelos, essa abordagem contribui para uma compreensão mais crítica da ciência, afastando-se tanto de uma visão meramente instrumental quanto de uma concepção dogmática das teorias físicas.

O Capítulo 4 está organizado da seguinte forma: Na Subseção 4.1, discute-se a transição do modelo de caixa negra para o modelo de caixa translúcida na Física indica amadurecimento científico, para o qual é sustentando uma resposta afirmativa. Para embasar essa resposta, na Subseção 4.1.1 apresenta os conceitos de modelos de caixa negra e de caixa translúcida segundo a concepção de Bunge, tais conceitos são aplicados a dois estudos de caso da Física, a saber, da mola helicoidal e do escoamento de água, na Subseção 4.1.2. A relação entre a evolução desses modelos e o amadurecimento científico é discutido na Subseção 4.1.3; enquanto as Subseções 4.1.4 e 4.1.5 analisam, respectivamente, a importância epistemológica dos estudos de caso e suas contribuições para o Ensino de Física. Na Subseção 4.2, desenvolve-se a proposta do grupo-modelo de molas como um programa de investigação científica, à luz da metodologia de Lakatos, para o qual examina-se seu núcleo firme, sua cintura protetora e suas heurísticas. Ao final, nas Subseções 4.3.4 e 4.3.5, faz uma avaliação do programa como progressivo e uma discussão de sua importância epistemológica e suas implicações no ensino de Física.

4.1 A Transição do modelo de caixa negra para o modelo de caixa translúcida na Física indica amadurecimento científico?

Bunge (1974) afirma que existem diversas espécies de objeto-modelo e, consequentemente, de modelos teóricos¹⁹. Esses modelos podem ser situados em um espectro que vai desde representações extremamente simples, como a *caixa negra*, passando por modelo intermediários, como as *caixas cinzentas* com alguns estados internos, até os modelos de *caixa*

¹⁹Exemplo: No Quadro 2 da Seção 3.1.2, estudo do escoamento da água em uma tubulação, apresenta dois objetos-modelo, como resultado obtém-se dois modelos teóricos – modelo do fluido ideal e modelo do fluido viscoso

translúcida, que incorporam mecanismos internos mais detalhados. A diferença central entre eles está no grau em que consideram os processos ou mecanismos internos do sistema.

4.1.1 Modelos de caixa negra e modelos de caixa translúcida segundo de Bunge

Na sequência, apresentamos com mais detalhe os extremos desse espectro de modelos mencionados no parágrafo anterior.

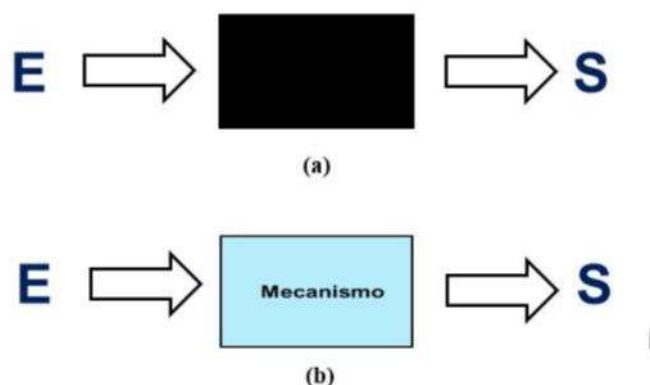
- i) *Modelos de caixa negra*: dotada somente de entradas e saídas, “que constituirá uma representação do comportamento global do sistema” (Bunge, 1974, p.19). São úteis quando o funcionamento interno é desconhecido, complexo ou irrelevante para o objetivo da investigação (ver Figura 5.a).

A simplicidade dos modelos de caixa negra e a falta de proposições sobre os mecanismos internos é destacado por Campomanes et al. (2022).

ii) *Modelos de caixa translúcida*: além de entradas e saídas, incluem hipóteses sobre a estrutura e o funcionamento interno do sistema. Incorporam entidades teóricas, muitas vezes não observáveis diretamente, e propõem mecanismos explicativos que conectam essas entidades ao comportamento observado (ver Figura 5.b).

Segundo Campomanes et al. (2022, p. 1), os modelos de caixa translúcida “englobam proposições sobre as estruturas internas do objeto ou evento representado, carregando hipóteses sobre os mecanismos que determinam o comportamento do sistema alvo”.

Figura 5 - Representação do modelo: (a) de caixa negra dotada somente de entrada (E) e saída (S); e (b) de caixa cinzenta ou translúcida, munida de mecanismo interno.



Fonte: elaborado pelo autor (2026)

Embora seja possível estabelecer uma analogia entre as classificações de teorias (Seção 2.1.3) e de modelos em Bunge, essa correspondência não deve ser entendida como uma identidade conceitual. Quando se fala em modelos de caixa negra ou de caixa translúcida, trata-se de diferentes graus de detalhamento representacional no nível da aplicação de uma teoria a sistemas concretos. Já a distinção entre teorias de caixa negra ou fenomenológicas e teorias de caixa translúcidas ou representacionais refere-se ao nível mais geral do arcabouço conceitual que fundamenta essas aplicações. Assim, modelos e teorias podem compartilhar um mesmo enfoque metodológico — seja descritivo do comportamento global, seja explicativo dos mecanismos internos —, mas se diferenciam quanto ao seu alcance e função: a teoria fornece a estrutura geral e abstrata, enquanto o modelo constitui uma representação específica e situada, construída para investigar, explicar ou testar aspectos delimitados de um fenômeno particular.

A escolha entre um tipo de modelo e outro depende dos objetivos da pesquisa. Como afirma Bunge [1974, p.21]: “Se se trata apenas de manejar um sistema, uma caixa negra poderá bastar; mas se se quer compreender seu funcionamento ou modificá-lo, serão necessários modelos mais profundos, apoiados em teorias gerais e em novas experienciais”.

4.1.2 A aplicação da noção bungeana de modelo

A seguir, examinamos dois estudos de caso que ilustram a aplicação da concepção bungeana de modelos científicos, entendidos como representações idealizadas que podem variar quanto ao grau de acesso aos mecanismos internos do sistema. Em particular, analisamos como modelos inicialmente mais simples podem ser progressivamente enriquecidos com hipóteses estruturais e causais, por meio da evolução do modelo de molas helicoidais e da transição de modelos não dissipativos para dissipativos no escoamento de água.

4.1.2.1 Transição do modelo teórico de uma mola helicoidal

O estudo do comportamento de molas helicoidais ilustra a passagem de um modelo de caixa negra para um modelo de caixa translúcida. Considere-se, segundo a nomenclatura de

Bunge, como o objeto real (Ver Figura 6.a), duas molas cilíndricas helicoidais do mesmo comprimento e feitas do mesmo material submetidas a cargas idênticas.

Pode-se representar o objeto-modelo do objeto real como duas molas, cada uma com sua extremidade superior fixa num suporte e a extremidade inferior tracionada pela mesma força F , de modo análogo ao ilustrado na Figura 7.a. Considera-se que ambas as molas apresentam comportamento elástico e operam em regime linear, de modo que suas respectivas elongações x são diretamente proporcionais à força F aplicada. Essa relação é expressa pela conhecida como a Lei Hooke:

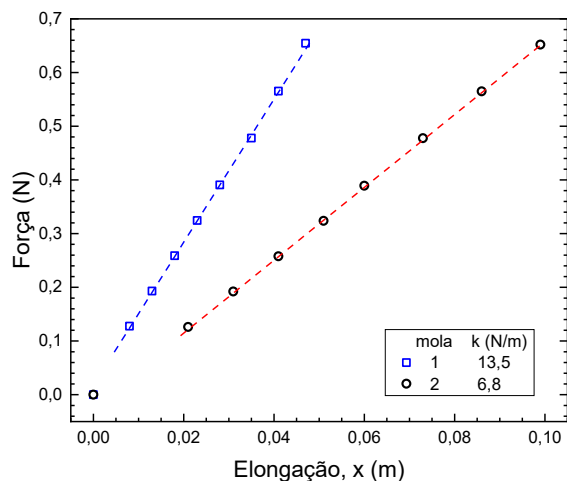
$$F = k \cdot x \quad (1)$$

Sendo k um parâmetro que mede o grau de elasticidade ou rigidez de uma mola.

Observe-se, partir da Figura 6.a, que as molas apresentam elongações diferentes: a mola 2 (direita) elonga mais que a mola 1 (esquerda). Este fato empírico permite concluir que a mola com menor elongação é mais rígida, possuindo, portanto, maior constante de mola k .

Para verificar a hipótese de regime linear, obtém-se diversos valores de força (carga aplicada no extremo inferior) e suas respectivas elongações para ambas as molas. Por meio do ajuste dos dados experimentais força em função da elongação, determina-se k como o coeficiente angular da reta (Figura 6.b). Esse procedimento caracteriza um modelo de caixa

Figura 6 - (a) Duas molas 1 (esquerda) e 2 (direita) suspensas por cargas de massas iguais, constituem o objeto-real; (b) gráfico da Força vs Elongação, observe-se que ambas as molas apresentam comportamento hookeano (relação linear entre força e deformação), caracterizando um modelo de caixa negra, pois descreve apenas a relação funcional entre variáveis observáveis. A inclinação da reta associada à mola 1 é maior do que a da mola 2; consequentemente k_1 é maior que k_2 .



