CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

A CONSTRUÇÃO DE MODELOS NO ENSINO DE FÍSICA: DA REALIDADE À CONCEITUALIZAÇÃO

Juliana Machado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutorado em Ciência, Tecnologia e Educação.

Orientador: Marco Antônio Barbosa Braga

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

A CONSTRUÇÃO DE MODELOS NO ENSINO DE FÍSICA: DA REALIDADE À CONCEITUALIZAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de doutora em Ciência, Tecnologia e Educação.

Juliana Machado

Banca Examinadora:

Presidente, Professor Dr. Marco Braga (CEFET/RJ) (orientador)

Professora Drª. Rosária Justi (UFMG)

Professor Dr. Gabriel Dias Carvalho Junior (IFMG)

Professora Drª. Alcina Maria Testa Braz da Silva (CEFET/RJ)

Professora Drª. Andréia Guerra (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M149 Machado, Juliana
A construção de modelos no ensino de física : da realidade à conceitualização / Juliana Machado.—2017.
253f. + apêndices : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Tese (Doutorado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 234-253
Orientador : Marco Antônio Barbosa Braga

1. Física (Ensino médio) – Estudo e ensino. 2. Ciência – Filosofia. 3. Teoria do conhecimento. I. Braga, Marco Antônio Barbosa (Orient.). II. Título.

CDD 530.07

Essa tese é dedicada aos meus alunos e aos meus professores, por darem sentido e motivação ao meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Bruno, pela paciência durante os últimos anos, pela compreensão das minhas ausências em função das atribuições requeridas pelo trabalho de produção de uma tese, pelo incentivo à minha qualificação profissional e pelos conselhos e auxílios sobre pesquisas empíricas.

Dedico um grande agradecimento aos professores do PPCTE pelo muito que me ensinaram. Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Marco Braga por aceitar uma orientanda desconhecida, recém-chegada ao Rio. Muito obrigada, Marco, por acreditar em mim, por confiar no meu trabalho, por seus conselhos e orientações, por me incentivar a buscar novos desafios e por todo seu apoio.

Tenho uma enorme gratidão à Profª. Drª. Andreia Guerra pelos muitos ensinamentos, pela acolhida no CEFET e, principalmente, pelo exemplo de profissional a ser seguido. Agradeço também ao Prof. Dr. Álvaro Chrispino, por seu trabalho como coordenador do PPCTE, pelas lições de profissionalismo e vida acadêmica e por sua gentileza e sensibilidade de sempre. Ainda entre os professores do PPCTE, destaco minha gratidão à Profª. Drª. Gloria Queiroz, por sua análise e por suas sugestões sobre uma versão preliminar do protocolo das entrevistas, pelos empréstimos de livros, por compartilhar comigo um pouco de sua valiosa experiência na pesquisa sobre aprendizagem científica e por sempre me incentivar academicamente.

Sou muito grata a todos os meus alunos do CEFET/RJ por tudo que me ensinam, pela parceria, pelo reconhecimento e pelo afeto. Em particular, agradeço imensamente àqueles que dedicaram parte do seu tempo, fora do horário de aulas, para participar voluntariamente dessa pesquisa. Sem a participação de vocês, esse trabalho não teria sido possível.

Agradeço também à coordenadora de Física, Elika Takimoto, e a todos os meus colegas professores da coordenação de Física do Ensino Médio-Técnico do CEFET/RJ campus Maracanã, pela aprovação do meu afastamento de um ano, necessário para a conclusão dessa tese. Também os agradeço pela parceria cotidiana, pelas trocas de experiências,

pela compreensão com o uso do laboratório nessa pesquisa e pela acolhida quando do meu ingresso no CEFET.

Tenho muito a agradecer a Anaximandro, Elizandro e Rudiney, pelas cuidadosas análises das entrevistas. A contribuição fundamental de vocês, apesar das muitas atividades profissionais de todos e do seu tempo ser tão escasso, jamais será esquecida.

Agradeço muito à Profª. Drª. Rosária Justi pelo esmerado trabalho de exame crítico dessa tese. Suas recomendações realmente contribuíram para melhorar significativamente a qualidade desse trabalho.

Um grande agradecimento ao Prof. Dr. Alberto Cupani, por digitalizar e enviar para mim um artigo de sua autoria sobre a filosofia de Mario Bunge, o qual não se encontrava disponível em nenhuma base de dados.

Agradeço aos amigos do Clube dos Anjos pela amizade, pelo apoio, por tantas vezes estarem ao meu lado, mesmo estando longe.

Não poderia terminar essa seção sem registrar minha profunda gratidão àqueles professores que, mesmo não tendo participação direta nesse meu curso de Doutorado, possibilitaram meu caminho até aqui. Dentre esses, destaco nominalmente o Prof. Dr. Nelson Canzian da Silva e o Prof. Dr. Demétrio Delizoicov, por inspirarem minha paixão pelo ensino e pelo muito que me ensinaram. E, é claro, não poderia deixar de mencionar minha imensa gratidão ao Prof. Dr. José de Pinho Alves Filho, por ter me incentivado a cursar o doutorado e a seguir a carreira acadêmica e por ter me ensinado a meticulosidade e o esmero no trabalho, o exercício constante da autocrítica e a coragem para enfrentar novos desafios.

RESUMO

Nesse estudo investiga-se relações entre elementos do processo de modelização transpostos a partir da epistemologia de Mario Bunge e componentes constitutivos de esquemas de estudantes de Física do Ensino Médio para o enfrentamento de situações durante a conceitualização do campo conceitual da dinâmica da partícula. Desenvolve-se um referencial teórico de análise a partir de aproximações entre a Teoria dos Campos Conceituais de G. Vergnaud e a transposição da perspectiva de M. Bunge sobre a construção de modelos para a modelização no Ensino de Física. Para acessar os conhecimentos-em-ação dos estudantes, são realizadas entrevistas clínicas, organizadas em três ensaios experimentais e das quais participaram dez sujeitos com idades entre quinze e dezoito anos. Os resultados obtidos, vistos à luz do referencial teórico desenvolvido, indicam um acoplamento entre determinadas situações e a utilização de determinados conceitos-em-ação na condição de objetos-modelo por parte dos sujeitos, a existência de uma gradatividade de idealização nos conceitos-em-ação mobilizados em cada situação e, além disso, uma baixa flexibilidade cognitiva desses conceitos. Em adição, conclui-se que os sujeitos tendem a elaborar modelos teóricos pouco representacionais e a não reconhecer espontaneamente a via teórica como possibilidade para a construção de modelos no enfrentamento das situações propostas.

Palavras-chave: Modelização; Conceitualização; Teoria dos Campos Conceituais; Ensino de Física; Entrevista Clínica.

ABSTRACT

In this study we investigate relationships between elements of the modeling process transposed from Mario Bunge's epistemology and the constituent components of thought schemes of high school students when facing situations related with the conceptual field of particle dynamics. A theoretical framework is developed based on approximations between G. Vergnaud's Theory of Conceptual Fields and the transposition of the M. Bunge's perspective on the construction of models in science for modeling in physics teaching. To access students' knowledge-in-action, clinical interviews were implemented, organized in three experimental trials and attended by ten subjects between the ages of fifteen and eighteen years old. The results, seen in the light of the theoretical framework developed, indicate a coupling between certain situations and the use of certain concepts-in-action as model objects by the subjects, the existence of a gradation of idealization in the concepts-in-action used in each situation and, in addition, a low cognitive flexibility of these concepts. Moreover, it is concluded that the subjects tend to elaborate theoretical models that are little representational and that they do not spontaneously recognize the theoretical way as a possibility for the modeling when facing the proposed situations.

Keywords: Modelling; Conceptualization; Theory of Conceptual Fields; Physics Teaching; Clinical Interview.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO....12

Problema de Pesquisa....22

CAPÍTULO 1. CONTRIBUIÇÕES DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA PARA A COMPREENSÃO DOS MODELOS CIENTÍFICOS....24

1.1 Da visão sintática aos modelos como artefatos epistêmicos....25

1.2 Abstrações e Idealizações....36

1.3 A Modelização à luz da epistemologia de Mario Bunge....44

1.4 Sobre a escolha do referencial de Mario Bunge....51

CAPÍTULO 2. MODELOS NO ENSINO DE CIÊNCIAS....57

2.1 Algumas visões na literatura do ensino de ciências....58

2.1.1. Modelos matemáticos....67

2.1.2 Modelos como analogia....72

2.1.3. Modelos como artefatos....77

2.2 Discussão e posição própria....81

CAPÍTULO 3. A CONCEITUALIZAÇÃO NO CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO: APORTES PARA O ESTUDO DA ELABORAÇÃO INDIVIDUAL DE MODELOS....89

3.1. A proposta da Redescrição Representacional....94

3.1.1 Possíveis contribuições da RR à compreensão do processo de Conceitualização na Educação Científica....102

3.2. A TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS....109

3.2.1. Esquemas e situações....112

3.2.2 Alguns usos da Teoria dos Campos Conceituais na literatura do ensino de ciências....120

3.3 Detalhamento dos objetivos da pesquisa....128

3.4. O papel da modelização no processo de Conceitualização: Aproximações e distanciamentos entre as visões de Bunge e Vergnaud sobre a apropriação do conhecimento....129

CAPÍTULO 4. ASPECTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS DA PESQUISA 138
4.1 PESQUISA QUALITATIVA.....138
4.2 A ENTREVISTA CLÍNICA.....139
4.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS.....142
4.3.1 O instrumento.....143
4.3.2 Aplicação do instrumento e registro dos dados.....153
4.4 Sobre os participantes.....154
4.5 Análise dos dados.....157
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....162
5.1 PRIMEIRO ENSAIO: PÊNDULO SIMPLES.....162
5.1.1 Relacionando variáveis.....162
5.1.2 Centro de massa.....176
5.1.3 O isocronismo.....819
5.1.4 Relação teórico-empírico.....184
5.2 SEGUNDO ENSAIO: CAIXINHA NO PLANO INCLINADO.....188
5.2.1 Centro de Massa.....188
5.2.2 Relação teórico-empírico.....198
5.3 TERCEIRO ENSAIO: LANÇAMENTO HORIZONTAL.....203
5.3.1 O Atrito e a inércia.....203
5.3.2 Centro de massa.....208
5.3.3 Relação teórico-empírico.....211
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES.....219
6.1 Sobre os elementos do processo de modelização na conceitualização dos estudantes.....220
6.1.1 Objetos-modelo: massa e sua distribuição.....220
6.1.2 Modelos teóricos e teorias gerais.....224
6.2 Contribuições para o ensino de Física e para a pesquisa em Ensino.....228

REFERÊNCIAS.....234
APÊNDICE A - Protocolo das Entrevistas.....254
APÊNDICE B - TCLE.....259
APÊNDICE C - Protocolo para análise dos juízes.....262

INTRODUÇÃO

Em um sentido amplo, o objetivo essencial do empreendimento científico pode ser pensado como uma busca pela apropriação conceitual da realidade (BUNGE, 1974a). No caso da Física, os fenômenos de interesse podem ser próximos ou distantes; observáveis ou não-observáveis; familiares ou contra-intuitivos; em todos os casos, a abordagem científica tem se mostrado como um triunfo extraordinário do pensamento humano. Em contraste, os conhecimentos científicos escolares vem amargando um constante fracasso na tentativa de adquirir significado e relevância na perspectiva dos estudantes na Educação Básica. Longe de ser um problema novo, essa situação infelizmente tem se tornado quase uma tradição na prática escolar do Ensino de Física. Nas palavras de Matthews:

> Curiosamente enquanto a Ciência mantém-se como o empreendimento humano mais bem sucedido da modernidade, o Ensino de Ciências apesar dos esforços realizados, atravessa uma crise que ao que parece não encontra justificação na Ciência em si. Antes disso, parece ter na educação científica, tal como tem sido realizada, a responsável pela baixa qualidade das aulas e pela conseqüente aversão e distanciamento dos alunos, bem como o número cada vez menor de professores qualificados na área (MATTHEWS 1995, p.106).

Embora a situação tenha sido descrita por Matthews há mais de vinte anos, dificilmente se poderia afirmar que a prática escolar, em média, tenha sofrido grandes melhorias nesse sentido. Para Pietrocola (1999), esse fracasso percebido na educação científica escolar pode ser compreendido ao observarmos a ausência de elementos da realidade vivencial dos estudantes entre os conteúdos de conhecimentos escolares, pois, na sua forma de apresentação tradicional, o conhecimento científico trabalhado em sala de aula muitas vezes não gera explicações para os fenômenos naturais presentes na realidade percebida pelos estudantes. O autor aponta assim a necessidade de re-inserir esses elementos da realidade na prática de sala de aula como um objetivo importante para favorecer a apropriação do conhecimento científico. Nessa perspectiva, a articulação entre o domínio empírico e os processos de abstração necessários à

construção do conhecimento (domínio teórico) é considerada essencialmente um processo de *modelização* (PIETROCOLA, 1999).

Por que falar de modelização no ensino?

Em sua crítica ao então recentemente publicado projeto Nuffield, Gebert (1969) apela somente à sua própria experiência docente para afirmar que, de forma geral, os estudantes de nível secundário não são capazes de compreender e trabalhar apropriadamente com modelos, principalmente por que os veem como "realidades físicas". Atribuindo essa percepção a uma imaturidade dos estudantes e temendo que o ensino precoce de modelos tenha efeitos nocivos sobre a aprendizagem, Gebert propõe então evitar completamente o tópico até que os estudantes atinjam uma idade em que possam compreendê-lo de forma adequada - o que ocorreria, segundo o autor, a partir dos 17 ou 18 anos.

O diagnóstico de Gebert (1969) tem sido confirmado consistentemente pela pesquisa produzida na área de Ensino de Ciências: ao que parece, os estudantes de fato tendem a compreender modelos mais como cópias da realidade do que como representações conceituais, parciais e aproximativas (GILBERT; OSBORNE, 1980; GROSSLIGHT et al, 1991; ASTOLFI; DEVELAY, 1995; SMIT; FINEGOLD, 1995; van DRIEL; VERLOOP, 1999; HARRISON; TREAGUST, 2000; COLL et al, 2005, TABER, 2012). No entanto, os tratamentos que vem sendo propostos ao enfrentamento desse problema divergem das sugestões de Gebert (1969). Grosslight et al (1991), por exemplo, entrevistaram estudantes do sétimo e décimo primeiro ano da escolarização compulsória dos Estados Unidos (os autores não informaram as idades, mas essas séries correspondem tipicamente a idades entre 12 e 13 anos e entre 16 e 17 anos) para investigar suas concepções de modelos e destacam - como Gebert (1969) - a dificuldade apresentada por ambos os grupos em distinguir as ideias científicas que constituem os modelos das realidades sobre os quais estes versam. Ao invés de propor o abandono do

ensino de modelos, os autores oferecem três sugestões: prover aos estudantes problemas intelectuais que requeiram o uso de modelos; explorar múltiplos modelos para o mesmo fenômeno, modificando-os e revisando-os; e investir parte do trabalho didático na reflexão metaconceitual sobre a natureza dos modelos.