(a)

(b)

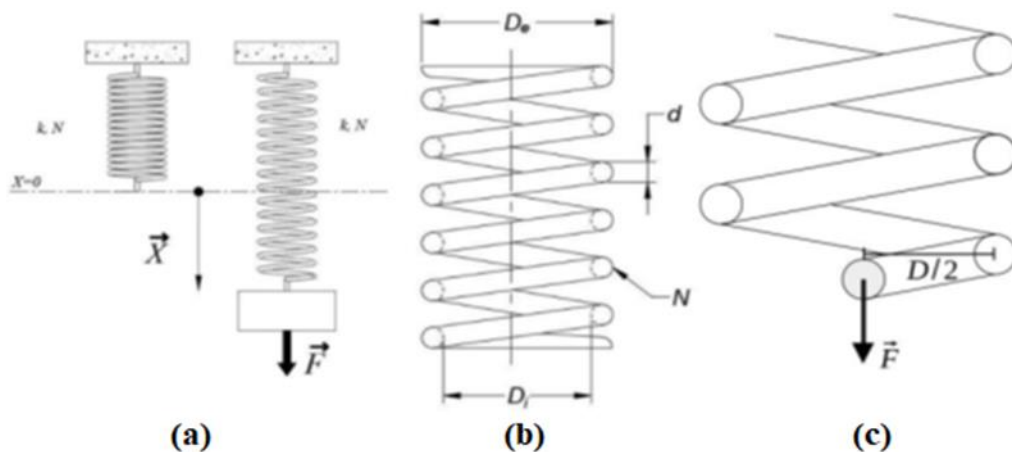
Fonte: Campomanes et al. (2022)

negra, pois se limita a descrever a relação funcional entre variáveis observáveis (entrada: força F ; saída: deformação x), sem oferecer qualquer explicação sobre os mecanismos internos que conferem determinada rigidez à mola.

Nesse sentido, esse modelo, construído a partir dos dados experimentais da Figura 6.b, apresenta limitações epistemológicas. Ele não responde a questões como: Por que uma mola é mais rígida que outra? De quais parâmetros físicos e geométricos depende a constante elástica? Tais perguntas exigem a construção de um modelo mais profundo, que introduza hipóteses sobre a estrutura interna do sistema, suas propriedades materiais e os mecanismos físicos responsáveis pelo comportamento elástico.

Para superar essa limitação, elabora-se um objeto-modelo que incorpora parâmetros geométricos da mola, como número de espiras (N), diâmetro do fio (d) e diâmetro da mola (D), representados na Figura 7.

Figura 7 - Em (a), representação de uma mola helicoidal sofrendo uma elongação $\vec{x}$ quando submetida a uma força $\vec{F}$. Em (b), são destacados da mola: o diâmetro externo e interno, D_e e D_i , o diâmetro d do fio, e o número de espiras N . Em (c), é ilustrado o ponto de aplicação de $\vec{F}$, o centro da mola, ele se distancia em $\frac{D}{2} = \frac{(D_i + D_e)}{4}$ do centro do arame da mola.



Fonte: Campomanes et al. (2022)

Assumem-se algumas idealizações, como desprezar a massa da mola, o atrito com o ar e as pequenas vibrações, com a hipótese que a mola é tratada como um sistema que sofre

esforços de cisalhamento e de torção quando esticadas. Mediante as considerações assumidas, o objeto-modelo é incorporado à teoria geral – a mecânica newtoniana –, que fornece as leis necessárias para analisar os esforços internos. A partir de operações matemáticas, é determinada a energia potencial U^{20} que a mola armazena e a partir desta, fazendo uso do Teorema de Castigliano²¹, deduz-se uma expressão que relaciona a elongação x à força aplicada F e aos parâmetros geométricos e materiais do sistema como o módulo de cisalhamento (G):

$$x = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3N}{d^4G} + \frac{2F^2DN}{d^2G} \quad (2)$$

Finalmente, a constante elástica é dada por²²:

$$k = \frac{d^4G}{8D^3N} \quad (3)$$

Essa relação evidencia que a constante elástica (k) depende diretamente das propriedades geométricas: diâmetro do fio (d), do diâmetro da mola (D) e do número de espiras (N), e do módulo de cisalhamento (G)²³ do material com que é feito a mola. Assim, k deixa de ser apenas uma constante ajustada empiricamente e passa a ser explicada por mecanismos internos fundamentados teoricamente.

Diferentemente do modelo de caixa negra, este modelo é classificado como de caixa translúcida, pois não se limita à descrição empírica das variáveis, mas incorpora um mecanismo interno representacional, que estabelece como as propriedades geométricas e materiais da mola determinam sua constante elástica. Assim, o modelo deixa de ser uma mera ferramenta preditiva e assume um papel explicativo, fundamentado em uma teoria geral bem estabelecida e em hipóteses mecanicistas.

4.1.2.2 Transição no escoamento de água: do modelo não dissipativo ao dissipativo

²⁰ A mola armazena energia potencial U devido a dois processos: cisalhamento transversal e de torção.

²¹ Relaciona o deslocamento de um ponto em uma estrutura elástica à derivada parcial da energia potencial U da estrutura em relação à força aplicada naquele ponto e naquela direção. É muito usado na análise estrutural para resolver problemas de estruturas estaticamente indeterminadas e determinar reações nos suportes, deslocamentos e rotações.

²² Os detalhes da obtenção desse modelo vão além do objetivo deste trabalho, para um detalhamento veja o artigo de Campomanes et al (2022).

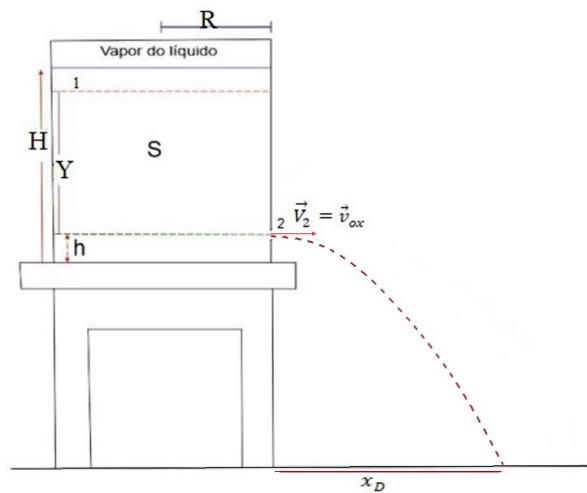
²³ Mede a resistência de um material à deformação por cisalhamento. Materiais com G alto (aço, cerâmica) resistem bem à deformação, mantendo a forma sob carga, úteis em estruturas e ferramentas. Materiais com G baixo (borracha, polímeros) deformam-se facilmente, absorvendo energia, ideais para amortecedores e isolamento.

Um segundo exemplo que ilustra a transição de modelos simplificados (de caixa negra ou de caixa cinzentas) para modelos mais sólidos (de caixa translúcida, com maior poder de transparência) refere-se ao estudo do escoamento de fluidos por um orifício lateral em um reservatório. Este exemplo, baseado no trabalho de Schisler et al. (2024), analisa criticamente a aplicação do modelo tradicional de escoamento intitulado “modelo de esvaziamento de um líquido de um recipiente” — amplamente adotado no ensino de Física — e propõe um modelo alternativo, mais realista, mais transparente que incorpora os mecanismos de dissipação de energia negligenciados no modelo tradicional. A motivação da autora decorre do fato de ser moradora da região norte do estado de Mato Grosso, um polo agrícola e pecuário. Ela relata que caixas de água, de grande volume são instaladas em muitas das chácaras e fazendas, posicionadas a mais de 7 metros de altura em relação ao solo. Anualmente, torna-se necessária a limpeza dessas caixas e, para isso, é preciso esvaziá-las.

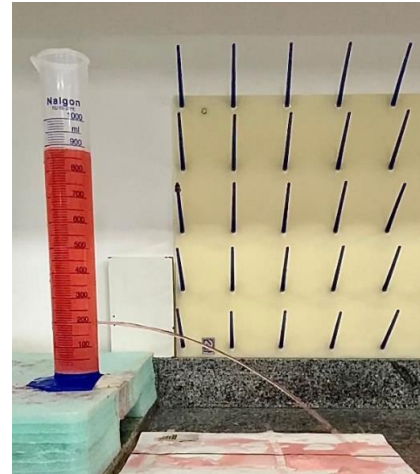
A. modelo não dissipativo

A situação física analisada consiste no escoamento de água por um orifício lateral em um recipiente, tal como mostrado na Figura 8.b, que corresponde ao sistema ou objeto real, segundo a terminologia de Bunge. Nos livros didáticos, este fenômeno é usualmente modelado por meio da equação de Bernoulli, que assume a conservação da energia mecânica do fluido, desconsiderando quaisquer perdas associadas a atrito viscoso, contração do jato ou tensão superficial. O objeto-modelo, entendido como a representação do sistema físico alvo, consiste num cilindro hipotético de raio R , apoiado sobre uma mesa ou suporte, ilustrado na Figura 8.a, onde H é a altura inicial do nível da superfície do líquido em relação à base de suporte.

Figura 8 - a) Objeto-modelo que representa o sistema físico real. O ponto 1 indica a superfície do líquido num dado instante e o ponto 2, a saída do líquido, e b) sistema físico ou objeto-real que escoar água no orifício lateral.



(a)



(b)

Fonte: Schisler et al. (2024)

Em uma primeira abordagem, considera-se as seguintes idealizações:

- i. o fluido é incompressível, isto é, sua densidade ρ permanece constante em qualquer elemento de volume do cilindro;
- ii. o fluido é não viscoso, de modo que se despreza a conversão da energia cinética do fluido em energia interna devido a forças viscosas, como aquelas associadas ao contato com as paredes do cilindro; e
- iii. não há turbulência no escoamento do fluido ao sair pelo orifício da saída.