Com relação aos possíveis motivos para o sintoma destacado por Gebert (1969) e tantos outros, Harrison e Treagust (2000) apontam razões no próprio ensino de ciências que desfavorecem a compreensão dos estudantes tanto sobre a natureza dos modelos quanto sobre os conteúdos científicos representados por eles. Um ponto enfatizado pelos autores é a ausência, nos livros didáticos, de discussões sobre o caráter representacional dos modelos científicos. E o que foi dito sobre os livros didáticos pode ser estendido também às práticas educativas em sala de aula: via de regra, discussões sobre a natureza dos modelos e seu uso, bem como oportunidades de desenvolver modelos provisórios e avaliá-los, permanecem ausentes nas situações de ensino (GILBERT; OSBORNE, 1980). Isso pode ocorrer, em parte dos casos, por dificuldades do próprio professor em distinguir o modelo científico do objeto ou evento que é modelado (PINHEIRO, 1996; COLL et al, 2005; DELIZOICOV, 2006). Na mesma linha, Lefkaditou et al (2014) apontam que o currículo escolar tradicionalmente negligencia o caráter provisório dos modelos, tendendo a apresentá-los como meras cópias da realidade.

Que significados esperamos que os estudantes atribuam a conceitos tais como massas pontuais, superfícies sem atrito, raios de luz, em relação ao mundo real à sua volta? Como esperamos que eles compreendam a relação entre o conhecimento científico escolar e os objetos aos quais esse conhecimento supostamente se refere? Se a natureza dos modelos científicos não for explorada de forma explícita em sala de aula, parece razoável esperar que os alunos tendam a considerar tais objetos como representações realísticas do mundo (TABER, 2012).

Isto posto, não deveria causar qualquer surpresa a dificuldade que os estudantes encontram em reconciliar o conhecimento científico escolar com sua realidade cotidiana. Objetos reais à sua volta não são pontuais nem movem-se em movimento retilíneo uniforme; a luz não é formada por raios; um pêndulo real posto a oscilar não

permanece eternamente com o mesmo período. Como argumenta Cartwright (1983), as leis da Física "mentem", no sentido de não nos dizerem como os objetos reais se comportam. Se lidas literalmente, as implicações das teorias físicas são quase universalmente falsas (CARTWRIGHT, 1983).

Mesmo quando as práticas de ensino incluem discussões sobre o domínio de validade restrito das teorias e leis científicas, raramente enfatiza-se como essas leis e teorias se aplicam a um mundo idealizado. O caráter aproximativo do conhecimento científico poderia ser explorado, por exemplo, analisando-se situações em que as leis estudadas não se aplicam; contudo, esse tipo de contra-exemplo não é, via de regra, apresentado em sala de aula. Assim, se as práticas de ensino não se ocupam de uma discussão explícita da relação entre teoria e realidade, pode parecer razoável aos estudantes concluir que não há qualquer relação.

De forma similar, é possível compreender a perplexidade dos estudantes quando modelos do mesmo fenômeno são apresentados ao longo do processo educativo, um após o outro. Se o modelo científico guarda uma correspondência biunívoca com o seu objeto, não poderiam existir múltiplos modelos válidos para o mesmo fenômeno: logo, o modelo estudado mais recentemente é que deve ser o "correto", o que naturalmente gera frustração para estudantes que dedicaram esforços para se apropriar dos modelos "errados" em etapas anteriores da escolarização. Essa distorção do caráter do conhecimento científico não é apenas equivocada epistemologicamente, mas pode agir efetivamente como impedimento pedagógico à aprendizagem (TABER, 2012).

Uma última observação a ser feita antes de passarmos ao exame das propostas de modelização na literatura do ensino de ciências refere-se ao uso dos termos "conhecimento científico" e "conhecimento científico escolar". Trata-se de duas dimensões que não coincidem, dado que todo conhecimento escolar é fruto de um processo de Transposição Didática (CHEVALLARD, 1991), em que um conhecimento científico (saber sábio) torna-se em um saber escolar (saber a ensinar). A transposição didática envolve uma série de transformações adaptativas: *despersonalização* (perda do vínculo com os autores), *dessincretização* (perda de vínculo com seu ambiente epistemológico de origem) e *descontextualização*. Portanto não é o conhecimento

científico, mas o produto de sua Transposição Didática, que consiste no objeto de ensino. Especificamente no caso dos modelos, Justi e Gilbert (2000) conceituam um *modelo curricular* como uma versão simplificada de algum modelo científico que é incluída no currículo escolar do sistema educacional.

Não obstante essa diferenciação, muitas vezes ao longo desse texto iremos nos referir ao conhecimento científico, não por considerarmos que este seja diretamente o objeto de ensino, mas por se tratar do saber de referência para as situações do ensino de ciências. Esta referência, a nosso ver, impõe determinadas restrições ao produto resultante da Transposição Didática, que não se limitam apenas ao conteúdo a ser ensinado mas também às ideias sobre a natureza desse conhecimento a serem veiculadas em sala de aula. Assim, é a relevância dos modelos para o conhecimento científico que sustenta as discussões sobre modelização voltadas ao conhecimento científico escolar. Nas palavras de Colinvaux, "*... se as práticas dos cientistas envolvem elaboração de modelos, então é necessário que a educação em ciências trate também do tema modelos, seja em suas investigações, seja em suas práticas pedagógicas, formais ou informais*" (COLINVAUX, 1998, p.9).

Por que estudar a conceitualização do ponto de vista individual?

Ao se falar em aprendizagem e desenvolvimento conceitual, parece existir uma antiga divergência entre duas grandes vertentes de pensamento aparentemente antagônicas. Leach e Scott (2003) referem-se a elas como, por um lado, as "visões individuais da aprendizagem", originadas principalmente nos estudos piagetianos e, por outro, as "visões socioculturais da aprendizagem", cujas origens estariam principalmente em trabalhos vygostkyanos e neo-vygotskyanos. De modo simplificado, nas primeiras pode-se dizer que aprender é "*um evento complexo e gradual em que a informação que entra através da observação e/ou instrução é usada para enriquecer, substituir ou reestruturar crenças e pressupostos existentes*" (VOSNIADOU;

IOANNIDES, 1998, p. 1222, tradução nossa), enquanto nas segundas aprender "*significa passar de um contexto sociocutural para outro como um processo de enculturação através da participação em atividades compartilhadas*" (COLL et al, 2005, p. 189, tradução nossa).

Parecer haver assim uma certa cisão ou até contraposição entre abordagens de natureza cognitivista, por um lado, e outras de natureza sociocultural do outro. Em uma perspectiva antropológica e epistemológica mais ampla, essa contraposição não é nova, e tem sua origem nas discussões sobre o primado de um dos termos: psicologia ou sociologia. Menezes (1997) pontua que tais discussões, referidas pelo próprio Piaget como "questões irritantes", marcaram a formação da sociologia contemporânea. E por que seriam elas irritantes? Ao responder a Marcel Mauss, sociólogo durkheimiano que insiste na separação entre essas duas ciências, Piaget diz:

> Indagar qual dos dois termos, indivíduo ou sociedade, precede o outro, é como quando se pergunta se o ovo veio antes da galinha ou a galinha antes do ovo. Há aí uma correlação sem anterioridade assinalável. Há covariância e paralelismo entre a sociedade e o indivíduo: é mister estudar o fenômeno pelos dois métodos do psicólogo e do sociólogo, sem os pôr numa oposição irredutível (MAUSS, apud MENEZES, 1997, p. 123).

Nesse ponto importa notar que, embora seja reconhecido amplamente por seus trabalhos pioneiros na psicologia, especialmente no campo das ciência cognitivas e do desenvolvimento, Piaget não apenas estudou os grandes clássicos da Sociologia e conviveu com alguns nomes importantes da área, mas também deixou uma contribuição sociológica própria e original. Em adição, seus grandes trabalhos sobre a gênese do pensamento são influenciados pelas concepções sociológicas de seu tempo. Um resgate dessa dimensão bastante esquecida de seus trabalhos é esboçada por Menezes - um sociólogo -, para quem "*... Piaget voltava sem cessar a análises de natureza sociológica como complementação das raízes biológicas das ações e operações que estudava no plano da psicologia* (MENEZES, 1997, p. 122).

Embora uma análise detalhada dessas "questões irritantes" esteja além do escopo desse estudo, observamos de passagem que qualquer tendência a considerar que autores

com formação cognitivista piagetiana ignorem ou rejeitem a influência sociocultural sobre a formação do pensamento e o desenvolvimento, em função de algum vício de origem, não encontra fundamentação na perspectiva externada por Piaget. Longe de conceber o sujeito como um ser solitário, no capítulo dedicado à influência dos fatores sociais ao desenvolvimento, em sua obra "*A psicologia da inteligência*", Piaget destaca que

> O ser humano está submerso desde o seu nascimento em um meio social que atua sobre ele do mesmo modo que o meio físico. Mais até, em certo sentido, do que o meio físico, a sociedade transforma o indivíduo em sua própria estrutura, porque não apenas o obriga a reconhecer fatos, mas lhe dá um sistema já construído de signos que modificam seu pensamento, propoẽ-lhe valores novos e impõe-lhe uma sucessão indefinida de obrigações. É evidente, portanto, que a vida social transforma a inteligência pela tripla ação mediadora da linguagem (signos), do conteúdo das trocas (valores intelectuais) e das regras que impõe ao pensamento (normas coletivas lógicas ou pré-lógicas) (PIAGET, 1983, p. 171, tradução nossa).

Ao caracterizar a tradição de pesquisa científica que se constituiu a partir da obra de Piaget, Castorina e Carretero (2014), ambos pesquisadores da área de desenvolvimento cognitivo, são críticos mais severos do que Menezes (1999) quanto à presença da dimensão sociológica nessa obra. Esses autores apontam que Piaget não chegou a explicar, por exemplo, como os conflitos cognitivos podem ser resolvidos através das interações sociais, nem explicitou suficientemente o papel dos contextos no desenvolvimentos das noções. Por outro lado, também apontam como equívoca a consideração usual de que a concepção piagetiana de progresso conceitual seja teleológica ou universalista (CASTORINA; CARRETERO, 2014).

Voltando à contraposição das visões no contexto do ensino, Salomon e Perkins (1998) expressam essas visões com o mesmo sentido de Leach e Scott (2003), destacando as visões individuais como cognitivas e orientadas à aquisição, enquanto as visões socioculturais seriam situadas e participativas. Salomon e Perkins (1998) consideram que essas duas concepções devem ser vistas como *níveis de análise*, cada um por vezes negligenciando o outro. Para ilustrar essa perspectiva, eles propõem uma

analogia com o estudo do vírus da gripe, que pode ser feito tanto através da biologia celular quanto da epidemiologia. Essas duas abordagens não se contradizem mas complementam uma à outra: enquanto a primeira explica como problemas no mecanismo de defesa da célula permite que ela seja invadida por um vírus, a segunda explora como o vírus deve chegar até uma célula individual para poder contaminá-la. Algo parecido ocorreria com a aprendizagem em relação às duas concepções acima postas: sabemos que ela ocorre nas mentes dos indivíduos, mas também sabemos que isso se dá por meio de suas interações sociais (SALOMON; PERKINS, 1998).

Quer seja ou não em uma visão piagetiana, parece estar hoje bastante claro que o conhecimento científico não pode ser aprendido sem um processo de interação social. Nos termos de Leach e Scott (2003), "*não é possível explicar como o ensino permite aos estudantes alcançar novas compreensões focando em suas "estruturas mentais" isoladamente das **situações** nas quais essas "estruturas mentais" são usadas*" (LEACH; SCOTT, 2003, p. 94, tradução nossa, grifo nosso). Ainda assim, Leach e Scott (2003) reconhecem que a compreensão dos modos de pensar próprios dos estudantes pode contribuir para o ensino de ciências. Após um exame crítico das duas visões no qual apontam a existência de limitações e potencialidades em ambas, Leach e Scott (2003) delineam sua própria visão, baseando-se parcialmente em ideias das duas vertentes. Adotando a noção vygostkyana de internalização, além de contribuições de Wertsch (1991) a partir de um referencial bakhtiniano, os autores enfatizam que aprender ciências envolve "*... internalizar a linguagem social e gêneros da ciência e tornar-se capaz de usá-los apropriadamente em várias situações*" (LEACH; SCOTT, 2003, p. 100, tradução nossa). Por outro lado, os autores observam que esse processo não pode se dar puramente por meio das "formas de falar" como a linguagem e os mecanismos semióticos. Deve haver também um passo em que o indivíduo chega a uma compreensão pessoal das ideias encontradas no plano social. Nesse ponto, Leach e Scott (2003) citam a passagem de von Glaserfeld:

> ... tal modelo psicogenético, parece-me, poderia ajudar pesquisadores socialmente orientados a embasar suas descobertas bem mais solidamente do que assumindo que o conhecimento e a linguagem de um grupo social podem ser instiladas em seus membros através da

> simples ocorrência de jogos de linguagem e outras formas de interação social (VON GLASERFELD, 1999, p. 11, tradução nossa).

Essa parece-nos também a posição do principal referencial teórico sobre conceitualização dessa tese, Gérard Vergnaud. Apesar de sua afiliação neopiagetiana, cuja influência é muito mais notória em seu trabalho, esse autor reconhece as contribuições do pensamento de Vygotski na proposta que desenvolve e também a riqueza das ideias vygostkyanas como um todo (VERGNAUD, 1989), inclusive tendo escrito uma pequena obra de introdução ao pensamento do autor (VERGNAUD, 2004a).

Ao tecer comentários sobre diversos temas da teoria vygotskyana, em especial a distinção entre conhecimentos cotidianos e científicos; a consciência e a linguagem; a zona de desenvolvimento proximal e a integração entre conhecimentos científicos, Vergnaud (1989) indica que sua Teoria dos Campos Conceituais nasce, em certa medida, a partir de suas reflexões sobre essas questões e procura dar um tipo de resposta a elas. Nessa teoria, Vergnaud busca, entre outros aspectos, retomar algumas das ideias vigostkyanas, em especial suas noções de integração do conhecimento, de ação intencional e de mediação simbólica. Notamos também que essas questões permeiam, ao menos em parte, a ênfase colocada pelo autor no papel das **situações** no processo de conceitualização, a qual não ocorre na obra piagetiana e que em alguma medida responde à crítica das visões individuais feitas por Leach e Scott (2003) e grifada na página anterior. Com relação à suposta oposição entre as visões, Vergnaud observa:

> Muitas vezes opõe-se Vygotski a Piaget, apoiando-se, por um lado, nas críticas que ele formulou a respeito dos trabalhos de Piaget (que aceitou, aliás, algumas dessas críticas) e, por outro lado, na preponderância atribuída por Vygotski às funções da linguagem e do adulto na transmissão dos conhecimentos e no desenvolvimento cognitivo da criança. De fato, trata-se justamente de pontos sobre os quais Piaget insistiu pouco, atento que estava às ações e operações da própria criança. Porém, opor duas obras que de todos os pontos de vista são convergentes e complementares é ir longe demais (VERGNAUD; PLAISANCE, 2001, p. 69).