Em seguida, de acordo a terminologia de Bunge, o objeto-modelo, junto às considerações assumidas, é inserido em uma teoria geral, a saber, a mecânica de fluídos, com a finalidade de determinar a vazão volumétrica, a velocidade de escoamento, a altura da superfície do líquido em função do tempo. A vazão volumétrica é tipicamente expressa pelo produto da área do orifício de saída pela velocidade do fluído:

$$\phi = AV = \pi r^2 \sqrt{2gY} \quad (4)$$

onde ϕ é a vazão volumétrica, A a área do orifício de raio r , V a velocidade de escoamento do fluído, g a aceleração da gravidade e Y a altura do nível de água em relação ao orifício (Figura 8.a). A equação diferencial associada, que descreve a evolução do nível de água no tempo, é:

$$\frac{dV_{\text{volume}}}{dt} = \frac{d}{dt} (\pi R^2 Y) = \phi \rightarrow \pi R^2 \frac{dY}{dt} = \pi r^2 \sqrt{2gY} \quad (5)$$

Onde R : raio do cilindro e r : raio do orifício de saída do fluido.

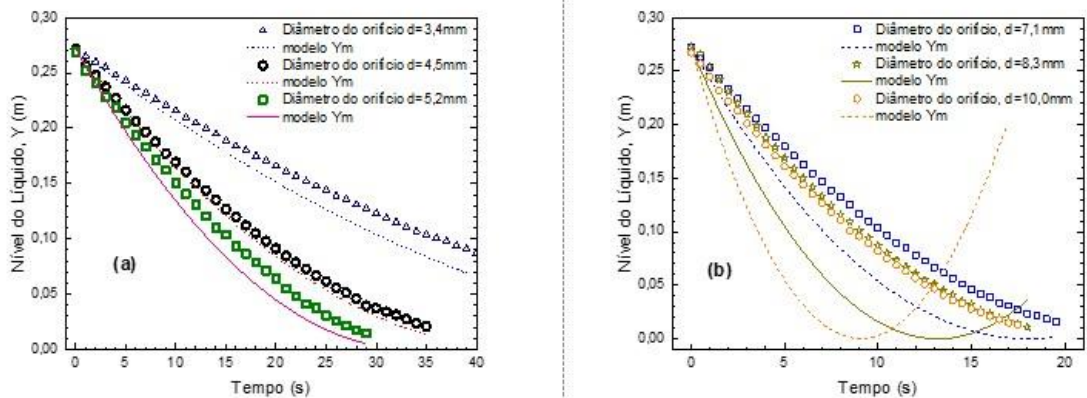
Resolvendo a equação diferencial, se obtém a altura Y da superfície da água em função do tempo.

$$Y = \left[\sqrt{H - h} - \sqrt{\frac{g}{2}} \left(\frac{r}{R} \right)^2 t \right]^2 \quad (6)$$

Para avaliar a adequação deste modelo não dissipativo, Schisler et al. (2024) realizaram experimentos controlados, nos quais o esvaziamento de uma proveta de 1 litro foi filmado e analisado (Figura 8.b). Foram utilizados orifícios de diferentes diâmetros, variando de 3,4 mm a 10 mm.

A Figura 9 apresenta os dados experimentais e as predições do modelo teórico o quais são obtidas através da Eq. 6, para diferentes diâmetros de orifício. Observa-se que, o modelo não dissipativo não reproduz de forma satisfatória os resultados experimentais. O melhor ajuste ocorre para o diâmetro de 4,5 mm, no qual a discrepância entre teoria e experimento é relativamente menor. Para diâmetros maiores ou menores do que esse valor, a capacidade descritiva do modelo diminui progressivamente, evidenciando suas limitações. Esses desvios sugerem que a hipótese de ausência de dissipação deixa de ser adequada e que efeitos dissipativos precisam ser incorporados para uma representação mais fiel do escoamento.

Figura 9 - Nível do líquido experimental e estimado pelo modelo (Eq. 5), em função do tempo para diversos diâmetros de orifício 2.



Fonte: Schisler et al. (2024)

O modelo tradicional, baseado exclusivamente na equação de Bernoulli, apresenta uma concordância razoável com os dados experimentais somente para o diâmetro de orifício de 4,5 mm, no qual os efeitos dissipativos são pouco relevantes. Nessas condições, o modelo é capaz de descrever adequadamente o comportamento global do escoamento. Contudo, se afasta desse regime, para valores diferentes desse diâmetro, as discrepâncias entre as previsões e os dados experimentais tornam-se sistemáticas. Nesses casos, o modelo não apenas perde poder preditivo, como também se mostra incapaz de oferecer esclarecimentos sobre os mecanismos responsáveis pela dissipação de energia no escoamento real. Por não incorporar entidades e processos internos — como efeitos viscosos, perdas de carga e contração do jato —, o modelo não é corroborado, tornando-se necessário ser expandi-lo.

Ou seja, essas limitações evidenciam a necessidade de um modelo mais elaborado, que incorpore explicitamente os mecanismos físicos ausentes na formulação idealizada. A passagem de um modelo não dissipativo para um modelo dissipativo não representa uma simples correção empírica, mas uma ampliação conceitual do objeto-modelo.

B. modelo dissipativo

Diante das limitações evidenciadas pelo modelo não dissipativo, Schisler et al. (2024) propõem um modelo expandido que incorpora os mecanismos de dissipação de energia inerentes ao escoamento real de fluidos. Este avanço não é meramente técnico, mas representa uma transição epistemológica significativa, ao substituir um modelo não dissipativo, opaco quanto à identificação de seus mecanismos internos, por um modelo mais transparente.

O objeto-modelo é reformulado, passando a considerar a altura da saída do fluido pelo orifício (ponto 2 - Figura 8.a) em relação ao piso, com o propósito de determinar o alcance do jato (x_D). Essa consideração é fundamental para a determinação das perdas de energia, para os quais se introduz o coeficiente de descarga (C_d), que incorpora um fator associado à contração do jato e outro relacionado à perda de energia cinética decorrente ao atrito viscoso.

Considera-se as seguintes idealizações:

- i. o fluido é incompressível, isto é, sua densidade ρ permanece constante em qualquer elemento de volume do cilindro;
- ii. há dissipação de energia associada ao atrito viscoso, devido ao contato do fluido com as paredes do cilindro, bem como a tensão superficial no orifício de saída; e

iii. ocorre contração do jato na saída do orifício.

Em seguida, mediante as considerações assumidas, o objeto-modelo é incorporado à teoria geral – a Mecânica dos Fluidos –, com a finalidade de reavaliar a vazão volumétrica, a velocidade de escoamento e a altura da superfície do líquido em função do tempo.

A equação da vazão volumétrica corrigida passa a ser expressa como:

$$\phi_{mc} = C_d \phi = C_A C_V \sqrt{2gY} \quad (7)$$

onde C_A representa o coeficiente de contração, relacionado à redução da seção transversal do jato, e C_V o coeficiente de velocidade, que incorpora as perdas de energia cinética do fluido. O coeficiente C_d resulta do produto de dois outros fatores:

$$C_d = C_A \cdot C_V \quad (8)$$

Mantendo o mesmo procedimento de modelagem anterior, a equação diferencial que rege a variação do nível de água Y ao longo do tempo, considerando agora os efeitos dissipativos, é:

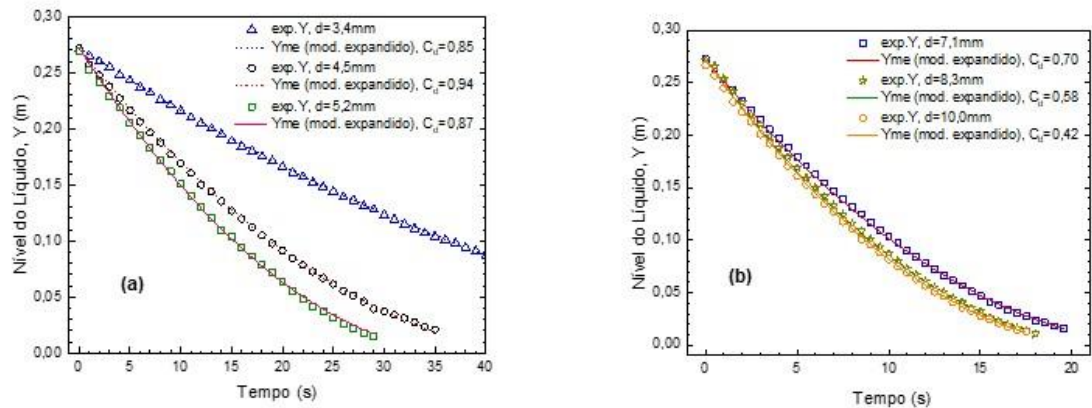
$$\phi_{mc} = \frac{dV}{dt} = -\frac{d(\pi R^2 Y)}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{dY}{dt} = -\frac{C_d \cdot r^2 \cdot \sqrt{2gY}}{R^2} \quad (9)$$

Resolvendo essa equação diferencial (9), obtém-se a expressão para o nível de líquido em função do tempo:

$$Y = \left[\sqrt{H - h} - C_d \sqrt{\frac{g}{2}} \left(\frac{r}{R} \right)^2 t \right]^2 \quad (10)$$

Este modelo expandido, cuja solução analítica está representada na Eq. 10, é submetido aos mesmos testes experimentais anteriormente realizados. A comparação entre os dados experimentais e as previsões do modelo dissipativo são apresentados na Figura 10. Observa-se que, diferentemente do modelo baseado exclusivamente na equação de Bernoulli, as curvas teóricas acompanham de forma consistente a evolução temporal do nível do líquido para todos os diâmetros de orifício analisados. A concordância entre modelo e experimento é mantida tanto para orifícios menores quanto para os maiores, indicando que a inclusão explícita dos efeitos dissipativos amplia significativamente o domínio de validade do modelo. Esse comportamento contrasta diretamente com os resultados apresentados na Figura 9, nos quais a adequação do modelo não dissipativo era restrita a um intervalo limitado de diâmetro, evidenciando o ganho simultâneo de poder preditivo e explicativo do modelo dissipativo.