Nossa própria experiência como docente de Física, no tocante a essa aparente dicotomia, é em certa medida traduzida nas observações de Leach e Scott (2003).

Tratando-se de uma disciplina científica trabalhada com adolescentes, é evidente que sua aprendizagem não ocorre fora de um processo de interação social. No caso do ensino formal, essa interação pode se dar em um contexto mais tradicional, no qual a mediação é realizada principalmente pelo professor no espaço da sala de aula, ou em contextos diferenciados que contem com espaços interativos mediados por tecnologias e interações entre pares. Representações simbólicas também atuam como elementos mediadores em ambos os contextos. Em qualquer caso, não é um processo espontâneo nem pode ser reduzido, de forma alguma, a uma interação entre sujeito-aluno e objeto-conteúdo.

Por outro lado, também não parece redutível exclusivamente à perspectiva sociológica pois, muito frequentemente, fica claro que a comunicação nesses espaços envolve algo mais do que a linguagem: nem sempre (se é que alguma vez) aquilo que é dito, expresso, simbolizado, manifesto, é igual (ou muitas vezes compatível) com o que foi compreendido e conceitualizado, inclusive quando existe a intenção de que seja assim por ambas as partes envolvidas. Parece haver, portanto, algum papel importante desempenhado pela estrutura de pensamento dos estudantes que intervém no processo de conceitualização. Pensamos que conhecer melhor essa estrutura poderá contribuir para uma comunicação mais significativa, e é nessa direção que orientamos o presente trabalho.

Com base nessas considerações, optamos por desenvolver um estudo sobre a modelização visando investigar aspectos das relações entre os domínios teórico e empírico do conhecimento científico construídas por estudantes do Ensino Médio, nível de ensino de nossa atuação docente. A partir de nossas motivações para estudar esse objeto, discutidas nas páginas anteriores, buscamos por um referencial teórico que ofereça categorias de pensamento adequadas e frutíferas para desenvolver uma compreensão dos modelos como mediadores entre o conhecimento científico e a realidade sobre a qual este se refere. Para isso, no Capítulo 1 apresentamos e discutimos as principais visões sobre modelos científicos na filosofia da ciência. Ainda naquele Capítulo, aprofundamos uma discussão sobre a concepção de modelos de Mario Bunge,

ao identificarmos as potencialidades desse referencial em relação à problemática sobre modelos que buscamos abordar.

Posto que nosso objeto de estudo pertence ao campo do Ensino de Ciências, no Capítulo 2 apresentamos e discutimos os principais posicionamentos sobre modelos dentro desse campo. A partir dessas discussões, justificamos a pertinência e a relevância da transposição das ideias bungeanas para a modelização no ensino, na medida em que esta for entendida no contexto das relações entre o conhecimento científico e a realidade à qual este se refere.

Para possibilitar o tratamento da conceitualização de aspectos ligados à modelização de um ponto de vista cognitivo individual, no Capítulo 3 discutimos dois referenciais teóricos que oferecem aportes nesse sentido: a proposta da Redescrição Representacional de Karmiloff-Smith e a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud. Ao final deste Capítulo, enunciamos explicitamente o problema de pesquisa que recortamos, em termos das categorias de pensamento trazidas pelos referenciais teóricos. Ainda ao final do Capítulo 3, e visando articular esses referenciais, discutimos aproximações e distanciamentos entre as visões de Bunge e Vergnaud sobre a apropriação do conhecimento.

Com relação aos aspectos empíricos da pesquisa, optamos pela realização de entrevistas clínicas. A descrição dessa abordagem, bem como os detalhes do planejamento de toda a parte empírica da investigação, incluindo informações sobre os sujeitos participantes, o instrumento de coleta de dados e procedimentos de registro e análise, são apresentados no Capítulo 4.

A apresentação e a discussão dos resultados encontrados, dividida por seções da entrevista clínica, constitui o Capítulo 5. No sexto e último Capítulo dessa tese, apresentamos nossas conclusões relativas ao problema de pesquisa considerado e desenvolvidas com base nos resultados encontrados. Além disso, apontamos algumas contribuições desse estudo para o ensino e para a pesquisa em ensino de Física.

CAPÍTULO 1. CONTRIBUIÇÕES DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA PARA A COMPREENSÃO DOS MODELOS CIENTÍFICOS

Para Harrison e Treagust (1998; 2000), modelizar é a essência do pensamento e do trabalho científico. Para Coll (2005), os modelos são uma ferramenta-chave para cientistas, professores e estudantes de ciências e o papel crucial deles na Ciência justifica sua inserção no ensino. Koponen, tomando uma perspectiva filosófica, defende que o fundamento básico das discussões sobre modelos e modelização localiza-se na relação entre a teoria e o mundo conforme acessado pelos sujeitos. (KOPONEN, 2007). Mas o que são os modelos científicos? Como são construídos? O que podem dizer sobre o mundo?

Nesse capítulo, apresentamos inicialmente as principais perspectivas gerais sobre modelos científicos desenvolvidas na filosofia da Ciência a partir do século XX - as visões sintática, semântica, dos modelos como mediadores e dos modelos como artefatos epistêmicos - indicando suas ênfases, principais contribuições e algumas de suas críticas. Pela relevância dessas operações em quase todas as visões de modelos, as abstrações e idealizações são discutidas desde um ponto de vista filosófico, procurando conceituar-se esses elementos e apontar sua relevância para a estruturação do pensamento científico.

Em seguida, apresentamos o referencial teórico filosófico que servirá de fundamentação teórica para o presente estudo: a teoria de modelos científicos desenvolvida pelo filósofo e físico argentino Mario Bunge. Procuramos caracterizar os elementos da modelização propostos pelo autor, oferecendo exemplos principalmente oriundos da física e enfatizando a centralidade que este atribui aos processos de abstração e idealização na elaboração de modelos. Finalmente, com base nesse desenvolvimento, tecemos comentários sobre a escolha do referencial bungeano para pensar a modelização no ensino e como fundamento teórico dessa tese, abordando uma objeção frequentemente feita a esse referencial.

1.1 Da visão sintática aos modelos como artefatos epistêmicos

Nessa seção, procuramos caracterizar de forma sintetizada a evolução do conceito de modelo no contexto da filosofia da ciência a partir do século XX, com o objetivo de auxiliar na compreensão da origem das diferentes acepções desse conceito na área da educação científica e tecnológica. Será possível evidenciar como as discussões da filosofia da ciência tem contribuído para essa área, desde os primeiros trabalhos sobre modelos e modelização no ensino até o estado presente, muito frequentemente - ainda que nem sempre - de forma explícita. Obviamente não se pretende esgotar o tema vastíssimo dos modelos na filosofia, mas apenas apresentar os orientações principais de interesse ao propósito acima delineado.

O tema dos modelos na filosofia da ciência praticamente não é enfocado na filosofia da ciência da primeira metade do século XX. Nesse período, discussões sobre o conhecimento científico na filosofia centram-se quase exclusivamente nas teorias. É principalmente a partir dos anos 1950 que o interesse em modelos começa a surgir nessa área (BAILER-JONES, 1999). Mais do que isso, para Bailer-Jones (1999) o período precedente carrega uma tradição de desprezo pelos modelos. Parte do motivo, aponta a autora, está ligada à influência do positivismo lógico no pensamento da época. Por exemplo, para Carnap - um dos principais autores ligados ao Círculo de Viena -, "*é importante perceber que a descoberta de um modelo não tem mais do que um valor estético ou didático ou, na melhor das hipóteses, um valor heurístico, mas não é de forma alguma essencial para a aplicação exitosa de uma teoria física*" (CARNAP, 1939, p. 68, tradução nossa). Tal posicionamento é consistente com a orientação mais ampla do positivismo lógico, que de forma geral não se interessa pelo real processo de construção do conhecimento, mas pela relação da teoria com os fatos, no sentido de uma reconstrução lógica (REICHENBACH, 1938).

Também ao traçar um histórico das concepções filosóficas sobre modelos durante o século XX, Adúriz-Bravo (2013) aponta que as epistemologias positivista-lógica e racionalista crítica atribuíam aos modelos um papel hierarquicamente

subordinado às teorias, tidas como as unidades estruturais da ciência. Priorizando a análise das teorias científicas, pouca ou nenhuma atenção era dada aos modelos. Após a segunda guerra mundial, surgem propostas de duas diferentes definições. Um *modelo matemático* seria um sistema que pemite abstrair os axiomas da teoria, enquanto um *modelo físico* seria uma contraparte representacional, simplificada e abstraída, de um sistema (ADÚRIZ-BRAVO, 2013).

Entre alguns dos primeiros proponentes de benefícios dos modelos na filosofia da ciência, Bailer-Jones (1999) destaca Richard Braithwaite, Ernest Hutten e Mary Hesse. Enquanto o primeiro enfatiza principalmente a vantagem do uso de modelos como forma de interpretar os cálculos da teoria mas ainda mantém-se numa abordagem muito próxima do positivismo lógico, os dois últimos começam a distanciar-se desse posicionamento e desenvolvem suas concepções de modelos de forma mais aproximada das práticas dos cientistas. Com isso, ainda que de forma tímida, tornam as discussões sobre os modelos mais preocupadas com as atividades dos cientistas como de fato ocorrem (BAILER-JONES, 1999).

Entre os filósofos que entendem os modelos como tendo papel explanatório, já nos anos 1960 e 1970 começa a surgir a noção de que essa função dos modelos estaria diretamente relacionada com o uso de analogias, notadamente em autores como Harré (1960), Black (1962), Hesse (1966), e Achinstein (1968), entre outros. Assim, por exemplo, para Harré, modelos são "*análogos supostos para o mecanismo real*" (HARRÉ, 1960 p. 35, tradução nossa). Mary Hesse também entende a relação entre um modelo e seu referente como sendo de natureza analógica. Black inicia sua discussão sobre modelos falando em modelos tridimensionais que guardariam semelhança com os objetos, sistemas ou processos modelados, mantendo as devidas proporções: são modelos em escala (BLACK, 1962). O propósito desse tipo de modelo seria o de reproduzir algumas propriedades do seu referente de forma a torná-lo mais acessível e manipulável. Além dos modelos escala, Black fala em modelos que apresentam o seu referente em um meio diferente, tal como modelos hidráulicos de sistemas econômicos: são denominados pelo autor de modelos analógicos. Tanto modelos em escala quanto modelos analógicos são representações simbólicas que se apresentam de forma

concreta, mas enquanto os primeiros reproduzem as magnitudes geométricas do seu referente, os últimos reproduzem sua estrutura. Black (1962) menciona ainda a existência de modelos matemáticos, que para ele constituem geralmente apenas uma forma pretensiosa de falar em teoria mas que pode ser também algo mais simples e abstrato do que o objeto original, além de modelos teóricos, cujo uso consistiria em estender a linguagem sugerida pela teoria a um novo domínio (BLACK, 1962).

Tal consideração de modelos como estruturas de natureza essencialmente analógica é bastante popular na literatura da área de ensino de ciências, tendo inspirado um grande número de pesquisas e propostas ao longo dos anos, tais como os trabalhos de Clement (1989), Nersessian (1995), Duit e Glynn (1996), Gilbert e Boulter (1998), Harrison e Treagust (1998), Galagovsky e Adúriz-Bravo (2001), Adúriz-Bravo e Morales (2002), Chamizo (2013), entre muitos outros. Uma discussão mais detalhada sobre como a noção de modelos como analogia tem sido empregada na pesquisa em ensino de ciências é apresentada na seção 2.1.2.

Por sua vez, a ênfase no aspecto matemático também é uma tendência marcante na literatura da educação científica. Ela se evidencia em trabalhos que concebem a modelização no ensino principalmente como uma construção das relações matemáticas - na maioria das vezes, algébricas ou geométricas - concernentes a algum fenômeno. Nessa linha, é bastante frequente que as atividades propostas para o ensino envolvam alguma experimentação com coleta de dados e posterior tratamento matemático. Alguns estudos que focalizam o caráter matemático dos modelos no ensino são encontrados em Hestenes (1987), Pinheiro (2006), Greca e Moreira (2001), Angell et al (2008), Grandy (2003) Uhden et al (2012), entre outros. Essa vertente é discutida na seção 2.1.1.

Ao traçar esses paralelos, não queremos com isso dizer que necessariamente todos os autores da área de ensino de ciências tenham buscado uma fundamentação explícita nos respectivos filósofos, embora isso não seja incomum. O sentido desses paralelismo está mais relacionado com a particular concepção de modelo ou ênfase que cada autor atribui ao apresentar sua proposta. Notamos também que essas relações não são exclusivas, i.e., muitos dos proponentes que trabalham com modelos no ensino podem servir-se de mais de um tipo de contribuição filosófica.

De todo modo, no campo da filosofia da ciência, pelo menos até os anos 1960, ainda eram as teorias científicas que detinham a primazia nas discussões relegando-se, muitas vezes, os modelos a um papel de menor importância e interesse (ADÚRIZ-BRAVO, 2013). Esse mesmo período seria marcado pela influência da chamada visão sintática das teorias ou *Received View*, que Suppe (1989) caracteriza como uma posição filósofica que interpreta as teorias como a conjunção de leis - em forma de sentenças - e regras de correspondência que especificam como essas leis se manifestam nos fenômenos. Nessa visão, os modelos não tem um papel representacional: eles simplesmente fornecem as condições sob as quais os axiomas da teoria estariam satisfeitos (PORTIDES, 2011).

Na visão sintática das teorias, conforme desenvolvida principalmente por Carl Hempel e Rudolf Carnap, uma teoria científica é uma entidade linguística formulada em lógica de primeira ordem. Os termos dessa linguagem seriam divididos em duas classes disjuntas: termos observacionais - que descreveriam referentes macroscópicos da teoria - e termos teóricos, que se relacionariam com os termos observacionais através de *regras de correspondência*. Essas estabeleceriam consequências testáveis ou observacionais que permitiriam uma interpretação dos termos teóricos. Por exemplo, o termo "massa" poderia ser relacionado com certos procedimentos experimentais. Assim, uma teoria sem regras de correspondência poderia ser considerada como não-interpretada (SUPPE, 1989; MORGAN; MORRISON, 1999).

Com o surgimento das epistemologias pós-positivistas principalmente a partir dos anos 1960, o conceito de modelo na filosofia da ciência ganha ímpeto e seu sentido passa a se aproximar de uma espécie de *exemplo paradigmático*, tal como a ideia de "exemplar" da filosofia kuhniana. Modelos seriam, nessa linha, soluções canônicas a serem imitadas ao se buscar resolver novos problemas dentro de certo domínio. De exemplo paradigmático, o modelo se transforma em exemplo *pretendido* (no sentido da citação de Adúriz-Bravo acima) nas visões semânticas da teoria (VST) que se desenvolvem a partir dos anos 1970 e 1980 como uma terceira via. Nessa linha, modelos seriam projeções da teoria sobre o mundo. A primazia teria sido transferida da teoria para o modelo: aquela é definida em termos deste (ADÚRIZ-BRAVO, 2013).