Figura 10 - Nível do líquido obtido experimentalmente e estimado pelo modelo dissipativo (Eq. 9), em função do tempo, para diferentes diâmetros de orifício.



Fonte: Schisler et al. (2024)

A introdução do modelo dissipativo não representa apenas uma correção técnica pontual, mas uma mudança substantiva na qualidade epistemológica da modelagem. Enquanto o modelo anterior se limitava a estabelecer relações funcionais entre variáveis observáveis, o novo modelo incorpora explicitamente mecanismos físicos responsáveis pelas perdas de energia no escoamento real, como os efeitos viscosos e a contração do jato.

Essa transição do modelo não dissipativo para o modelo dissipativo é significativa por múltiplos motivos. Em primeiro lugar, ela explicita os limites das idealizações frequentemente adotadas na Física — como a hipótese de fluido ideal — ao mostrar que tais suposições são válidas apenas em regimes específicos. Em segundo lugar, evidencia que a eficácia da modelagem científica não reside na obtenção de descrições definitivas, mas na construção de representações provisórias, cujo alcance depende das hipóteses adotadas e do domínio empírico considerado. Por fim, reforça que o aprimoramento de um modelo não se reduz ao simples ajuste de curvas aos dados experimentais, mas envolve um enriquecimento conceitual do objeto-modelo, no qual mecanismos internos antes ignorados tornam-se parte explícita da explicação científica.

Além disso, esse caso ilustra um princípio do realismo científico de Bunge: os modelos científicos não são cópias exatas da realidade, mas construções conceituais que representam, de forma parcial e controlada, os mecanismos subjacentes aos fenômenos. Eles são, portanto, simultaneamente provisórios e indispensáveis na dinâmica de construção do conhecimento.

4.1.3 Evolução de Modelos e amadurecimento científico

A resposta à pergunta que intitula a Seção 4.1 é afirmativa. Para fundamentar a resposta adotaremos o maturamento das teorias científicas, conforme delineado por Bunge (Subseção 2.1.4). Recapitulando, Bunge (1974) associa a maturidade científica à superação da dependência exclusiva de teorias de caixa negra ou fenomenológicas, avançando para teorias de caixa translúcidas ou representacionais mais profundas. Ele usa a metáfora do volume geométrico (vide Figura 1) para descrever o crescimento científico;

- i) *Expansão em superfície* – ampliação do escopo sem alteração de fundamentos (ex.: aplicação das leis da mecânica celeste para descobrir exoplanetas);
- ii) *Expansão em profundidade* – introdução de novas entidades e leis fundamentais (ex. da mecânica clássica à mecânica quântica);
- iii) *Expansão em superfície e profundidade* – combinação ideal, exemplificada pela teoria de evolução, que uniu descobertas empíricas a avanços conceituais na genética e biologia molecular.

Bunge (1974) alerta que a expansão apenas em superfície leva ao esgotamento por falta de inovação, e a exclusiva em profundidade pode tornar-se especulativa. O amadurecimento ideal envolve: (i) hipóteses sobre entidades não observáveis; (ii) mecanismos explicativos que as conectem aos fenômenos; e (iii) organização lógica, preferencialmente axiomatizada.

Bunge (1974) destaca que, em qualquer ciência factual, observa-se uma tendência recorrente: a trajetória que se inicia pela organização dos dados, avança para a formulação de hipóteses fenomenológicas e, posteriormente, alcança hipóteses de mecanismo. À medida que a ciência amadurece, ela aprofunda seu escopo explicativo, incorporando um número crescente de hipóteses de mecanismo — desde que estas sejam logicamente coerentes e empiricamente plausíveis, isto é, não inteiramente improváveis.

Esse raciocínio, originalmente formulada para teorias, pode ser estendida diretamente à análise de modelos científicos. A maturação de um modelo, tal como a de uma teoria, dá-se quando este transita de uma simples relação entre entradas e saídas (modelo de caixa negra) para uma estrutura que representa, ainda que parcialmente, os mecanismos internos do sistema (modelo de caixa translúcida).

O exemplo, da Subseção 4.1.2.1, do modelo da mola helicoidal é elucidativo. Este começa com o comportamento da mola descrito por meio da Lei de Hooke, que estabelece uma relação linear entre força aplicada e deformação. Este modelo típico de caixa negra, permite determinar a constante elástica sem fornecer qualquer explicação sobre como parâmetros estruturais da mola – como o diâmetro do fio, o número de espiras ou o material – influenciam esse valor.

A passagem para um modelo de caixa translúcida ocorre quando se introduzem hipóteses sobre o comportamento interno da mola, como os efeitos de cisalhamento e torção do fio. O modelo resultante explicita que k depende diretamente de propriedades geométricas e do módulo de cisalhamento do material. Aqui, não se busca apenas descrever a relação empírica entre força e elongação, mas compreender como e por que essa relação emerge em termos de parâmetros do sistema investigado.

Situação análoga ocorre no estudo do escoamento de água por um orifício (ver Seção 4.1.2.2). O modelo tradicional, fundamentado na equação de Bernoulli, assume a conservação da energia e desconsidera qualquer forma de dissipação. Na prática experimental, verifica-se que esse modelo falha em representar adequadamente o comportamento do sistema físico.

O modelo dissipativo, por sua vez, incorpora o coeficiente de descarga (C_d), que sintetiza as perdas associadas à viscosidade e à contração do jato. Esse modelo, ao representar explicitamente os mecanismos de dissipação, não apenas melhora a aderência aos dados experimentais, como também aprofunda a compreensão dos processos físicos subjacentes, tornando-se, portanto, epistemicamente mais sólidos.

Em ambos os casos se observam claramente que a transição para um modelo mais transparente ou profundo implica:

- a) A introdução de variáveis internas ou não diretamente observáveis;
- b) A formulação de hipóteses sobre mecanismos;
- c) O aumento do rigor matemático e conceitual.

Os exemplos discutidos — da mola e do escoamento de um fluido — mostram que o amadurecimento científico não se limita ao aperfeiçoamento de técnicas ou à obtenção de melhores ajustes empíricos. Trata-se de um processo epistemológico profundo, no qual os modelos evoluem de representações superficiais, que apenas correlacionam variáveis, para estruturas teóricas que buscam capturar os mecanismos subjacentes dos fenômenos. Modelos

simples mantêm validade em domínios específicos, enquanto modelos mais elaborados ampliam o poder explicativo da ciência. A transição não elimina o valor dos modelos de caixa negra, como afirma Bunge (1974, p.68) “caixas negras são necessárias, mas não suficientes”.

4.1.4 Importância epistemológica dos modelos da mola helicoidal e do escoamento de água

Os dois estudos de caso analisados neste capítulo — o modelo da mola helicoidal e o modelo do escoamento de água — permitem analisar, de maneira concreta, a relevância epistemológica dos modelos científicos na Física, conforme a concepção proposta por Bunge. Longe de constituírem meros instrumentos auxiliares, os modelos assumem, nessa perspectiva, um papel central na mediação entre teorias gerais e sistemas reais, possibilitando tanto a descrição de comportamentos observáveis quanto a explicação dos mecanismos internos responsáveis por tais comportamentos. Os dois exemplos examinados evidenciam como a modelagem científica se desenvolve por meio de idealizações progressivamente enriquecidas, refletindo um processo de amadurecimento do conhecimento.

No estudo da mola helicoidal, o ponto de partida é um modelo simples, baseado na relação empírica linear entre força aplicada e deformação — a conhecida lei de Hooke. Esse modelo pode ser caracterizado como um modelo de caixa negra, pois descreve adequadamente o comportamento global do sistema a partir de variáveis observáveis, sem recorrer a hipóteses sobre sua estrutura interna. Do ponto de vista epistemológico, tal modelo é plenamente legítimo dentro de um domínio restrito de validade: ele permite medições, previsões e aplicações práticas, como a determinação da constante elástica de uma mola. Contudo, sua capacidade explicativa é limitada, uma vez que não responde a questões sobre a origem física da rigidez da mola nem sobre os fatores geométricos e materiais que a determinam.

A transição para modelos mais elaborados da mola — que incorporam propriedades como o módulo de cisalhamento, o diâmetro do fio, o número de espiras e a geometria da mola — representa um salto epistemológico relevante. Nesse estágio, o objeto-modelo é enriquecido com entidades teóricas não observáveis diretamente, e o modelo passa a explicar por que molas distintas apresentam constantes elásticas diferentes. Segundo a tipologia de Bunge, trata-se de uma passagem de um modelo de caixa negra para um modelo de caixa translúcida, no qual os mecanismos internos do sistema tornam-se parcialmente acessíveis à explicação científica. Essa

evolução ilustra com clareza a tese bungeana de que o amadurecimento científico não se limita à descrição de regularidades, mas envolve a explicitação de mecanismos causais subjacentes.

O caso do escoamento de água apresenta uma dinâmica epistemológica análoga, embora em um contexto físico distinto. O modelo inicial baseado na equação de Bernoulli, adota hipóteses idealizadas, como a suposição de um fluido ideal que desconsidera efeitos dissipativos. Esse modelo descreve de forma razoável o comportamento global do sistema apenas para um determinado diâmetro de orifício, no qual as perdas de energia são pouco relevantes. Nessa situação específica, o modelo fornece uma previsão adequada do nível do líquido em função do tempo, desempenhando satisfatoriamente sua função descritiva. Trata-se, portanto, de um modelo simplificado, adequado para fins de predição do comportamento global do sistema físico, mas opaco à compreensão e explicação dos processos internos responsáveis pelo escoamento.