Essa nova perspectiva surge assim como forma de oposição à visão sintática das teorias, desenvolvendo-se principalmente a partir dos trabalhos de Patrick Suppes (1962), Frederick Suppe (1977), Bas van Fraassen (1980) e Ronald Giere (1988). O qualificativo "semântica" na VST é usado como forma de enfatizar a valorização do conteúdo semântico (significados que as teorias atribuem ao mundo) em detrimento da ênfase na sintaxe das teorias. Na VST, as teoria são entidades não-linguísticas. Isso não significa que o desenvolvimento, expressão e uso das teorias não envolva componentes linguísticos, mas que as teorias não podem ser identificadas com esses componentes. Elas seriam estruturas abstratas, cuja natureza é objeto de diferentes concepções na VST. Contudo, para Suppe (1989), essas concepções aproximam-se mais ou menos da ideia de que a estrutura das teorias corresponderia a estados de espaço ou a imagens homomórficas de estados de espaço (SUPPE, 1989). Por exemplo: as leis do movimento especificam as trajetórias possíveis de uma partícula através de suas equações. Do espaço de estados possíveis da partícula, somente aquelas trajetórias que satisfazem as equações são fisicamente possíveis. Cada uma dessas possibilidades seria um modelo. Assim, pode-se pensar em um grupo de modelos para o movimento de uma partícula como compartilhando um mesmo espaço de estado. Uma teoria, por sua vez, conteria um certo número de espaços de estado. Portanto, do ponto de vista epistemológico, na VST as teorias são identificadas como conjuntos de modelos (PORTIDES, 2005; HARTMANN, 2008; MORRISON, 2007). Não haveria diferença em essência entre teorias e modelos.

Mas o que há de "errado" com a visão sintática? Entre outros aspectos, Suppe (1989) sumariza suas críticas à essa visão destacando que ela obscurece aspectos importantes da teorização científica, que seriam considerados de forma mais adequada na VST. Para exemplificar, Suppe desenvolve a noção de "sistema físico" (*physical system*). Um sistema físico, segundo o autor, seria uma classe de cópias (*replicas*) abstratas de um fenômeno que se pretende explicar com a teoria científica. O sistema físico seria obtido selecionando-se e abstraindo-se certos parâmetros idealizados do fenômeno. Dessa forma, o papel da teoria seria o de descrever, prever e explicar o comportamento dos sistemas físicos correspondentes aos fenômenos sob seu escopo.

Além disso, a teoria deveria também prover uma caracterização completa de todos os sistemas físicos possíveis para esses fenômenos (SUPPE, 1989).

Koponen (2007) aponta a visão semântica das teorias como fundamentação filosófica que sustenta um grande número de abordagens didáticas para o ensino de ciências dentro da visão baseada em modelos (*model-based view*). Nessa linha, Adúriz-Bravo (2013), ao defender a adesão à VST como embasamento teórico para a discussão sobre modelos no contexto do ensino, caracteriza essa visão em quatro principais pontos:

> (1) o foco da análise meta-teórica é colocado em como as teorias científicas dão significado ao mundo e fazem sentido a seus usuários [...] (2) uma teoria científica pode ser caracterizada como uma família de modelos [...] (3) ... mas também por um conjunto de sistemas empíricos que essa teoria *pretende* explicar [...] (4) existe uma relação substantiva entre modelos e seus sistemas: [a teoria] "afirma empiricamente" que alguns fenômenos são adequadamente explicados por seus modelos (ADÚRIZ-BRAVO, 2013, p. 1594, tradução nossa, grifo do autor).

Adúriz Bravo (2013), em sua defesa de uma didática de modelos baseada na VST, lista três vantagens pretendidas com a adoção dessa abordagem para o contexto do ensino de ciências. De acordo com o autor, ela favoreceria a focalização de aspectos mais significativos do conhecimento científico, ao invés de aspectos formais tais como a manipulação de proposições; promoveria a utilização de modelos científicos escolares como representações teóricas do mundo; possibilitaria aos alunos dar significado a certos fenômenos através da *similaridade* desses com certos modelos paradigmáticos; permitiria entender a modelização como a testagem do grau de ajuste entre as ideias e observações ou experimentos e sugeriria explanações robustas (ADÚRIZ-BRAVO, 2013).

A similaridade a que se refere Adúriz-Bravo (2013) é, dentro dessa discussão, um conceito desenvolvido por um dos principais representantes da VST: Ronald Giere. Ela é proposta como critério para comprender a relação entre os modelos e a realidade e é empregada pelo autor no sentido de um "ajuste imperfeito" ou "verdade vaga". Um modelo seria similar ao sistema real que modela em certos aspectos e graus. Segundo

Giere, ao adotar o critério da similaridade, não há mais necessidade em se falar de verdade aproximada ou ajuste aproximado. Outra vantagem é que dessa forma seria possível compreender a relação entre modelos e realidade tanto para modelos concretos quanto abstratos, não sendo mais necessário considerá-los separadamente (GIERE, 2010).

Algumas críticas à VST, elaboradas principalmente tendo em vista sua incorporação na área de ensino de ciências, são tecidas por Koponen (2007). O autor pontua, em primeiro lugar, que a VST é excessivamente limitada para permitir o reconhecimento da semi-autonomia[1] dos modelos no sentido atribuído por Morgan e Morrison (1999). Outra lacuna na VST seria a ausência de uma explicação da bi-direcionalidade na relação entre modelo e fenômenos, isto é, a ideia de que os fenômenos não apenas são modelizados, mas também são adaptados aos modelos. Koponen (2007) destaca também que o conceito de similaridade é por demais vago para esclarecer como se dá a relação entre o modelo e a realidade a qual este se refere: nessa linha, questiona a validade do conceito de similaridade, declarando não haver razões convincentes para considerá-la um critério para modelos.

Adicionalmente, Koponen (2007) sublinha que a principal desvantagem da VST é que ela ainda considera os modelos como subordinados às teoria. Como consequência, "*... a maioria das versões da VST não considera adequadamente a* ***metodologia de estabelecer correspondência entre teoria e experimentos***" (Koponen, 207, p. 762, tradução nossa, grifo do autor). À luz dessas considerações, Koponen (2007) propõe um conjunto de sugestões para uma fundamentação revisada de modelos para o ensino de física: a consideração de modelos empiricamente confiáveis como nossa ponte para a realidade; a noção de que confiabilidade empírica é estabelecida no processo de correspondência com os experimentos (*matchmaking*); e o requisito de um "realismo mínimo" para configurar uma imagem autêntica da ciência (KOPONEN, 2007).

A relação entre o fenômeno e o conhecimento teórico produzido sobre esse fenômeno - seja ele modelo ou de teoria -, conforme entendida pelos proponentes da

1 A semi-autonomia dos modelos é a propriedade destes serem parcialmente independentes quer da teoria, quer dos dados, enquanto tipicamente envolvem algo de ambas as dimensões (Morgan; Morrison, 1999).

VST, também é examinada criticamente por Chakravartty (2001). À primeira vista, diz Chakravartty, pode parecer promissor adotar a VST para compreender essa relação, pois, se as teorias são modelos (ao invés de serem proposições linguísticas, como quer a visão sintática), a comparação entre o conhecimento teórico e o fenômeno de referência ocorre entre duas entidades não-linguísticas, sendo portanto mais fácil do que comparar uma entidade linguística com outra não-linguística. Contudo, para Chakravartty, essa facilidade é ilusória, ao menos se se considera alguma versão do realismo. Para que um modelo possa expressar algum conhecimento sobre o real, é necessário que algum aspecto do modelo possua uma contraparte no real: não há como escapar da necessidade de alguma declaração explícita que estabeleça um tipo de correspondência entre o modelo e sua contraparte real. Por isso, argumenta o autor, ainda que alguns proponentes apontem na VST uma forma de evitar as dificuldades que surgem ao considerar as teorias como formulações linguísticas, ela não resolve de fato o problema da relação entre a teoria e o fenômeno, pelo menos não em uma perspectiva realista (CHAKRAVARTTY, 2001).

Uma crítica importante que, não obstante seja feita no contexto da filosofia da ciência, pode ser relevante à educação científica, é apresentada por Morrison (2007). A autora observa que, ao identificar a teoria como um conjunto ou família de modelos, a VST acaba por dispensar completamente a necessidade da teoria em si. Assim, já não há nada de específico a que chamar de "Mecânica Newtoniana" a não ser pelo conjunto de modelos usados para tratar classicamente sistemas mecânicos. Isso é problemático porque

> ... modelos contém uma grande quantidade de excesso de estrutura tais como métodos de aproximação e outros aparatos matemáticos que normalmente não incluímos como parte da teoria. Além disso, eles frequentemente contém descrições altamente estilizadas de fenômenos e propriedades particulares que sabemos serem falsas, descrições que nem sempre identificamos como parte de nossa teoria. Nessa medida, queremos algum modo de diferenciar sobre o que versa a teoria (isto é, seu conteúdo) dos vários pressupostos requeridos para sua aplicação em contextos particulares (MORRISON, 2007, p. 197, tradução nossa).

Margaret Morrison é uma autora ligada a uma concepção de modelos distinta ao mesmo tempo da visão sintática e da VST. Trata-se de uma compreensão de modelos como *agentes autônomos* (MORGAN; MORRISON, 1999). Nessa visão, os modelos ocupam uma posição central na construção de conhecimento científico, e isso deve-se, em parte, a não serem idênticos às teorias. Para elas, assim como já havia sido apontado por Cartwright (1983), os modelos são parcialmente independentes tanto da teoria quanto dos dados. É dessa propriedade que os modelos derivam seu poder de funcionar como *mediadores* entre essas duas instâncias. Portanto, as teorias não poderiam ser definidas apenas em termos de seus modelos, nem o inverso. Ainda assim, existem conexões entre o modelo e a teoria, bem como entre o modelo e os dados: do contrário, seria impossível aos modelos dizer o que quer que fosse sobre qualquer das duas instâncias (MORGAN; MORRISON, 1999).

Em adição, ao discutir como se dá o funcionamento autônomo dos modelos, Morrison (1999) enfatiza que eles podem também ser entendidos como *representativos* de objetos ou sistemas do mundo. A autora destaca que isso não significa dizer que eles sejam descrições acuradas desses objetos e sistemas, já que não apenas envolvem elementos como a abstração e a idealização, como também, muitas vezes, não apresentam qualquer similaridade com seus referentes. Isso coloca um problema: se os modelos representam o mundo de maneiras que sabemos serem falsas, como eles podem expressar conhecimento sobre o mundo?

Analisando alguns casos paradigmáticos da física, em especial o pêndulo e e a dinâmica de fluidos, Morrison defende que os modelos podem ser explanatórios pois, ao representar sistemas físicos, eles exibem certas dependências estruturais, ou relações que provém da contextualização da teoria em circustâncias específicas. Por exemplo, o modelo do pêndulo diz-nos do movimento de um pêndulo de uma forma que as leis de Newton não fazem, assim como o modelo de camada limite diz sobre o fluxo laminar de maneiras que a dinâmica clássica de fluidos e a equação de Navier-Stokes não diz (MORRISON, 1999). É dessa forma que o papel representacional do modelo estaria interconectado com a sua capacidade de produzir explicações e de mediar entre a teoria

e os dados. A autora observa, contudo, que não há um modo único de caracterizar a natureza da representação.

Assim como Morrison (1999), Cartwright (1983) também identifica a essência dos modelos como elementos não pertencentes à teoria, ainda que guardem relações importantes com esta. Portanto, essa autora também se distancia tanto da visão sintática quanto da VST. Cartwright (1983) propõe o conceito de *simulacro* como "*... algo que possui meramente a forma ou aparência de certa coisa, sem possuir sua substância ou suas qualidades próprias*" (CARTWRIGHT, 1983, p. 17, tradução nossa). Na concepção desenvolvida por Cartwright (1983), explicar um fenômeno significa construir um modelo que ajuste o fenômeno dentro de uma teoria. As teorias seriam verdadeiras para os objetos com que lida o modelo, mas esses objetos são simulacros (CARTWRIGHT, 1983).

A perspectiva de modelos como agentes autônomos e sua independência também são considerações tomadas por Knuutila (2005). Entretanto essa autora vai mais além nessa direção e propõe "*... libertar os modelos do referencial teoria-dados ainda presente em Morgan e Morrison (1999) e interpretar os modelos materialmente, desta maneira concedendo a eles um status individual como artefatos epistêmicos*" (KNUUTILA, 2005, p. 48, tradução nossa). Os pontos principais da tese de Knuutila podem ser assim resumidos:

> i) modelos são artefatos feitos por humanos que são usados para interagir com o mundo ao invés de meramente representá-lo; ii) portanto, ao invés de serem construções teóricas abstratas eles são melhor concebidos como entidades que são materializadas em algum meio; iii) o valor epistêmico advém de forma significativa de sua dimensão material, o que explica por que modelos tem várias outras funções epistêmicas além daquela de representar o mundo; iv) a função representacional dos modelos não deve ser abordada em termos "representacionalistas"; v) representação é melhor entendida como uma atividade que repousa tanto nas possibilidades do meio específico do veículo-signo material quanto no processo intencional de relacionar o signo-veículo a seu objeto (KNUUTILA, 2005, p. 18, tradução nossa).

Ao desenvolver sua proposta, Knuutila (2005) usa exemplos oriundos principalmente da linguística computacional e da inteligência artificial, ressalvando que

não tem a pretensão de afirmar com isso que tais modelos sejam representativos de modelos em geral, de quaisquer áreas científicas, mas que apesar disso sua abordagem pode ser útil para ver os modelos de um outro ponto de vista, diferente do usual.

É preciso salientar que Knuutila critica uma noção de representação no sentido de substituir algo ausente por algo presente (*standing for*); a autora destaca que essa abordagem muitas vezes se apóia na metáfora de delinear um retrato, mapa ou espelho. Essa noção seria central na linha que a autora denomina de *representacionalismo*. Para ela, um problema crucial do representacionalismo é que, ao admitir que a mente não possui acesso direto à realidade exterior e por isso necessita representá-lo através de ideias, ela não tem acesso à representação a não ser através de outras ideias. Isso seria problemático porque nos deixaria reféns de duas alternativas tidas como indesejáveis: ou a representação é incapaz de alcançar as coisas em si mesmas, ou ela cria um efeito de realidade que se esforça por captar, mas em vão (KNUUTILA, 2005).

Partindo dessas considerações, Knuutila (2005) propõe uma reconstrução da noção de representação, descartando certas premissas que ela atribui ao representacionalismo: para ela, conhecimento não é constituído apenas por representações; representações não correspondem de forma acurada a pedaços do mundo; e a realidade não está "pronta" e não é formada por um conjunto fixo de objetos. A autora desenvolve então sua concepção de modelos como artefatos que possuem diversas funções, sendo a representação apenas uma delas. Um exame da transposição da proposta de Knuutila para o contexto do ensino é apresentado na seção 2.1.3.