Entretanto, à medida que se varia o tamanho do orifício do sistema físico, o modelo se afasta-se desse regime idealizado e suas limitações tornam-se evidentes. As discrepâncias sistemáticas entre predições e dados experimentais revelam não apenas uma perda de poder preditivo, mas também uma insuficiência explicativa: o modelo não oferece qualquer compreensão dos processos responsáveis pela dissipação de energia no escoamento real. A introdução de um modelo dissipativo, que incorpora explicitamente efeitos viscosos e contração do jato, constitui uma ampliação conceitual do objeto-modelo. O modelo dissipativo pode ser caracterizado como um modelo de caixa translúcida, ele não apenas descreve a relação entre as variáveis de entrada e saída — nível do líquido e tempo —, mas também introduz entidades e processos internos que explicam a dinâmica observada.

Essa transição dos modelos não dissipativos a dissipativos não é uma mera correção empírica, mas uma mudança qualitativa no tipo de representação científica adotada, reforçando o caráter epistemológico — e não apenas técnico — do refinamento do modelo. Dessa forma, o modelo dissipativo ultrapassa a descrição do modelo não dissipativo e passa a oferecer uma representação mais profunda do sistema físico, ilustrando com clareza o processo de amadurecimento científico discutido ao longo deste trabalho.

Em suma, a importância epistemológica dos estudos de caso não se limita a aprimorar a compreensão de um fenômeno físico específico, mas oferece também uma lição epistemológica: em uma teoria geral consolidada, a ciência avança não apenas pela acumulação de dados, mas, sobretudo, pela construção de modelos que tornam visíveis os mecanismos

ocultos da realidade, revelando, ao mesmo tempo, o caráter representacional, provisório e crítico do conhecimento científico.

4.1.5 Contribuições dos estudos de caso para o ensino de Física

O estudo do modelo teórico da mola helicoidal evidencia, de forma exemplar, como a concepção de modelagem de Bunge pode enriquecer o ensino de Física ao ultrapassar descrições meramente funcionais entre variáveis observáveis (entrada: força F ; saída: deformação: x). A Lei de Hooke, usualmente apresentada em livros didáticos como uma relação funcional entre força e elongação, opera como um modelo de caixa negra, no qual os mecanismos responsáveis pela rigidez da mola permanecem ocultos. Embora esse modelo possua valor introdutório, ele limita a ampliação da compreensão conceitual dos estudantes, ao não permitir responder questões como: por que uma mola é mais rígida que outra? De quais parâmetros físicos e geométricos da mola depende a constante elástica?

Ao propor um modelo teórico que incorpora elementos estruturais do sistema — como tensões internas e parâmetros geométricos — o estudo promove a transição para um modelo de caixa translúcida, no sentido bungeano. Do ponto de vista didático, isso possibilita que os estudantes compreendam que a constante elástica não é um parâmetro arbitrário, mas resulta de uma estrutura intrínseca do material.

Além disso, a previsão do valor da constante elástica, a partir do modelo de caixa translúcida, pode ser facilmente obtida para uma mola real com determinados valores de raio R , espessura d do fio e número de espiras, os quais podem, posteriormente ser contrastados experimentalmente. Esse contraste empírico do modelo fortalece a noção de que a validade de um modelo depende tanto de sua coerência teórica quanto de sua adequação ao sistema real investigado. Esse tipo de abordagem favorece uma aprendizagem que integra conceitos físicos, matemática e reflexão epistemológica.

No escoamento de água por orifícios, a contribuição para o ensino reside justamente na explicitação dos limites de um modelo amplamente difundido tanto na educação básica quanto no ensino superior: o modelo não dissipativo derivado da equação de Bernoulli. Longe de ser descartado, esse modelo possui importante valor didático, pois permite uma primeira descrição do comportamento global do escoamento sob hipóteses idealizadas, como a negligência de efeitos dissipativos. No entanto, ele é frequentemente apresentado como suficiente para

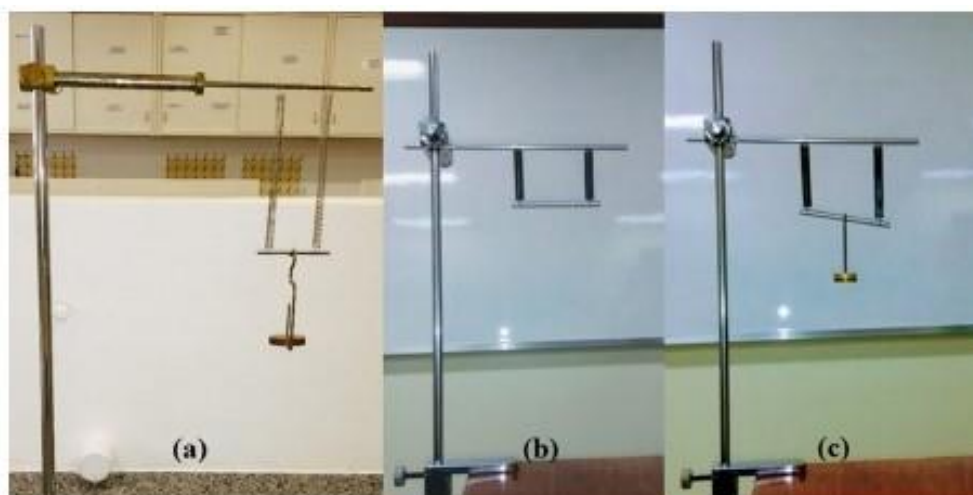
descrever o fenômeno, sem uma análise crítica de suas idealizações e de seu domínio de validade (Halliday, Resnick e Walker, 2016; Tipler e Mosca, 2019). Os resultados experimentais mostram que o modelo fornece previsão adequada apenas em uma situação específica, para determinado diâmetro de orifício, nos quais as perdas de energia são pouco significativas. À medida que essas condições deixam de ser satisfeitas, surgem discrepâncias sistemáticas entre as previsões teóricas e os dados experimentais, evidenciando as limitações do modelo e a necessidade de expandi-lo.

A introdução de um modelo dissipativo, que incorpora coeficientes associados a perdas de energia, representa uma ampliação conceitual do objeto-modelo, nos termos de Bunge. Como mencionado no parágrafo anterior, os modelos não dissipativos mantêm sua utilidade do ponto de vista didático e podem ser expandidos quando se mostram insuficientes. A análise comparativa entre os modelos permite que os estudantes compreendam a diferença entre ajuste empírico e explicação causal, além de reconhecerem o papel das entidades teóricas não observáveis na construção de modelos mais robustos.

Outro estudo, Campomanes et al., (2020), ainda não discutido neste trabalho, sobre a associação de molas em paralelo aprofunda essa problemática ao questionar um modelo clássico frequentemente tratado como padrão nos livros didáticos. Nesses livros, a associação de duas molas em paralelo é comumente abordada por meio de um modelo teórico segundo a qual a constante elástica equivalente de duas molas em paralelo corresponde à soma das constantes elásticas individuais. Como todo modelo científico, essa formulação apoia-se em idealizações que delimitam seu domínio de validade. Em particular, assume-se que, sob a ação de uma força externa, as molas associadas sofrem a mesma deformação (Ver Figura 11.a). Esse pressuposto raramente problematizado no ensino, pode conduzir a uma compreensão acrítica do modelo.

Ao explicitar tal idealização e investigar experimentalmente situações em que ela não se sustenta (Ver Figura 11.c), o estudo evidencia de maneira clara o conceito de domínio de validade dos modelos (Campomanes et al., 2020).

Figura 11 - Duas molas de mesmo comprimento suspensas em um suporte e conectadas em seu extremo inferior por uma fina haste. As molas ficaram, então, associadas em paralelo. No centro dessa haste foi pendurada uma carga. Em (a) se considera iguais deformações das molas 1 e 2, para valores de $k_1 \approx k_2$. Se $k_1 \neq k_2$, em (b) a haste fica na posição horizontal quando não há carga suspensa, e em (c) se inclina quando há carga.



Fonte: Campomanes et al. (2020)

A expansão do modelo clássico para contemplar situações em que as molas apresentam deformações distintas (Ver Figura 11.c) ilustra como modificações controladas nas hipóteses podem ampliar o alcance explicativo do modelo sem abandonar o arcabouço teórico da mecânica clássica. Do ponto de vista do ensino de Física, esse exemplo mostra-se particularmente fecundo, pois evidencia que a modelagem científica envolve decisões racionais sobre quais idealizações adotar, quase aspectos incluir e até que ponto um modelo pode ser legitimamente aplicado.

Considerados em conjunto, esses estudos de caso reforçam a ideia central de Bunge de que a ciência avança por meio da construção, avaliação e refinamento de modelos, e não pela simples aplicação mecânica de leis. No contexto educacional, eles evidenciam os riscos da adoção acrítica de modelos bastantes simplificados, que, ao ocultarem suas próprias idealizações, transmitem uma visão empobrecida da ciência como um conjunto de fórmulas prontas e universais.

Ao contrário, a abordagem baseada na modelagem científica permite que o ensino de Física incorpore explicitamente discussões sobre representação, idealização e explicação. Atividades experimentais deixam de ter um caráter meramente confirmatório e passam a funcionar como instâncias de avaliação das hipóteses assumidas nos modelos. Essa mudança favorece uma compreensão mais sofisticada da natureza da ciência, alinhada com a prática científica real.

Para o praticante da ciência normal²⁴, a concepção bungeana de modelagem destacada nesses estudos enfatiza que o progresso científico não consiste em eliminar idealizações, mas em torná-las explícitas e progressivamente mais informativas. Nesse contexto, a passagem de modelos de caixa negra para modelos de caixa translúcida representa um amadurecimento epistemológico no interior de um mesmo quadro teórico, no qual mecanismos internos passam a ser incorporados de modo racional e testável.

Assim, tanto no ensino quanto na pesquisa, a modelagem científica, segundo Bunge, revela-se uma ferramenta privilegiada para articular teoria e realidade, promovendo não apenas a aprendizagem de conceitos físicos, mas também a formação de uma compreensão crítica e epistemologicamente fundamentada do conhecimento científico.

4.2 Grupo-modelo de molas como programa de investigação científica

Nesta subseção, inspiramo-nos diretamente na Metodologia dos Programas de Investigação Científica (MPIC) de Lakatos (1978) para analisar o conjunto de modelos associados ao estudo das molas como um programa de investigação científica. A esse conjunto articulado de modelos nos referiremos como “grupo-modelo” de molas, adotando a nomenclatura proposta por Chall (2020), quem foi o primeiro a empregar sistematicamente o termo *grupo-modelo*²⁵ na literatura filosófica de física de partículas contemporânea.

É importante esclarecer, desde o início, que Chall não constitui aqui o eixo conceitual da análise. Sua contribuição é mobilizada apenas no que diz respeito à terminologia e à ideia de agrupar modelos correlacionados. O enquadramento epistemológico, metodológico e avaliativo permanece essencialmente lakatosiano. Assim, o objetivo desta subseção é aplicar a MPIC de Lakatos à análise da prática científica baseada em modelos, em um domínio clássico da Física: o estudo das molas.

²⁴ No sentido proposto por Thomas Kuhn (2017).

²⁵ Chall (2020) introduz a expressão *grupo-modelos* no contexto de estudos de fronteira da ciência, como a física de partículas, para designar conjuntos articulados de modelos científicos, fundamentado na MPIC de Lakatos. Ele aplica essa abordagem do grupo-modelo para analisar a dinâmica dos modelos na busca por uma física *Beyond the Standard Model* (BSM), especialmente no contexto do mecanismo de quebra espontânea de simetria eletrofraca (também conhecido como mecanismo de Higgs). Ela apresenta dois estudos de caso: a Supersimetria (SUSY), e os Modelos de Higgs Composto.

Em diversos projetos mecânicos, as molas desempenham papel fundamental na absorção de energia, no controle de movimento, no armazenamento de força e no amortecimento de vibrações (Boresi, Schmidt, Sidebottom, 1993; Norton, 2013). Existe uma grande variedade de tipos de molas: helicoidais, de compressão, de tração, de torção, prato, molas planas e outras variantes. Cada uma delas com características geométricas e funções específicas. Essa diversidade de formas e aplicações fornece a base empírica ideal para a constituição de um grupo-modelo, pois permite investigar, de modo articulado diferentes representações e funções dentro de um mesmo princípio físico. Ressalta-se, também, que as molas são amplamente utilizadas em atividades de ensino e pesquisa em cursos de Física, Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais, entre outros, o que reforça sua relevância didática e científica.

O interesse por estudar o tema das molas, como mencionado acima, deve-se ao seu caráter transversal por envolver diferentes áreas do conhecimento, além de sua importância em diversas aplicações tecnológicas, ainda que não se trate de uma área de ponta da física. Existem outros temas transversais que abrangem numerosos modelos e que também poderiam ser concebidos como programas de investigação científica; contudo, a escolha das molas mostra-se particularmente pertinente por ser uma área que tenho certa familiaridade, tendo trabalhado nos recentes anos na elaboração de modelos e na publicação de trabalhos relacionados ao ensino de Física.

As molas, em suas diversas formas (helicoidais, de lâmina, de torção ou de compressão), são sistemas elásticos que armazenam e liberam energia. Seu comportamento é descrito, de modo geral, por leis empíricas e teóricas que associam deformação e força, sendo a Lei de Hooke o ponto de partida. Contudo, os estudos recentes sobre molas avançam para além desse modelo clássico, incorporando análises dinâmicas, não lineares, e o uso de novos materiais – um processo que evidencia o papel dos modelos como ferramentas para o progresso científico e tecnológico.

Essa evolução contínua na modelagem das molas revela um campo conceitualmente rico e metodologicamente fértil, em que múltiplas formulações coexistem e se articulam. Nesse sentido, torna-se possível compreender o conjunto desses modelos não apenas como variações isoladas, mas como partes de uma mesma estrutura teórica – um grupo-modelo em formação.

Dessa forma, o grupo-modelo de molas aqui proposto pode ser visto como um programa lakatosiano, composto por diferentes modelos empíricos e teóricos que evoluem em torno de um núcleo firme (os princípios invariantes da elasticidade e armazenamento de energia),

protegidos por uma cintura protetora, formada pelas variações de materiais, geometrias e métodos experimentais. A seguir detalharemos os elementos do grupo-modelo de molas: o núcleo firme, a cintura protetora, as heurísticas positiva e negativa. Por fim, comentaremos a situação atual em que essa teoria de molas se encontra dentro de seu desenvolvimento científico.

4.2.1 Núcleo Firme

De acordo com o esquema lakatosiano, o núcleo firme de um programa de investigação científica é constituído por hipóteses fundamentais que os pesquisadores decidem não abandonar, mesmo diante de dificuldades empíricas. Essas hipóteses não são submetidas diretamente a testes; ao contrário, são protegidas por um conjunto de hipóteses auxiliares e modelos específicos que compõem o chamado cinturão protetor.

No caso do grupo-modelo de molas, o núcleo firme pode ser caracterizado por um conjunto relativamente estável de pressupostos físicos e ontológicos, amplamente aceitos na mecânica clássica e na engenharia. Entre eles, destacam-se:

1. *Princípio da elasticidade reversível* – toda mola armazena energia potencial elástica proporcional à deformação, retornando ao estado inicial quando a força é removida. Esse princípio encontra sua formulação clássica na Lei de Hooke, que funciona como idealização fundamental do comportamento elástico.
2. *Conservação de energia mecânica* – a mola é tratada como um sistema conservativo²⁶ em que a energia armazenada pode ser integralmente restituída, ignorando perdas dissipativas em primeira aproximação.
3. *Relação força-deformação contínua e previsível*²⁷ – há uma correspondência funcional entre carga e deslocamento, que pode ser modelada matematicamente.

Esses princípios, descritos por Norton (2013, cap. 14) e formalizados nos modelos de Marghitu (2019) sobre sistemas de vibração e elementos de máquina, constituem a base conceitual sobre a qual se organiza o conjunto de modelos subsequentes. Mesmo diante da

²⁶ É um sistema no qual atuam apenas forças conservativas, como a força peso e a força elástica, entre outros. Nesses sistemas, o trabalho realizado por qualquer dessas forças em um percurso fechado é igual a zero.

²⁷ Dentro de certos limites, a força necessária para esticar uma mola é diretamente proporcional à deformação sofrida por ela. O termo ‘contínua’ indica que essa relação não tem saltos ou interrupções.

introdução de novos materiais (cerâmicos, compósitos ou poliméricos), essas bases permanecem.

Do ponto de vista epistemológico, o núcleo firme do grupo-modelo de molas expressa a crença de que a regularidade elástica é uma propriedade universal de certos materiais adequadamente configurados. Assim, qualquer novo modelo deve conservar essa ontologia: molas são sistemas elásticos reversíveis e quantificáveis.

4.2.2 Cinturão Protetor

O cinturão protetor é composto pelos modelos individuais que refletem esses princípios do núcleo firme, variando parâmetros e condições experimentais. No grupo-modelo de molas, essa cintura é particularmente rica e diversificada, refletindo a ampla gama de aplicações das molas na Física e na Engenharia.

Entre os modelos que compõem esse cinturão protetor, podem ser incluídos:

- i) *Modelos de molas helicoidais metálicas*, que servem de base para aplicações clássicas de compressão e torção (Norton, 2013). Dentro desses modelos, enquadra-se o modelo elaborado pelo autor desta dissertação (ver Seção 4.1.2.1), que determina a constante elástica k , dependente do módulo de cisalhamento, do diâmetro do arame, bem como do diâmetro e do número de espiras da mola.
- ii) Modelos de molas não lineares, que incorporam efeitos de plasticidade, atrito e histerese.
- iii) Modelos de molas cerâmicas²⁸, propostos por Barbieri (2011) e Rocha (2018), que exploram a substituição de ligas metálicas por materiais cerâmicos sinterizados, visando maior resistência térmica e estabilidade estrutural.
- iv) Modelos de sistemas dinâmicos com molas múltiplas (Marghitu, 2019), que estudam o comportamento acoplado e as frequências naturais de vibração.

²⁸ Um dos usos das molas de cerâmica ocorre nos discos de embreagem de veículos de alto desempenho, que têm a função de absorver impactos e vibrações. O material cerâmico oferece maior resistência ao calor e à abrasão, o que a torna adequada para suportar altos níveis de torque.

Cada um desses modelos constitui uma instância empírica do programa, sugerindo novas formulações matemáticas ou novas formas de armazenamento de energia elástica.

Quando um modelo não corresponde aos dados (por exemplo, uma mola cerâmica que se rompe antes de atingir a deformação prevista), ele é ajustado ou reformulado, mas o princípio da elasticidade reversível permanece intacto. Isso ilustra o comportamento do cinturão protetor em programas de investigação progressivos.

4.2.3. *Heurísticas positivas e negativas*

As heurísticas são as diretrizes metodológicas que orientam o desenvolvimento do grupo-modelo.