Em síntese, o desenvolvimento do conceito de modelo no contexto da filosofia da Ciência do século XX passa inicialmente por um período de quase total desconsideração ou mesmo rejeição sob o positivismo lógico. Ainda relacionada com essa concepção, a visão sintática das teorias, em torno dos anos 1960, atribui aos modelos um papel de menor importância, subordinados às teorias. Ao mesmo tempo, surgem propostas que dão maior atenção ao conceito, eminentemente relacionando-o a analogias e metáforas, além de modelos matemáticos. Mais tarde, nos anos 1980, começa a tomar força a VST, fundamentada no questionamento e na rejeição à visão

sintática e que concebe as teorias como famílias de modelos, procurando assim inverter a hierarquia admitida naquela visão. Alternativamente, uma noção de modelos como estruturas que estão relacionadas com a teoria mas que se encontram fora dela já aparece pelo menos em 1983 com Nancy Cartwright e desenvolve-se com os trabalhos de Morgan e Morrison nos anos 1990. Essa perspectiva é extendida e levada a um novo nível quando Knuutila, nos anos 2000, propõe a noção de artefato epistêmico e, com isso, separa o modelo do debate sobre a relação entre teoria e realidade.

Essa breve contextualização também pôde mostrar um pouco da riqueza e da complexidade do tema dos modelos na filosofia da ciência. Na área da educação científica, o tema não é menos rico e, assim como na filosofia, continua sendo objeto de constante evolução, debate, crítica e revisão. Na seção 2.1 procuramos mostrar como, paralelamente à evolução das análises sobre modelos no campo da filosofia da ciência, a área da educação científica passou a reconhecer cada vez mais a importância dos modelos para o ensino e a aprendizagem de ciências.

1.2 Abstrações e Idealizações

A compreensão de algumas características essenciais da Ciência tem sido defendida como um dos objetivos básicos da educação científica, quer seja através de documentos oficiais (AAAS, 1993; BRASIL, 2002) ou por meio de trabalhos de pesquisa na área de Ensino, focalizando abordagens centradas no tópico "Natureza da Ciência" (NdC) (McCOMAS, 2008; ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000; LEDERMAN, 2007). De forma geral, há um reconhecimento de que qualquer que seja a opção – entre abordar aspectos da construção do conhecimento científico intencionalmente ou não fazê-lo – na prática educativa, alguma imagem da Ciência sempre estará em jogo. Desconsiderar a importância desses aspectos, seja para a formação de professores, para o planejamento didático, para a elaboração de materiais didáticos ou para outras instâncias envolvidas no sistema educativo, significaria

substituir uma epistemologia explícita por uma epistemologia implícita e, portanto, acrítica e irrefletida pois, como foi sintetizado por Cupani e Pietrocola, "*(...) para bem ensinar (e aprender) as explicações científicas é preciso conhecer de que forma a ciência pode explicar*". (CUPANI; PIETROCOLA, 2002, p. 120). As consequências de se desconsiderar a relevância da Natureza da Ciência podem conduzir à disseminação do que Gil-Pérez et al (2001) denominaram de *visões deformadas* do trabalho científico[2], as quais não detalharemos aqui por já serem exaustivamente relatadas na literatura.

Uma das questões gerais que fazem parte da NdC, de certa forma expressa na citação de Cupani e Pietrocola e a qual focalizamos nessas páginas, pode ser assim colocada: como se dá a relação entre as teorias científicas e o seu referente[3]? Desenvolver alguma compreensão dessa relação é um ingrediente metacientífico importante para aprimorar o pensamento científico dos estudantes, segundo Portides (2007). E é a essa questão que os conceitos de abstração e idealização visam ajudar a responder.

A partir de uma abordagem histórico-conceitual, Ernan McMullin propõe, descreve e exemplifica categorias de idealização que considera características da ciência moderna. Os exemplos apresentados pelo autor são retirados principalmente de escritos galileanos, mas também há menções a Newton e Bohr, entre outros. Em um sentido genérico, McMullin conceitua a idealização como "*... uma simplificação deliberada de algo complicado* [...] *tendo em vista alcançar ao menos uma compreensão parcial desse algo*" (McMULLIN, 1985, p. 248, tradução nossa). Esse "algo complicado" sendo simplificado pode ser, de acordo com o autor, tanto um objeto ou situação em si mesmos quanto uma representação conceitual destes.

O primeiro caso é denominado por McMullin de idealização *causal*, e corresponde ao ato de eliminar ou neutralizar influências que impedem ou complicam a

2 Em síntese, as versões deformadas apontadas por Gil-Pérez et al são: concepção *empírico-indutivista* e *ateórica*; visão *rígida de método científico*; visão *aproblemática* e *ahistórica*; visão *exclusivamente analítica*; visão *acumulativa de crescimento linear;* visão *individualista* e *elitista* e visão *socialmente neutra* da Ciência (GIL-PÉREZ et al, 2001).

3 De uma forma geral, o referente (mediato) da teoria pode ser chamado de "realidade", "fenômenos" ou dados experimentais.

ação dos fatores que se busca estudar. Esse processo pode ser feito *experimentalmente*, como sugerido nos *Diálogos* de Galileo (quer ele tenha ou não implementado de fato esses experimentos) e permitiria isolar um único fator causal. Um exemplo apresentado por McMullin é a desconsideração dos efeitos resistivos no estudo do movimento dos corpos, assumida por Galileo para concluir que todos os móveis cairiam com a mesma velocidade no vácuo. O que faz dessa operação "experimental" na perspectiva de McMullin é o fato de que a justificativa de Galileo centra-se em argumentos de ordem experimental: ele compara o comportamento de corpos caindo em meios mais tênuos e menos resistivos com a queda em meios não tão tênues e mais resistivos, chegando ao vácuo como caso limite.

Mas a idealização causal também pode ser desenvolvida sem invocar nenhum resultado experimental, apenas apelando-se à experiência cotidiana ou à intuição. Isso é o que McMullin (1985) chamou de idealização *subjuntiva*, e ela produz afirmações sobre o mundo que são tomadas como verdadeiras sem que se recorra à experimentação. Esse tipo de idealização, segundo o autor, é o que Galileo apresenta em seu argumento sobre a queda de uma pedra solta do mastro de um navio em movimento. Ainda que Galileo pudesse facilmente propor um experimento para demonstrar seu ponto, ele escolhe não fazê-lo: "*Sem experimento, estou certo de que o efeito será como lhe digo porque precisa ocorrer dessa forma*" (CREW; de SALVIO, 1914, p. 145, tradução nossa).

Por outro lado, simplificações aplicadas sobre representações conceituais de objetos ou eventos são chamados por McMullin (1985) idealizações de construto (*construct idealizations*). Nelas, "*os modelos sobre os quais o entendimento teórico é construído são deliberadamente moldados de modo a deixar de lado parte da complexidade da ordem concreta*" (McMULLIN, 1985, p. 273, tradução nossa). Portanto, enquanto a idealização causal refere-se à eliminação de alguns dos aspectos que influenciam o objeto, a idealização de construto consiste na simplificação dos aspectos escolhidos para serem considerados no modelo.

Uma observação importante é feita por McMullin (1985) sobre o *propósito* das idealizações na ciência. De acordo com ele, idealizar não é apenas um meio de escapar

da complexidade das situações físicas reais, mas também um modo de permitir o desenvolvimento de modelos teóricos que pretendam ter poder explanatório. Esse papel das idealizações na modelização poderia ser desempenhado de duas maneiras principais. Uma delas seria ao estabelecer simplificações ou omissões relativas a propriedades que sabe-se serem relevantes para o tipo de explicação sendo desenvolvida. Seriam as idealizações *formais*. Frequentemente - mas não necessariamente - elas poderiam ser expressas matematicamente e ajudariam a obter resultados aproximados. A consideração do Sol como estando em repouso, feita por Newton ao derivar as leis de Kepler no *Principia*, seria um exemplo desse tipo de operação (McMULLIN, 1985).

A outra maneira pela qual as idealizações tomam parte na modelização seria ao permitirem que algumas propriedades simplesmente fiquem não-especificadas, embora abertas para questionamento em outro contexto ou abordagem. Essa seriam idealizações *materiais*. Ao exemplificar essa categoria, McMullin menciona a teoria cinética dos gases. Trata-se de um modelo que postula a existência de moléculas como constituintes dos gases e não especifica nenhuma estrutura interna dessas moléculas. Na visão de McMullin, a questão sobre o que há "dentro" dessas moléculas simplesmente não é perguntada na teoria cinética, ao mesmo tempo em que a possibilidade de uma estrutura interna também não é negada. Tanto as idealizações formais quanto as materias são tidas pelo autor como subcategorias das idealizações de construtos.

Ao discutir a relação entre os modelos e a realidade, Cartwright (1989) propõe dois processos de pensamento: idealização e abstração. A autora nota que o que os filósofos da época querem dizer ao usar o termo "idealização" é geralmente uma mistura dos dois. Para ela, na *idealização* parte-se de um objeto concreto cujas propriedades inconvenientes são "rearranjadas" antes de se tentar escrever uma lei para o comportamento desse objeto. O exemplo paradigmático da idealização apontado pela autora é o plano inclinado sem atrito. A *abstração*, por outro lado, envolve a exclusão de determinadas propriedades ou características que o objeto possui, tal como a omissão das forças intermoleculares no modelo do gás ideal. Portanto, a abstração envolve uma *subtração* enquanto a idealização envolve *modificação* (CARTWRIGHT, 1989). Esse sentido dos termos também é o adotado por Morgan e Morrison (1999).

Essa conceituação é muito semelhante à utilizada por Suppe (1989). Esse autor sublinha que a abstração consiste em uma *seleção* de certas variáveis ou parâmetros do objeto real para serem consideradas no modelo. Na abstração pura, o fato de que alguns aspectos sejam deixados de fora do modelo não modifica a natureza daqueles outros aspectos que são considerados. Por exemplo, ao estudar o movimento de um par de corpos sob mútua atração gravitacional, é possível desprezar a atração exercida por corpos externos a esse sistema sem que isso altere a natureza das forças entre o par sendo estudado (SUPPE, 1989, p. 94). Mas existem aspectos que, se forem desconsiderados, acabam por produzir situações completamente impossíveis de existirem nos fenômenos. É o que ocorre, por exemplo, quando se ignora a extensão de um corpo, tratando-o como uma massa pontual. Essa condição não pode ser satisfeita de modo algum por um objeto real, já que implicaria em densidade infinita. Nesses casos, diz Suppe, estamos diante de uma idealização (SUPPE, 1989, p. 96).

Enquanto Suppe (1989) destaca que casos de idealização envolvem também alguma abstração, já que implicam em ignorar fatores que influenciam o objeto ou fenômeno, Cartwright (1989) defende, similarmente, que a idealização seria inútil se a abstração não fosse possível. Essas observações indicam que trata-se de dois conceitos intimamente relacionados, pelo que não é surpreendente que por vezes sejam utilizados com o mesmo significado. Mesmo notando que a categorização de Suppe e de Cartwright não seja totalmente idêntica àquela proposta por McMullin, é possível notar que ambos tratam dos processos de abstração e idealização como duas operações realizadas pelo sujeito epistêmico, que podem ser basicamente identificadas como a *omissão* de alguns aspectos do objeto e a *simplificação* ou "distorção" dos aspectos não omitidos.

A proximidade dessas operações é tal que Portides (2013) propõe um entendimento da idealização e da abstração conforme definidas por Suppe e Cartwright como dois modos de um mesmo processo de pensamento, que chama de *controle conceitual de variabilidade*. Portides (2013) concebe assim um único processo geral, por meio do qual o cientista exerce o controle conceitual sobre os fatores existentes no referente do modelo, que pode se manifestar de três modos específicos, sendo o terceiro

deles chamado de *decomposição*. Esta última consistiria na separação de grupos daqueles fatores que sejam vistos como atuando em conjunto para produzir um comportamento específico no referente (PORTIDES, 2013).

Dentro do contexto da modelização, Portides (2007) analisa a relação entre as noções de idealização e de aproximação e como operam conjuntamente para trazer os modelos mais para perto dos seus referentes reais. Nesse texto, o autor denomina de "idealização" uma fusão dos processos de idealização e de abstração conforme entendidas por Cartwright (1983) e Morgan e Morrison (1999). Ele define a *aproximação* como um processo de simplificação matemática de partes ou de toda uma descrição teórica. É o que ocorre, por exemplo, quando se assume que a intensidade uma força resistiva é linearmente proporcional à velocidade, ou ao quadrado dela. A relação de aproximação seria dada pela proximidade entre as previsões feitas por essas equações e as medições experimentais. Portides (2007) mostra então que as propriedades lógicas da aproximação são diferentes das da idealização. A aproximação é simétrica[4] e reflexiva[5], mas não necessariamente transitiva[6]; a idealização é assimétrica, transitiva e não-reflexiva.

Nesse contexto, uma das funções da idealização é ampliar a generalidade de nossas representações dos fenômenos. Assim é que, quando falamos de um oscilador harmônico simples, fazemos referência a uma ampla classe de objetos e não apenas a alguns pêndulos. A ideia "oscilador harmônico simples" representa tantos objetos por ser uma idealização dessa classe de objetos, não por ser uma aproximação, dado que muitos pêndulos podem estar sujeitos a forças resistivas muito intensas, de modo que seu comportamento em quase nada se aproxima da previsão de um oscilador harmônico simples. A aproximação, por sua vez, é uma propriedade de uma representação que se refere a casos específicos (PORTIDES, 2007).

---

4 Por exemplo, se A é uma proposição teórica e B é uma proposição derivada empiricamente, e se A for uma descrição aproximada de B, então B também é uma aproximação de A. O mesmo argumento seria inválido se A for uma descrição idealizada de B.

5 Considerando que a igualdade é um caso limite da aproximação, então dizer que A é uma aproximação de si mesmo é válido. Mas a idealização não pode ser uma igualdade, logo é irreflexiva.

6 Se A é uma descrição idealizada de B e se C é uma descrição idealizada de B, então C é uma descrição idealizada de A. Isso pode ser verdadeiro para aproximações, mas não incondicionalmente, porque a aproximação é dependente do contexto.

Em sua análise do papel representacional dos modelos, Portides propõe uma distinção entre modelos ideais - que seriam a classe de modelos teóricos sobre um objeto na forma de estruturas matemáticas que podem ser elaboradas seguindo as leis da teoria - e modelos concretos, que seriam a classe de modelos propostos para representar o sistema físico modelado. Os modelos concretos seriam as entidades que permitem capturar as propriedades e atributos desse sistema. Os modelos ideais, por sua vez, para representarem algum sistema físico precisam ser enriquecidos com algum modelo concreto. Portides (2007) argumenta então, similarmente à Morrison (1999), que a classe de modelos concretos está para além da teoria, pelo que os modelos teóricos não são derivados apenas desta. Exemplificando com o caso do pêndulo como um oscilador harmônico simples, o modelo ideal poderia ser expresso como $\ddot{\theta}+(g/\ell)\theta=0$. Portides vai além e destaca que esse modelo ideal

> ... **não se refere a uma classe de pêndulos reais, mas a uma classe de tipos ideais** [ideal-types, no original] que não podem ser atualizados, isto é, uma classe de massas pontuais sustentadas por um fio inextensível sem massa, realizando oscilações infinitesimais em torno de um ponto de equilíbrio (PORTIDES, 2007, p. 716, tradução nossa, grifo nosso).