- a) Entre as heurísticas positivas do grupo-modelo de molas, destacam-se: *i) Explorar novos materiais*: ou seja, buscar alternativas ao aço convencional, como cerâmicas térmicas (Rocha, 2018), ligas de titânio, ou compósitos com fibras, ampliando o campo de aplicabilidade das molas; *ii) Desenvolver modelos computacionais e analíticos*: aplicando métodos numéricos – como o método dos elementos finitos – para prever o comportamento sob cargas variáveis, o que é relevante para futuras aplicações práticas (Norton, 2013; Marghitu, 2019, Yan et al., 2024); *iii) Investigar regimes não lineares*, de difícil eliminação, como efeitos térmicos, viscoelásticos e plásticos, de modo a aproximar o modelo das condições reais de operação; *iv) Integrar molas em sistemas mecânicos complexos*, dada sua ampla importância e utilidade em suspensões automotivas, próteses mecânicas e sistemas de absorção de energia, aprofundando o conhecimento a respeito das molas.

Essas diretrizes incentivam a expansão do programa, tanto em superfície (novas aplicações) quanto em profundidade (modelos conceitualmente mais ricos).

- b) Por outro lado, entre as heurísticas negativas do grupo-modelo de molas, assinalam-se: *i) Não abandonar o princípio de reversibilidade elástica*, mesmo diante de falhas experimentais; *ii) Evitar extrapolações empíricas sem fundamentação física*, mantendo coerência com os princípios da conservação de energia e da relação força-

deformação; iii) *Preservar o caráter mecânico da mola*, evitando generalizações conceituais que descaracterizem seu papel como sistema elástico.

Essas restrições asseguram a estabilidade conceitual do programa e protegem seu núcleo firme contra revisões arbitrárias.

4.2.4 Avaliação do Programa: Progressivo ou Degenerativo?

Segundo Lakatos (1978), um programa é progressivo quando suas modificações teóricas antecedem e explicam novos resultados empíricos; torna-se degenerativo quando apenas reage a anomalias por meio de ajustes *ad hoc*.

À luz desses critérios, o grupo-modelo de molas pode ser caracterizado como predominantemente progressivo pois amplia seu conteúdo teórico e empírico ao incorporar novos materiais e técnicas de modelagem. O desenvolvimento de molas cerâmicas e híbridas representa uma expansão empírica e de ideias significativas. Os experimentos relatados por Rocha (2018) e Barbieri (2011) indicam avanços concretos na resistência térmica e na durabilidade, abrindo novos campos de aplicação. Com a incorporação de modelos computacionais e analíticos (Marghitu, 2019; Norton, 2013; Yan *et al.*, 2024) ampliou a capacidade de previsão e controle do comportamento dinâmico das molas.

Embora existam linhas de pesquisa mais conservadoras, que se limitem em ajustes numéricos de modelos já existentes, sem propor novas hipóteses estruturais — o que poderia indicar tendências degenerativas locais —, o programa como um todo mantém vitalidade teórica e relevância prática. Ele continua produzindo previsões, orientando experimentos e ampliando seu domínio de aplicação, características centrais de um programa progressivo.

4.2.5 Importância epistemológica do grupo-modelo de molas e implicações para o ensino de Física

Do ponto de vista epistemológico, o grupo-modelo de molas constitui um exemplo particularmente elucidativo de como a MPIC pode ser aplicada à análise da prática científica baseada em modelos. Diferentemente de uma visão linear ou acumulativa da ciência, essa abordagem evidencia a coexistência de estabilidade e mudança, conservação e inovação.

Contudo, ao contrário de exemplos históricos clássicos — como o caso da mecânica newtoniana —, nos quais a MPIC é mobilizada principalmente para analisar a sucessão temporal de modelos ao longo do desenvolvimento científico, o grupo-modelo de molas torna explícita a coexistência simultânea de diferentes modelos, funcionalmente articulados, que compartilham um mesmo núcleo conceitual, mas operam sob idealizações distintas. Nesse sentido, o exemplo evidencia uma dimensão da prática científica menos explorada pela MPIC em sua formulação mais padrão: a organização racional de conjuntos de modelos complementares, utilizados de forma coordenada conforme objetivos explicativos, empíricos ou didáticos. Assim, o progresso científico não se manifesta apenas na substituição ou refinamento histórico de modelos, mas também na ampliação e reorganização de grupos-modelo que permanecem ativos dentro de um mesmo arcabouço teórico.

Para o ensino de Física, a introdução explícita da noção de grupo-modelo tem implicações pedagógicas específicas. Ela permite que os modelos não sejam apresentados como esquemas isolados ou como aplicações automáticas de leis gerais, mas como alternativas articuladas dentro de um mesmo programa de investigação. Nesse enquadramento, os estudantes aprendem que modelos distintos podem coexistir e ser mobilizados conforme o fenômeno analisado, o nível de idealização adotado e o objetivo da explicação. Modelos mais simples não são descartados quando surgem versões mais refinadas, mas reconhecidos como válidos dentro de domínios bem definidos, o que favorece a compreensão crítica do papel dos modelos na construção do conhecimento físico.

Desse modo, o estudo das molas deixa de ser apenas um tópico técnico e passa a funcionar como um laboratório epistemológico, no qual se torna visível a dinâmica da ciência tal como descrita por Lakatos: uma prática orientada por núcleos teóricos duráveis, protegidos por modelos que podem ser modificados, refinados ou abandonados. Esse deslocamento contribui para uma compreensão mais rica e crítica do conhecimento científico, aproximando o ensino de Física da prática efetiva da investigação científica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tese central defendida nessa dissertação sustenta que a análise filosófica da prática científica na Física, apoiada em estudos de caso de modelos como evidência concreta e orientada pela concepção de modelos de Mario Bunge e pela Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Imre Lakatos, permite compreender o papel relevante desempenhado pelos modelos científicos na construção do conhecimento, atuando como pontes necessárias entre teorias abstratas e fenômenos observáveis.

A interpretação do papel dos modelos na Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Lakatos possibilitou compreender como eles operam dinamicamente no interior dos programas de investigação, orientados por heurísticas e avaliados segundo seu caráter progressivo ou degenerativo. Nesse contexto, realizou-se uma análise epistemológica inspirada na MPIC, na qual o conjunto de modelos associados ao estudo das molas (o grupo-modelo de molas), oriundos de pesquisas na Física e nas Engenharias, foi interpretado como um programa de investigação científica. Por sua vez, a concepção de modelos de Mario Bunge mostrou-se particularmente fecunda para a análise epistemológica dos estudos de caso da mola helicoidal e do escoamento de fluido, evidenciando que o amadurecimento científico não consiste na eliminação das idealizações – inevitáveis em qualquer modelagem física –, mas na transição de modelos meramente descritivos para representações idealizadas mais abrangentes, capazes de incorporar mecanismos internos relevantes e ampliar o poder explicativo dos modelos. Dessa forma, o trabalho contribui para uma compreensão mais refinada do papel dos modelos na explicação científica e oferece subsídios conceituais tanto para a Filosofia da Ciência quanto para o ensino de Física.

No Capítulo 2, foram examinadas as concepções de ciência de Mario Bunge e de Imre Lakatos, com ênfase em seus compromissos comuns com o realismo científico, a racionalidade, a objetividade e a falibilidade do conhecimento. Em Bunge, destacou-se a defesa de uma ontologia científica clara e o entendimento do método científico como orientação racional para a investigação, e não como um conjunto de regras infalíveis. Em Lakatos, analisou-se sua crítica ao falsificacionismo estrito de Popper e ao risco relativista presente em certas leituras de Kuhn, culminando na proposta de uma racionalidade histórica baseada na comparação entre programas de investigação rivais. Essa discussão forneceu o arcabouço conceitual necessário para compreender a ciência como uma atividade simultaneamente racional, histórica e falível, preparando o terreno para a análise específica do papel dos modelos nos capítulos seguintes.

O Capítulo 3 aprofundou a discussão sobre os modelos científicos a partir da concepção sistemática de Bunge e da interpretação de seu papel no âmbito da MPIC de Lakatos. Em Bunge, os modelos científicos ocupam uma posição subordinada às teorias, mas desempenham, ao mesmo tempo, um papel mediador entre a teoria e os fenômenos que elas pretendem explicar. Caracterizados como construções hipotético-dedutivas integradas a teorias gerais, os modelos cumprem a função de tornar operacionais as abstrações teóricas, conectando-as a situações concretas e empiricamente testáveis. Em Lakatos, embora não haja uma teoria explícita dos modelos, mostrou-se possível reconstruir seu papel como elementos estratégicos do desenvolvimento científico, sobretudo no interior do cinturão protetor dos programas de investigação. Essa análise evidenciou que os modelos não devem ser avaliados isoladamente, mas em função de sua contribuição para o progresso histórico de um programa como um todo.

A articulação entre essas duas perspectivas permitiu mostrar que Bunge e Lakatos não oferecem abordagens concorrentes, mas complementares. Enquanto Bunge fornece instrumentos conceituais para analisar a estrutura interna dos modelos e seu grau de maturidade explicativa, Lakatos oferece uma compreensão histórica de como esses modelos surgem, são modificados e, eventualmente, substituídos. Essa complementaridade revelou-se especialmente frutífera para interpretar processos de aprimoramento científico, nos quais modelos iniciais, marcados por idealizações fortes e limitações explicativas, são progressivamente refinados à medida que novos objetivos cognitivos e empíricos são estabelecidos.

No Capítulo 4, essa articulação filosófica foi aplicada a estudos de caso da Física, com destaque para os modelos da mola helicoidal e do escoamento de água. À luz da concepção bungeana, esses exemplos evidenciaram um processo de amadurecimento epistemológico caracterizado pela ampliação do conteúdo explicativo e pela incorporação gradual de mecanismos internos relevantes, sem que isso implicasse o abandono das idealizações que tornam a modelagem possível. O avanço científico foi interpretado, assim, não como a substituição pura e simples de modelos simplificados, mas como o reconhecimento de seus limites e o desenvolvimento de construções teóricas mais ricas quando as exigências explicativas da investigação assim o demandam.