Assim, para que um modelo ideal possa representar seu referente, é necessário incorporar a ele considerações sobre esses "tipos ideais", assim transformando-o em um modelo concreto. Por esse motivo, Portides (2007) defende que o processo primário na relação entre modelo e realidade é a idealização, e dela depende os fatores que serão envolvidos na aproximação. Isso ocorre porque a relação de aproximação, por si mesma, não é suficiente para dizer que o oscilador harmônico simples representa o movimento de pêndulo de qualquer forma não-arbitrária, pois os dados experimentais sobre esse movimento poderiam ser aproximados de muitas outras equações além da solução na equação acima. Só podemos afirmar que o modelo ideal do pêndulo simples *representa* o movimento de um pêndulo porque antes usamos a idealização para construir um modelo concreto, cuja incorporação ao modelo ideal conferiu-lhe seu poder representacional (PORTIDES, 2007).

Nesse trabalho, o foco de interesse não é estabelecer uma definição rígida de cada um desses processos, mas antes investigar o papel de abstrações e idealizações para a construção de modelos no ensino e na conceitualização em física. Assim, mantemos definições relativamente flexíveis de abstrações e idealizações como operações de pensamento efetuadas pelo sujeito epistêmico que envolvem a omissão de propriedades e variáveis e a simplificação da natureza dos objetos e eventos. Esses processos resultam em *ideias* sobre o objeto ou evento, configurando-se portanto como representações. O que precisa ser notado após essa discussão é que as abstrações e idealizações não são consideradas como deméritos ou falhas dos modelos: pelo contrário, elas tem um papel criativo na elaboração dessas representações.

1.3 A Modelização à luz da epistemologia de Mario Bunge[7]

Bunge, físico e filósofo argentino nascido em 1919, atualmente é professor de Lógica e Metafísica na Universidade McGill, no Canadá. Acadêmico prolífico e diverso, Bunge é autor ou editor de cerca de 70 livros e 500 artigos científicos e filosóficos abrangendo tópicos como Física, Metafísica, Ontologia, Filosofia da Ciência e Epistemologia, entre muitos outros. O estudo da interação entre a Ciência e a Filosofia tem sido um compromisso vitalício do seu trabalho acadêmico e suas ideias epistemológicas sobre os modelos científicos são um exemplo disso. Sua principal obra é o *Tratado de Filosofia Básica*, que envolve Semântica, Ontologia, Epistemologia e Ética em oito volumes, divididos em 9 partes, sendo três volumes dedicados à epistemologia. O primeiro filósofo da ciência sul-americano a ter formação científica, Bunge não apenas subscreve ao realismo científico crítico, mas também é um de seus principais defensores desde há décadas (MATTHEWS, 2012). Os parágrafos a seguir serão dedicados a uma descrição sintetizada da epistemologia bungeana e algumas das implicações que podem ser derivadas da epistemologia bungeana à modelização no ensino de Física.

Sendo um realista, Bunge situa os modelos científicos como entidades fundamentais na busca por compreender conceitualmente a realidade. Eles desempenhariam um papel de mediadores, à semelhança do que foi proposto mais tarde por Morgan e Morrison, entre a realidade e a teorização que pretende versar sobre esta. Mas o que se entende por "realidade" nesse contexto?

O conceito de realidade a que se refere Bunge consiste na agregação de todas as coisas que mantém entre si relações espaço-temporais: "*a realidade de um objeto consiste em ser ele parte do mundo*" (BUNGE, 1977, p. 161, tradução nossa). Posto que nosso foco de estudo localiza-se no ensino de ciências naturais, ao usar esse termo nos referimos à realidade natural (ou a realidade física, quando a referência for a conhecimentos físicos). Não nos referimos portanto a outras realidades, pertencentes a

7 Uma versão preliminar de parte dessa seção foi publicada no periódico *Science & Education* (MACHADO; BRAGA, 2016).

outros níveis, tais como os pensamentos ou sentimentos. Dito de outra forma, uma "coisa real" no contexto do conhecimento físico seria o referente pretendido de uma teoria física (BUNGE, 1977).

Essa definição deixa de fora objetos conceituais, tais como os construtos da ciência. Esses não são dotados de realidade, embora existam conceitualmente. Além disso, notamos também que a realidade não é redutível à observação, já que postula a existência de entidades inobserváveis como ondas e forças, e ainda menos à experiência comum, pois aceita componentes que não poderiam ser dela extraídos, tais como o elétron e a inércia (BUNGE, 1973b). Por fim, a realidade é mutável, ou seja, existem reais possíveis, que podem ainda não estar atualizados. Assim, a realidade pode ser dividida em duas classes: atualidades e possibilidades reais (BUNGE, 1977).

Bunge enfatiza o caráter parcial e aproximativo do conhecimento científico. Segundo o autor, a conquista conceitual da realidade se inicia a partir de idealizações e abstrações operadas pelo sujeito epistêmico sobre o objeto que este quer conhecer. Essas operações resultam em uma representação conceitual do objeto, chamada pelo autor de *objeto-modelo* (como massas pontuais, corpos rígidos, ondas eletromagnéticas planas, espécies). A articulação entre o objeto-modelo e uma *teoria geral* (algumas teorias gerais podem ser a Mecânica Clássica, Teoria da Relatividade Restrita, Eletromagnetismo Clássico, Teoria da Evolução) resulta em um sistema hipotético-dedutivo denominado *modelo teórico,* que pode ser confrontado com a experiência – ao contrário do que ocorre com as teorias gerais – e que herda o caráter aproximativo e idealizado do objeto-modelo.

Teorias gerais, por si mesmas, não podem ser testadas. Um motivo para isso é o fato de que, justamente por serem gerais, não fazem nenhuma previsão específica sem que lhes acrescente hipóteses adicionais. Portanto elas não geram, sozinhas, proposições contrastáveis com algum tipo de dado empírico. Outra forma de colocar essa questão é considerar que qualquer teoria geral poderia produzir um número infinito de previsões, de acordo com as hipóteses adicionais que lhe fossem acrescentadas. Inversamente, mesmo a refutação empírica de um modelo teórico não implica na refutação da teoria geral que tomou parte na sua elaboração. Em resumo, as teorias gerais podem ser

apoiadas ou enfraquecidas pelos testes de seus modelos teóricos, mas não provadas ou refutadas conclusivamente (BUNGE, 1973b).

Objetos-modelo são representações esquemáticas de objetos reais. Contudo, o termo "esquemático" aqui não significa pictórico ou figurativo. Objetos-modelo precisam ser conceituais, já que eles são essencialmente ideias sobre seus referentes. Esse aspecto é o que permite que sejam encaixados em teorias gerais. Seu caráter esquemático vem do fato de que perdem algumas das características de seus referentes, já que são criados através de abstrações e idealizações (BUNGE, 1973a). Imaginar o cérebro como uma rede de neurônios, a Lua como uma massa pontual ou a matéria sólida como uma rede cristalina podem ser citados como exemplos do emprego de construtos para representar coisas - ou seja, de objetos-modelo. Esse conceito é importante porque mostra a relação de não-identidade entre os objetos da realidade e o conhecimento produzido sobre esses objetos. Dito de outra forma: as teorias e modelos da física referem-se imediatamente a objetos conceituais, e apenas mediatamente a objetos reais. É por isso que as abstrações e idealizações são tão importantes na construção do conhecimento científico: não apenas por ser impossível captar toda a complexidade de qualquer sistema ou objeto real, mas também por proverem uma contraparte conceitual que eventualmente permite criar explicações sobre essa realidade complexa.

Mas os objetos-modelo, sozinhos, não tem poder explanatório. Criar uma explicação requer a elaboração de modelos teóricos, que podem ser criados incorporando-se um objeto-modelo em uma teoria geral. Por exemplo, para explicar o comportamento de um gás confinado em um recipiente, criamos uma ideia sobre o gás, isto é, um objeto-modelo. Podemos imaginar as moléculas desse gás como massas pontuais colidindo umas com as outras e com as paredes do recipiente. Abstraímos as variações de energia das moléculas, assim como as interações eletromagnéticas entre elas. Através dessas abstrações e idealizações, criamos um objeto-modelo que representa conceitualmente o gás: nesse caso, chamado de "gás ideal". Mas isso, por si só, não configura um modelo teórico. Quando combinado com uma teoria geral tal como a mecânica clássica é que é possível desenvolver um modelo teórico (nesse caso,

chamado de "teoria cinética do gás ideal"). Esse modelo permite estabelecer relações entre as variáveis do sistema e fazer previsões sobre seu comportamento, construindo assim um porção modesta, porém frutífera, de conhecimento científico. Outros exemplos sugeridos por Bunge são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Relações de modelização. Traduzido e adaptado de Bunge (1973b), p. 43.

Sistema	Objeto-modelo	Modelo teórico	Teoria Geral
Lua	Sólido esférico rotacionado em torno de seu eixo, girando em torno de um ponto fixo, etc.	Teoria lunar	Mecânica clássica e teoria da gravitação
Luar	Onda eletromagnética plano-polarizada	Equações de Maxwell para o vácuo	Eletromagnetismo clássico
Pedaço de vidro	Cadeia de contas linear e aleatória	Mecânica estatística de cadeias aleatórias	Mecânica Estatística
Cristal	Rede mais nuvem eletrônica	Teoria de Bloch	Mecânica Quântica

O mesmo objeto real pode ser transformado, por operações de pensamento, em diferentes objetos-modelos, e encaixado em diferentes teorias gerais, resultando em uma dinâmica que oferece uma multiplicidade de caminhos possíveis para a construção de conhecimentos científicos novos. Cada um destes consiste em um diferente modelo teórico. Não se trata, portanto, de uma receita ou de um mero algoritmo. Além disso, os modelos teóricos disponíveis distribuem-se em um amplo espectro de profundidade de seu poder explicativo, desde as abordagens mais simples, que apenas relacionam variáveis de entrada com variáveis de saída (modelos do tipo caixa-preta), até abordagens mais fortemente interpretativas (as caixas “translúcidas”). As primeiras são vistas como estágios iniciais da pesquisa, tendo-se como objetivo fazê-las evoluir para as últimas, pois são estas que permitem a construção de uma *interpretação* da realidade, objetivo maior do empreendimento científico (BUNGE, 1974a). Nessa perspectiva, o

modelo teórico é a entidade que faz a mediação entre a teoria e a realidade; daí se depreende seu papel central na construção do conhecimento científico.

Os conceitos bungeanos enriquecem e dão maior clareza à proposta de que modelos são parcialmente independentes tanto da teoria quanto dos dados e que consistem em agentes relativamente autônomos, defendida por Morgan e Morrison (1999). Isso ocorre porque a construção de modelos teóricos para a mesma situação física é possível tanto criando-se diferentes objetos-modelo quanto adotando diferentes teorias gerais. Ainda no exemplo dos modelos de gás, se tomarmos os volumes das moléculas e forças intermoleculares em consideração teremos criado outro objeto-modelo para o gás: se este for engastado na mesma teoria geral de antes, teremos outro modelo teórico, o modelo de van der Waals. Inversamente, mantendo o mesmo objeto-modelo anterior e utilizando outra teoria geral, como a dinâmica relativística, seria obtido ainda outro modelo teórico. E não são só os modelos teóricos que possuem essa relativa autonomia, mas o mesmo também vale para os objetos-modelo: nenhum deles é propriedade exclusiva de um modelo, ao menos a priori. Assim, por exemplo, a ideia de massa pontual é compartilhada por um grande número de modelos teóricos, seja de um sistema massa-mola, o movimento de um pêndulo, a queda livre, os projéteis, entre muitos outros.

Qualquer modelo teórico herda o aspecto parcial e aproximativo do objeto-modelo. Isso significa que não devemos esperar que algum modelo possa espelhar a realidade. Ao contrário, modelos teóricos são provisórios por natureza. Podem concordar com a realidade de forma aproximada, na melhor das hipóteses. São muito mais ricos do que os objetos-modelo, por um lado, e muito mais abertos ao escrutínio do que as teorias gerais (que não podem ser testadas empiricamente, justamente por serem gerais), por outro. Mas eles podem possuir diferentes níveis de poder explanatório, de acordo com as diferentes abordagens que podem ser tomadas ao construi-los.

As abordagens do tipo "caixa-preta" (também chamadas pelo autor de abordagens fenomenológicas) são consideradas por Bunge (1973a) como as mais superficiais, e tem como objetivo descrever e prever o comportamento de sistemas, relacionando variáveis de entrada com variáveis de saída. Nessa abordagem, não há

uma consideração de possíveis "mecanismos internos" da caixa. Consequentemente, esse tipo de abordagem fornece representações globais e simplistas do sistema sendo modelado. Alguns exemplos dessa abordagem são a cinemática, a óptica geométrica e a teoria behaviorista da aprendizagem. Frequentemente, uma abordagem do tipo caixa-preta é empregada nos estágios iniciais do desenvolvimento de uma certa área científica (BUNGE, 1988).

Por estarem relativamente mais próximas dos dados empíricos e por serem mais superficiais ao mesmo tempo, caixas-pretas tendem a ser mais difíceis de refutar. Por exemplo, a lei de Ohm relaciona a corrente que passa por um condutor com a diferença de potencial entre os terminais de um condutor. Esse modelo teórico foi desenvolvido inicialmente por Georg Ohm usando um termopar e um galvanômetro. Ele fornece uma relação entre as variáveis escolhidas, mas não explica por quê a relação é conforme o estabelecido. Adicionalmente, por ser aproximativa por natureza, essa relação é válida apenas à temperatura constante, o que estritamente não é possível, principalmente por causa do aquecimento devido ao efeito Joule. À luz desse exemplo, é possível ver que as caixas-pretas não lidam apenas com variáveis macroscópicas ou diretamente observáveis, já que corrente elétrica e força eletromotriz não pertencem a essa categoria.

Em contraste, existem também as caixas translúcidas (ou abordagens representacionais), que procuram explicar o mecanismo interno de um sistema ou evento. Esse mecanismo é hipotético, e é inventado usando conceitos abstratos e inobserváveis. Entre caixas-pretas e translúcidas, existe um espectro de abordagens intermediárias, semitranslúcidas. A elaboração de modelos assim não requer um processo separado das caixas-pretas, mas pode ocorrer utilizando-as como um fundamento inicial. McMullin (1985) refere-se a esse processo como uma "des-idealização" (*de-idealizing*), e apresenta um exemplo através da sequência dos modelos que foram se desenvolvendo historicamente para o átomo de hidrogênio. O modelo de Bohr postula inicialmente um próton massivo em repouso com um elétron em órbita circular em torno dele. Após, o modelo foi refinado permitindo-se um pequeno movimento do núcleo em torno do centro de gravidade comum. Mais tarde, a órbita foi representada como uma elipse e, posteriormente, passou-se a considerar efeitos

relativísticos. Esse refinamento sucessivo torna-se progressivamente mais dependente de construtos (e.g., centro de massa) e de teorias (e.g., a relatividade especial). Portides (2007) faz uma observação semelhante, defendendo que as des-idealizações progressivas fornecem uma representação aproximativa do sistema físico alvo da modelização.