Sob a perspectiva lakatosiana, a reconstrução conceitual do grupo-modelo de molas permitiu interpretá-lo como um programa de investigação científica estruturado em torno de um núcleo firme — associado aos princípios da elasticidade linear e da conservação de energia — e de um cinturão protetor composto por modelos que variam materiais, geometrias e regimes de validade. Essa análise indicou que a MPIC pode ser aplicada de modo produtivo à

compreensão de práticas científicas consolidadas, desde que se reconheça a centralidade dos modelos na dinâmica interna dos programas de investigação.

Do ponto de vista epistemológico, os resultados desta dissertação reforçam a ideia de que os modelos ocupam um lugar relevante na prática científica da Física, a qual avança não apenas pela acumulação de dados, mas, sobretudo, pela construção de modelos que tornam visíveis os mecanismos ocultos da realidade, revelando, ao mesmo tempo, a natureza representacional, provisória e crítica do conhecimento científico. Ao articular a estrutura racional dos modelos com sua evolução histórica, a aproximação entre Bunge e Lakatos evita tanto a redução dos modelos a meras ferramentas heurísticas quanto a sua interpretação como aproximações provisórias desprovidas de conteúdo explicativo.

No âmbito do ensino de Física, essa interpretação tem implicações significativas. Ao compreender os modelos como construções provisórias, sujeitas a revisão, refinamento e substituição, evita-se a adoção acrítica de modelos excessivamente simplificados, que tendem a ocultar suas idealizações e a transmitir uma visão empobrecida da ciência como um conjunto de fórmulas prontas. Uma abordagem centrada na modelagem científica permite tratar explicitamente questões de representação, idealização e explicação, fazendo com que atividades experimentais deixem de ser meramente confirmatórias e passem a avaliar hipóteses assumidas nos modelos. A introdução da noção de grupo-modelo reforça essa perspectiva, ao mostrar que diferentes modelos podem coexistir, sendo mobilizados conforme o fenômeno, o nível de idealização e os objetivos explicativos.

Em síntese, esta dissertação mostrou que o estudo filosófico dos modelos científicos, quando articulado a uma concepção histórica e racional do avanço científico, contribui para uma compreensão mais precisa da prática científica. Ao integrar a concepção sistemática de modelos de Mario Bunge com a Metodologia dos Programas de Investigação Científica de Imre Lakatos, o trabalho oferece subsídios teóricos tanto para a Filosofia da Ciência quanto para reflexões sobre a prática e o ensino da Física, reafirmando o papel significativo dos modelos na explicação, no desenvolvimento e na transmissão do conhecimento científico.

REFERÊNCIAS

ALLAN, Leslie. **Imre Lakatos and a Theory of Rationality**. Melbourne: RationalRealm.com, 2016.

BARBIERI, Rodrigo Antônio. **Influência da temperatura de sinterização nas propriedades mecânicas de molas de alumina injetadas em baixa pressão**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, 2011.

BORESI, A.P.; SCHMIDT, R.J.; SIDEBOTTON, O.M. **Advanced Mechanics of Materials** (John Wiley & Sons, New York, 1993), 5 ed.

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

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica de fenômenos físicos e o ensino de física. **A Física na Escola**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 10-14, maio 2008.

BUNGE, Mario. **La Ciencia, su Método y su Filosofía**. Buenos Aires: Ediciones Siglo Veinte, 1972.

BUNGE, Mario. **Method, Models and Matter**. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1973.

BUNGE, Mario. **Teoria e Realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974.

BUNGE, Mario. **Ciência e Desenvolvimento**. Belo Horizonte: Ed. Itatiaia; e São Paulo: Editora da USP (1980)

BUNGE, Mario. **Treatise on Basic Philosophy. Volume 6: Epistemology & Methodology II: Understanding the World**. Dordrecht: Reidel, 1983.

BUNGE, Mario. **Racionalidad y Realismo**. Madrid: Alianza Editorial, 1985.

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

BUNGE, Mario. **El Problema Mente cerebro: un Enfoque Psicobiológico**. São Paulo: Tecnos, 2002.

BUNGE, Mario. **O Realismo Científico de Mario Bunge**. Rev. Filos., Aurora, Curitiba, v. 29, n. 46, p. 353-361, 2017.

CABARET, J. e DENEGRÍ, G. The Scientific Research Programmes of Lakatos and Applications in Parasitology. **Parasite**, 2008, 15, 501-505.

CAMPOMANES, R.R.; HEIDEMANN, L.A.; VEIT, E.A. Modelo de associação de molas em paralelo em atividades de ensino de Física: uma análise do domínio de validade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 42, e20190076 (2020).

CAMPOMANES, Ricardo Robinson; HEIDEMANN, Leonardo Albuquerque; FRARE, Vitória Luiza Fernandes. Do que depende a constante elástica de uma mola? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 44, e20220165, 2022.

CARTWRIGHT, N. **The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science**. Cambridge: Cambridge University Press. 1999.

CHALL, Cristin. Model-groups as scientific research programmes. **European Journal for Philosophy of Science**, 10:6, 2020.

CHALMERS, ALAN F. **O que é ciência afinal?** São Paulo: Brasiliense, 1993.

CUSHING, James T. Model Building in Physics. In: PSA: **Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association**, Vol.1 1982.

DOUG, Kennard (2008) "A Nuanced Lakatos Philosophy of Theology and Science," **The Proceedings of the International Conference on Creationism**: Vol. 6, Article 6. Available at: https://digitalcommons.cedarville.edu/icc_proceedings/vol6/iss1/6

DUARTE, M.C. Analogias na educação em ciências: contributos e desafios. **Investigações em Ensino de Ciências** 10, 7, 2005.

FRIGG, Roman. **Models and theories: a philosophical inquiry**. New York, NY Routledge, 2023.

FRIGG, Roman and HARTMANN, Stephan. Models in Science. In: Edward N. Zalta & Uri Nodelman (org.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, Spring 2023 Edition. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/archives/win2025/entries/models-science/>.

FRIGG, Roman; MCKENZIE, J. Alexander; HUDETZ, Laurenz; RÉDEI, Miklós; ROSS, Lewis and WORRALL, John. Proofs and Research Programmes: Lakatos at 100. In: Otávio Bueno (org) **Studies in Epistemology, Logic, Methodology, and Philosophy of Science Volume 498**, Springer 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-88213-5>

GIERE, Ronald N. **Explaining Science: A Cognitive Approach**. Chicago: University of Chicago Press (1988).

GONG, W; ASPATWAR, A; WANG, S; PARKILLA; WU, X. SARS-CoV-2 variants and COVID-19 vaccines: Current challenges and future strategies. **International Reviews Of Immunology**. 20, 1938550 (2022).

HACKING, Ian. Imre Lakatos's Philosophy of Science. **Canadian Journal of Philosophy**, v. 9, n. 2, 1979.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HARTMANN, Stephen. Models as a Tool for Theory Construction: Some Strategies of Preliminary Physics. In: William Herfel, Władysław Krajewski, Ilkka Niiniluoto & Ryszard

Wójcicki (org.). **Theories and Models in Scientific Processes**. Rodopi, Amsterdam: Poznan Studies in the Philosophy of Science and the Humanities 1995, p. 49.

HESSE, M. Models and Analogy in Science. In: EDWARDS, P. (ed.). **Encyclopedia of Philosophy**. New York: Macmillan, 1967, p. 354359.

KOPERSKI, Jeffrey. Models. **Internet Encyclopedia of Philosophy** (2006). Disponível em: <https://iep.utm.edu/models/>.

KUHN, Thomas. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 2017.

LAKATOS, Imre. **Proofs and Refutations: The Logic of Mathematical Discovery**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.

LAKATOS, Imre. **Falsificação e Metodologia dos Programas de Investigação Científica**. Lisboa: Edições 70, 1978.

MAHNER, Martin and BUNGE, Mario. **Foundations of biophilosophy**. Berlin: Springer Verlag (1997).

MARGHITU, Dan B. **Mechanical Engineer's Handbook**. Amsterdam: Elsevier, 2019.

MUSGRAVE, Alan; PIGDEN, Charles. *Imre Lakatos*. In: Edward N. Zalta & Uri Nodelman (org.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, Spring 2023 Edition. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2023/entries/lakatos/>.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

POPPER, Karl. **Conjecturas e Refutações**. Lisboa: Edições 70, 1982.

ROCHA, Rafael Cicero Penha. **Processamento de molas helicoidais de alumina por gelcasting e caracterização do limite de tensão de ruptura em ensaio de compressão uniaxial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2018.

SCHISLER, Jessica; VEIT, Eliane Angela; HEIDEMANN, Leonardo Albuquerque e CAMPOMANES, Ricardo Robinson. E se a energia não se conserva? Um estudo sobre o escoamento d'água em um recipiente por meio de um orifício circular. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 46, e20240227, 2024.

SILVEIRA, Fernando Lang da. Metodologia dos programas de Pesquisa: a epistemologia de Imre Lakatos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.13, 3, 1996.

TIPLER, P.A. e MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**, v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

WILLIAMS, Daniel Grant. Knowledge capital theory: a critical analysis using Lakatos' idea of research programmes. **Compare**, 2023, v. 53, n. 1, 105–122.

YAN, Zhengfeng; WU, Bingbing; GAO, Xinming; XIANXU, Bai. Características de engate/desengate da embreagem de mola de diafragma do tipo tração para veículos comerciais pesados. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**. V. 37, 124, 2024.