Assim, para o propósito de construir caixas translúcidas ou semitranslúcidas, é necessário criar construtos inobserváveis através das abstrações e idealizações. Adicionalmente, esse processo envolve também a integração com as teorias gerais. Por exemplo, no caso da condução elétrica, a corrente passa a ser modelada como uma certa distribuição de elétrons movendo-se através de um meio com centros espalhadores (íons da estrutura do condutor) e este objeto-modelo é conectado à mecânica clássica e à eletrodinâmica como teorias gerais, seguindo-se daí a proporcionalidade entre a densidade de corrente e o campo elétrico, o que é uma versão reformulada da lei de Ohm, o modelo teórico correspondente. Outros objetos-modelo podem (e foram) criados para representar a corrente em um condutor, e outras teorias gerais podem ser usadas para modelizar seu comportamento. Novamente, isso ilustra a relativa autonomia de um modelo teórico e seu papel em mediar entre a teoria e os objetos aos quais a teoria supostamente se refere.

Esse exemplo permite iluminar alguns pontos sobre caixas translúcidas. Em primeiro lugar, os construtos necessários para desenvolver uma explicação acerca do mecanismo interno do sistema não são vistos ou medidos, mas antes imaginados e inventados: elétrons, estruturas cristalinas, campos, potenciais, são objetos-modelo de alto nível de abstração. Além disso, as teorias gerais são importantes não apenas como um meio de derivar um modelo mas especialmente como formas de atribuir significados para as variáveis intervenientes, assim permitindo criar interpretações acerca da estrutura interna e estimulando o surgimento de explicações mais profundas. No caso do exemplo supracitado, a resistência pode ser agora interpretada como uma propriedade da estrutura do condutor, ao invés de simplesmente ser uma constante que relaciona entrada e saída. Uma última observação que pode ser feita sobre as caixas translúcidas é sua propriedade de permitir que um modelo seja integrado em uma estrutura teórica de

amplo alcance, que são as teorias gerais: dessa forma, elas já não são mais algo à parte do resto da Ciência, como é o caso das caixas-pretas (BUNGE, 1973a).

Apesar de caixas-pretas serem consideradas por Bunge como necessárias, especialmente ao enfrentar um novo problema, ele também as considera insuficientes, pelas razões discutidas acima. Para ele, o objetivo de longo prazo da Ciência não é acumular dados, mas explicar a realidade. Portanto, construir caixas translúcidas é altamente desejável na atividade científica e deveria ser encorajado. Além disso, para produzir explicações sobre o mecanismo interno, juntar dados e mais dados pode não ser de nenhuma ajuda. Esse objetivo requer um esforço inventivo, usando a imaginação do sujeito.

Nesse ponto, é possível perceber mais claramente como a idealização e abstração auxiliam a contruir a explicação científica, como apontava McMullin (1985). Ambos os processos são necessários para construir caixas menos opacas, cinzentas ou translúcidas, que por sua vez proporcionam modelos com mais alto poder explanatório (BUNGE, 1973a). Contudo, isso não significa dizer que a construção de caixas-pretas seja mais fácil ou que não necessite de imaginação e criatividade. Na verdade, mesmo para desenvolver esse tipo de modelos é preciso recorrer a abstrações e a idelizações.

1.4 Sobre a escolha do referencial de Mario Bunge

Gilbert et al (2000), ao discutirem questões que envolvem a relação entre realidade, teoria e modelo e suas implicações para o ensino de ciências, desenvolvem uma análise comparativa das contribuições de Thomas Kuhn, Nancy Nersessian e Mario Bunge ao problema. Mais especificamente, questionam em que medida as visões sobre natureza da ciência desses três autores - principalmente no que tange a relação realidade/teoria/modelo - poderiam fornecer uma base ontologicamente e epistemologicamente adequada para o ensino de ciências. Nessa obra, Gilbert et al (2000) consideram que o trabalho de Bunge poderia ser muito útil para esse fim, ainda

que não tivesse sequer sido sugerido, à época, que ele fosse utilizado como uma analogia para a cognição individual. Em alguma medida, essa é a sugestão que orienta o presente estudo.

Por outro lado, quando Gilbert et al (2000) comparam os três filósofos listados acima, classificam Bunge como um realista "forte" (*hard realist*), em contraste com Kuhn, que seria uma espécie de realista "suave" (*soft realist*). Com isso os autores querem dizer que, ainda que ambos (e também Nersessian) pressuponham que a realidade exista indepedentemente do sujeito, Bunge acreditaria que o conhecimento científico eventualmente dará uma compreensão completa da realidade. Por esse motivo, defendem, "*... alguém que quisesse retratar a ciência como um caminho conduzindo a verdades definitivas sobre o mundo, como tantos cientistas acadêmicos veteranos querem, então basearia o currículo nas ideias de Bunge: ambições mais limitadas poderiam ser atingidas dentro de um referencial kuhniano*" (GILBERT et al, 2000, p. 31, tradução nossa).

Embora essa afirmação seja reiterada algumas vezes, em outros termos, ao longo do artigo de Gilbert et al (2000), os autores não apresentam citações diretas ou indiretas de Bunge que justifiquem a tese de que esse autor crê numa ciência que dará, "no devido tempo", uma explicação completa e final da realidade natural. Assim, ainda que os autores tenham usado exatamente esse critério para classificar Bunge como um realista "forte", não indicam pontos específicos na obra do filósofo que expliquem por quê tal critério se aplicaria.

Em nossa própria leitura tanto das obras de Bunge quanto de outros autores que o citam, também não foi possível encontrar tais pontos. Mas um grande número de passagens afirmando o oposto, tanto de forma mais explícita como mais implícita, e com diversas variações de termos, brota das páginas de seus livros. Ao discutir, por exemplo, o conceito de verdade no contexto dos conhecimentos físicos, Bunge destaca:

> Sem dúvida, as verdades alcançáveis em física são verdades relativas no sentido que valem, se é que valem, em relação a certos conjuntos de proposições que são momentaneamente assumidas como certas [...] Elas são também verdades parciais ou aproximadas, pois a confirmação é sempre parcial e ademais temporária (BUNGE, 2007, p. 20).

De forma ainda mais explícita e empregando uma terminologia semelhante à de Gilbert et al (2000), Bunge diz: "*A teoria científica perfeita (completa e totalmente acurada)* ***não existe e nunca irá existir***" (BUNGE, 1998, p. 442, tradução nossa, grifo nosso). A argumentação que Bunge desenvolve para justificar essa tese é a seguinte. Qualquer teorização parte de uma idealização de certa situação ou objeto. Isso por si só já impõe algum erro, não no sentido de um equívoco, mas de um afastamento do real. Esses desvios propagam-se para quaisquer que sejam as consequências testáveis da teorização feita. As discrepâncias assim produzidas forçam o teórico a gradualmente sofisticar a teorização, ou começá-la de novo, com outro embasamento. Mas nem por isso as teorias novas deixam de ser idealizadas. Bunge destaca ainda que isso simplesmente não pode ser evitado, justamente porque teorias são sistemas conceituais ao invés de um acúmulo de dados experimentais (BUNGE, 1998).

Tendo em vista essas considerações e outras discussões sobre as concepções epistemológicas sustentadas por Bunge apresentadas em Machado (2009), a leitura da obra desse autor não parece dar suporte ao realismo ingênuo atribuído a ele em Gilbert et al (2000). É fato que Bunge entende que a realidade pode ser conhecida por aproximação, e que o conhecimento científico avança nessa direção (ou, no mínimo, pode avançar). Contudo, disso não decorre a crença de que o conhecimento completo será atingido; inclusive, Bunge deixa explícito sua convicção de que ele não é sequer atingível. Tal tese, própria do realismo *crítico*, é expressa pelo autor: "*... as coisas em si são cognoscíveis, embora* ***parcialmente e por aproximações sucessivas*** *e não exaustivamente e de uma só vez* [...] *Esse conhecimento (conhecimento factual) é hipotético ao invés de apodítico, portanto é corrigível e não final...*" (BUNGE, 1973b, p. 86, tradução nossa, grifo nosso). Portanto, Bunge rejeita ao mesmo tempo o ceticismo e o dogmatismo - ao afirmar que o acesso progressivo e aproximativo ao conhecimento é possível -, aderindo a uma posição relativa ao problema da possibilidade do conhecimento chamada de *criticismo* (HESSEN, 1979, NIINILUOTO, 2002). Além disso, o autor também deixa claro - como havia sido corretamente apontado por Gilbert et al (2000) - sua filiação ao realismo ontológico, uma posição que se refere à *essência*

do conhecimento e que é rejeitada, por exemplo, pelos positivistas lógicos ligados ao Círculo de Viena (NIINILUOTO, 2002).

Até esse ponto, contudo, ainda nada se disse sobre o problema da *origem* do conhecimento. Bunge (1973b) rejeita tanto o extremo do racionalismo quanto do empirismo, defendendo que nem a razão, nem a experiência podem ser a fonte única ou primordial do conhecimento científico (BUNGE, 1985, p. 44). Em adição, ao destacar que as teorias e modelos não tem como referente imediato o real, mas representações conceituais de partes dele - isto é, objetos-modelo -, Bunge claramente pressupõe que o nosso conhecimento sobre o real é algo por nós construído. Essa tese é conhecida como *construtivismo epistemológico* (CUPANI; PIETROCOLA, 2002). Nas palavras do autor, "*o construtivismo epistemológico é correto, mas o ontológico é falso*" (BUNGE, 1991, p. 51, tradução nossa).

A adoção desses pressupostos é coerente com a perspectiva defendida à exaustão na teoria bungeana de modelos segundo a qual essas entidades produzem um tipo de conhecimento aproximativo por natureza e cuja elaboração repousa fortemente sobre operações de pensamento do sujeito, notadamente as idealizações e abstrações. O quadro de referência produzido por Bunge propõe uma explicação clara e consistente da relação entre a realidade percebida e o conhecimento científico criado na intenção de apreender essa realidade - em especial, através de seu conceito de objeto-modelo. Suas ideias também oferecem uma visão sistemática de como os domínios teórico e empírico ambos tomam parte na construção de modelos, que por sua vez podem ser entendidos como um elemento mediador entre eles. Na medida em que suas ideias ajudam a compreender a relação entre realidade, teoria e modelo, consideramos que elas possuem um potencial para contribuir com o problema dos modelos no ensino no sentido discutido na Introdução dessa tese.

Outra crítica ao referencial bungeano consiste na "acusação" de ser o autor um positivista ou, pelo menos, exageradamente influenciado pelo positivismo. Acreditamos que essa percepção esteja ligada a uma indiferenciação entre o positivismo e o cientificismo. O último é certamente abraçado pelo autor, se por "cientificismo" entender-se a noção de que o conhecimento científico é superior, na busca por resolver

problemas humanos, em comparação a outras classes de conhecimento disponíveis como mitos, ideologias, credos religiosos ou outras formas de não-ciência (o que, na visão bungeana, não significa que podemos prescindir de conhecimento não-científico). Outro aspecto ligado por vezes ao positivismo é a defesa de uma unidade axiológica e metodológica da ciência (STOCKMAN, 1983). Esta ideia também é, sem dúvida, integrante do pensamento de Bunge.

No entanto, essas discussões ligadas ao valor da ciência não implicam em posicionamentos positivistas nas questões epistemológicas básicas sobre a origem, a essência e a possibilidade do conhecimento. De fato, Cupani (1991) argumenta que a filosofia bungeana não corresponde a esses traços mais específicos do positivismo se tomado no sentido, por exemplo, dos positivistas lógicos ligados ao Círculo de Viena, tal como o próprio Bunge define o termo "positivismo":

> POSITIVISMO. Tipo de empirismo que se caracteriza pela ênfase nos dados sensíveis e na indução, pela aceitação das partes descritivas da ciência, certa desconfiança da teoria e que se recusa a admitir ou negar a realidade do mundo físico (Bunge, 1996, p. 224).

Ainda, para o autor, o "empirisimo" consiste na consideração da experiência como única fonte, único objeto e única prova do conhecimento (Bunge, 1996). Pelo exposto até aqui, parece-nos estar claro que suas ideias sobre a modelização não vão ao encontro dessas teses do positivismo no sentido delineado acima. Mais do que isso, sua ênfase no aspecto representacional do conhecimento, explicitada no seu conceito de objeto-modelo, opõe-se frontalmente a esse positivismo. É possível assim que o hábito de censurar determinados autores em vista de um suposto "positivismo" seja algo que careça de significado, pelo menos na ausência de uma definição clara, previamente explicitada, sobre o que se entende pelo termo.

Pelos motivos expostos, entendemos que não há qualquer implicação da adoção do referencial bungeano com alguma visão de ciência dogmática ou ingênua no sentido proposto por Gilbert et al (2000). Pelo contrário, esperamos que a exposição e análise de sua obra desenvolvida até aqui torne claro o seu compromisso com uma concepção epistemológica crítica. Adicionalmente, buscamos evidenciar que essa concepção

harmoniza-se com uma perspectiva construtivista no sentido epistemológico, sendo portanto compatível e consistente com o referencial cognitivo que também apresentaremos e adotaremos nesse estudo, notadamente a Teoria dos Campos Conceituais, do psicólogo e didata neopiagetiano Gérard Vergnaud.

Contudo, destacamos que a utilização desse referencial no estudo presente e a defesa de sua viabilidade e potencialidade não implica na rejeição de outros referenciais possíveis. Trata-se de uma escolha baseada especificamente na problemática de modelos exposta na Introdução dessa tese e na sintonia desse referencial com a perspectiva do trabalho em um sentido amplo. Como ensina o próprio Bunge, sempre é possível, ao menos a priori, abordar um problema sob diferentes pontos de partida teóricos, sem que isso signifique uma inconsistência ou exclusão mútua. Portanto, a adoção de outros referenciais para tratar o problema não só é possível como pode complementar as contribuições que buscamos desenvolver aqui. Além disso, a relação entre teoria e realidade, enfocada nesse trabalho, não é o único papel que os modelos desempenham, como já foi observado por Morgan e Morrison (1999) e principalmente por Knuutila (2005, 2011). Assim, outros aspectos da modelização podem ser discutidos e explorados, talvez até mais apropriadamente, por lentes conceituais diferentes das oferecidas por Bunge. Isso significa dizer que entendemos essas lentes como um modelo de modelos, entre outros que seriam possíveis.

CAPÍTULO 2. MODELOS NO ENSINO DE CIÊNCIAS

A importância atribuída aos temas modelos e modelização para a educação científica, principalmente a partir dos anos 2000, é tal que muitos autores consideram a habilidade de usar, construir e compreender modelos como central para comprender a própria ciência (GILBERT; BOULTER, 1998; GRECA; MOREIRA, 2000; DEVELAKI, 2007; COLL; LAJIUM, 2011; SEEL, 2017). Para Harrison e Treagust (1998; 2000), modelizar é a essência do pensamento e do trabalho científico. Para Coll (2005), é uma ferramenta-chave para cientistas, professores e estudantes de ciências e o papel crucial deles na Ciência justifica sua inserção no ensino. Ainda dentro do ensino de ciências mas apoiando-se em uma perspectiva filosófica, Koponen (2007) defende que a relação entre a teoria e o mundo conforme acessado pelos sujeitos é o que fundamenta as discussões sobre modelos e modelização (KOPONEN, 2007).

Essas considerações, entre muitas outras referentes ao vasto e fértil tema dos modelos e da modelização no ensino de ciências, atestam a onipresença dos modelos na história da ciência moderna e na prática científica. Mas enquanto a relevância e ubiquidade dos modelos é praticamente uma unanimidade nos campos da filosofia da ciência e do ensino de ciências, curiosamente o mesmo não pode ser dito sobre o conceito de modelo e o significado da modelização. Nesse capítulo, focalizaremos na apresentação das principais concepções de modelo na literatura da educação científica. Sem pretender realizar uma revisão exaustiva de um tema tão extensivamente estudado, destacamos três visões do que são modelos que podem ser diferenciadas com clareza - mesmo não sendo, necessariamente, mutuamente excludentes - e cuja influência é marcante nos trabalhos produzidos na área. Nosso objetivo ao apresentar essas visões é, inicialmente, evidenciar a multiplicidade de concepções distintas de modelos que permeiam as discussões sobre modelização no ensino de ciências.

A partir dessa apresentação, procuramos elaborar uma síntese crítica, examinando alguns pontos em comum e alguns afastamentos entre essas visões, além de indicar, de forma sintetizada, pontos de maior contribuição ou eventuais lacunas.

Finalmente, situamos nossa própria compreensão de modelos dentro desse contexto, articulando nossas considerações sobre as visões encontradas na literatura à luz do referencial teórico filosófico que fundamenta essa tese - apresentado no capítulo anterior -, especialmente das considerações advindas da transposição desse referencial para o contexto do ensino de ciências.

Antes, porém, apresentaremos brevemente nossa motivação para o estudo dos modelos e da modelização na educação científica. Como evidenciado mais adiante, na literatura da área é possível encontrar trabalhos que inspiram-se em diversas distintas problemáticas educacionais e didáticas para pensar o tema modelos, resultando em diferentes visões e propostas. Especificamente nessa tese, acreditamos que explicitar essa motivação poderá ajudar a compreender a escolha do referencial teórico, da concepção de modelo e da abordagem metodológica implementada nesse estudo.

2.1 Algumas visões na literatura do ensino de ciências

O tema modelos constituiu-se como área de investigação no campo da educação científica principalmente a partir dos anos 1980. Durante essa década, os estudos sobre modelos concentravam-se principalmente em questões relacionadas às representações espontâneas dos estudantes, influenciados pelo então ascendente Movimento das Concepções Alternativas (MCA). É o caso de estudos como os de Osborne, Bell e Gilbert (1983); Gilbert e Watts (1983); Osborne e Wittrock (1983); Driver, Guesne e Tiberghien (1985); Driver et al (1985), Driver e Oldham (1986); Driver (1989); von Glaserfeld (1989), entre outros. Ao mesmo tempo, começam a surgir trabalhos inspirados em contribuições da filosofia da ciência, área em que a temática dos modelos emergiu com maior ênfase a partir dos anos 1960, encontrando-se, portanto, já bastante desenvolvida. Nessa linha, é possível identificar trabalhos como os de Lind (1980); Hodson (1985, 1988); Matthews (1989), entre outros.

Apesar do amplo consenso da importância dos modelos, não há, na área, uma definição única de modelo. Um dos motivos para isso talvez esteja na própria filosofia da ciência, campo no qual também esse conceito é entendido de diferentes formas. Ainda assim, existem evidências quantitativas e qualitativas de que práticas de ensino baseadas em modelos têm efeitos positivos na aprendizagem científica. Alguns exemplos podem ser encontrados nos trabalhos de Halloun e Hestenes (1987); Clement, (1989), Grosslight et al (1991); Harrison e Treagust, (2000b); Angell et al (2008) e Justi e Gilbert (2016), entre muitos outros que poderiam ser citados.

O próprio conceito de modelo é altamente polissêmico, com significados na educação científica talvez ainda mais fragmentados do que na filosofia da ciência. Trata-se de uma característica que não é recente, mas parece ter se desenvolvido quase ao mesmo tempo que se iniciava a discussão sobre modelos no ensino. Ainda nos anos 1980, Anne-Marie Drouin assinalava que "*... esse conceito é, na verdade, muitas vezes usado de maneira contraditória ou abusiva, a ponto de ser considerado por alguns como uma simples moda*" (DROUIN, 1988, p. 2, tradução nossa). Até mesmo os termos usados para exprimir os processos de construção de modelos são variados. Na literatura da área, podemos encontrar, por exemplo: *modelização* (PINHEIRO, 1996), *modelação* (GRECA; SANTOS, 2005), *modelagem* (KRAPAS et al, 1997; KRAPAS; SANTOS, 2002) e *modelamento* (BARBOSA; BORGES, 2006). Em todo caso, ainda que não pareça razoável esperar pela emergência de uma conceituação unificada - se não por outro motivo, porque sempre são possíveis diferentes *modelos de modelo* -, parece-nos importante explicitar essa polissemia e delinear os pontos de aproximações e de afastamentos.

A variedade de concepções sobre modelos, quer na filosofia da ciência, quer na literatura educacional, também se manifesta nos diferentes propósitos para o ato de modelizar que podem ser encontrados nessa última. Alguns dos objetivos encontrados nesse arcabouço são: simplificar os fenômenos e facilitar sua visualização (GILBERT; BOULTER, 1998); instrumentalizar os estudantes a representar a realidade usando teorias gerais (PIETROCOLA, 1999); aproximar as representações internas dos sujeitos àquelas da ciência erudita (ADÚRIZ-BRAVO; MORALES, 2001); facilitar a construção

de modelos mentais que permitam compreender os modelos físicos (GRECA; MOREIRA, 2001); ajudar os estudantes a perceber as relações entre diferentes tipos de representações; ajudar a traduzir ideias físicas em linguagem matemática (UHDEN et al, 2012); além de múltiplos outros objetivos citados por Gilbert e Justi (2016), entre outros ainda que poderiam ser citados.

Um ponto comum é a existência de uma noção mais ou menos genérica de que os modelos seriam entidades que, de alguma forma, "representam" alguma coisa (DUIT; GLYNN, 1996). O alvo dessa representação pode ser uma ideia, um objeto, um evento, um processo ou um sistema (GILBERT; BOULTER, 1998). Embora muito usado, esse termo "representação" é de certa forma ambíguo na área de ensino de ciências (LEFKADITOU et al, 2014), com diferentes linhas de pensamento sobre como é que se dá essa representação. Além disso, essa concepção de modelos como eminentemente respresentativos tem sido questionada recentemente, como será visto mais adiante. Trata-se, em todo o caso, de um conceito bastante polissêmico, como notam Duit e Glynn (1996).

Na busca por compreender como o termo "modelo" estava sendo incorporado na literatura da pesquisa em ensino de ciências, Krapas et al (1997) realizam uma análise de quatro periódicos internacionais de língua inglesa - International Journal of Science Education (IJSE), Science Education (SE), Science & Education (S&E), e Journal of Research in Science Teaching (JRST) - cobrindo o período de 1987 a 1996. Os autores tomaram como categorias iniciais aquelas propostas por Gilbert e Boulter (1998)[8]. O ajuste dessas categorias à análise daquele material conduziu Krapas et al (1997) a delinear um conjunto de cinco categorias:

- Modelo mental: Modelo pessoal, construído pelo indivíduo. Krapas et al (1997) não consideraram necessário distinguir entre esse e modelo expresso.

8 "É possível diferenciar entre *sistemas alvo* (que existem na experiência comum e podem ser representados), *modelos mentais* (representações pessoais e privadas dos sistemas alvo), *modelos expressos* (que são expressos por um indivíduo através da ação, fala ou escrita), *modelos consensuais* (modelos expressos que foram submetidos a testagem por um grupo social, tais como aqueles tirados da comunidade científica, e sobre os quais concorda-se haver algum mérito) e *modelos de ensino* (modelos especialmente construídos para serem usados como auxílio à compreensão de um modelo consensual)" (GILBERT; BOULTER, 1998, p. 56, grifos dos autores).

- Modelo consensual: Modelo formalizado e compartilhado por grupos sociais.
- Modelo pedagógico: Essa categoria divide-se em modelo pedagógico *de sentido estrito*, significando a representação simplificada de conceitos com vistas a torná-los mais compreensíveis aos estudantes e *de sentido amplo*, que se refere a modelos de ação didática.
- Meta modelo: Modelos que buscam explicar o processo de construção dos modelos mentais ou consensuais.
- Modelagem como objetivo educacional: Referências à modelização como processo de construção de conhecimento no âmbito educacional.

Krapas et al (1997) concluem que a categoria mais frequente em sua amostra é a de modelo pedagógico, com 27 das 93 referências categorizadas no total, ainda que a maioria destas se refira ao sentido estrito. A categoria menos presente era então a de modelagem, com apenas nove ocorrências. Os autores destacam um aumento da ocorrência do termo "modelo" principalmente a partir do início da década de 1990, aparentemente motivado pelo surgimento das novas categorias de modelagem e meta-modelo. Krapas et al (1997) interpretam esse dado como um indicativo da crescente preocupação dos pesquisadores com os processos que subjazem os modelos, já que são tais processos que constituem a modelagem e também considerando que a reflexão sobre eles é que origina os meta-modelos. Contudo, os autores observam que sua análise não permite esclarecer quais referenciais teóricos específicos estariam sendo usados para fundamentar os trabalhos sobre os modelos e a modelização naquele período (KRAPAS et al, 1997).

Outro estudo de revisão dessa temática foi realizado por Brandão (2012), que consultou 32 periódicos da área, sendo nove em língua portuguesa, 16 em língua inglesa e sete em língua espanhola. Embora Brandão (2012) não explicite a metodologia da revisão, ao que parece esse estudo não buscou pela exaustividade, tendo em vista o grande número de periódicos consultados e o período longo - 19 anos, entre 1990 e

2009 - em contraste com a localização de apenas 97 ocorrências no total. Além disso, nesse trabalho há também um interesse maior nas simulações e no uso de ferramentas computacionais. As categorias propostas por Brandão (2012) contemplam: concepções e atitudes de professores sobre modelos e modelagem científica; reflexões e propostas enfatizando o papel dos modelos e da modelagem no ensino de Física; implementação e resultados de estratégias centradas nos modelos e na modelagem científica no ensino de Física; reflexões e propostas enfatizando o papel das simulações e da modelagem computacional no ensino de Física; implementação e resultados de estratégias centradas nas simulações e da modelagem computacional no ensino de Física e embasamentos epistemológicos sobre modelos e modelagem científica (BRANDÃO, 2012).

Uma revisão de literatura mais recente foi empreendida por Campbell et al (2015), abrangendo os mesmos periódicos de Krapas et al (1997) com exceção de *Science & Education* e adicionando o *Journal of Science Education and Technology*. Essa revisão cobriu, também, o intervalo de uma década - entre 2001 e 2011 - porém, diferentemente de Krapas et al (1997), os autores optaram por incluir na amostra apenas artigos que focalizavam a modelização no sentido de intervenção educacional, isto é, o que corresponderia à "modelagem como objetivo educacional". No total, 81 artigos foram considerados pertencentes a essa categoria, também referida pelos autores como "pedagogias de modelização" (*modeling pedagogies*). O propósito desses estudo centrou-se na busca por compreender como essas diferentes pedagogias de modelização vinham sendo empregadas na pesquisa em ensino de ciências.

Preliminarmente à análise de dados, Campbell et al (2015) adotaram a categorização inicial proposta por Oh e Oh (2011), que estabelece as seguintes classes de pedagogias de modelização:

- Modelização exploratória: investigação das propriedades de um modelo. Pode ser feita, por exemplo, alterando certos parâmetros deste e observando os efeitos.
- Modelização expressiva: enfatiza a expressão das ideias dos estudantes na tentativa de modelar algum fenômeno científico, sejam elas obtidas pela criação de modelos novos ou pela utilização de modelos já existentes.

- Modelização experimental: formulação de hipóteses e previsões com posterior testagem experimental.
- Modelização avaliativa: análise de limitações e méritos de um modelo, avaliação de qual modelo é mais adequado para certo fenômeno, além da comparação entre distintos modelos do mesmo fenômeno.
- Modelização cíclica: envolvimento dos estudantes em um processo contínuo de elaboração, avaliação e reelaboração de modelos.

Na amostra analisada por Campbell et al (2015), a categoria mais frequente foi a de modelização expressiva (44 artigos), seguida pela exploratória (35), experimental (28), avaliativa (27) e cíclica (22). Com relação ao próposito admitido para essas atividades de modelização, os autores indicam uma forte ênfase na busca por promover a compreensão conceitual em comparação a outras possibilidades como a natureza dos modelos ou de práticas científicas. Campbell et al (2015) também notaram que quase metade das pesquisas analisadas utilizava algum recurso tecnológico como ferramenta para implementar a modelização, o que foi interpretado como um indicativo da alta compatibilidade entre as pedagogias de modelização e o uso de tecnologias em sala de aula (CAMPBELL et al, 2015).

Outra distinção que pode ajudar a formar uma visão global desse debate é sintetizada por Gilbert e Justi (2016). Os autores diferenciam o "ensino baseado em modelos" (*model-based teaching*) - entendido como o uso de modelos pelos alunos - do "ensino baseado em modelização" (*modelling-based teaching*, MBT) que inclui, além do uso, a criação de modelos por parte dos alunos. Dado que a apropriação conceitual depende em qualquer caso da elaboração de um modelo mental por parte do sujeito, Gilbert e Justi (2016) observam que mesmo no ensino baseado em modelos há uma construção, embora menos rica do que no caso do MBT, que é o objeto de análise dos autores.

Com base nessa distinção, Gilbert e Justi (2016) tomam uma categorização que já haviam proposto anteriormente (GILBERT, 2004; JUSTI; GILBERT, 2002) de

abordagens da aprendizagem sobre modelos e modelização e a distribuem de acordo com sua proximidade da MBT. Essa distribuição é apresentada na Figura 1. Nela, as categorias são entendidas como:

- Aprender modelos curriculares: O foco é na aprendizagem do modelo que faz parte do currículo escolar como um produto. Esses modelos curriculares podem ou não ser aprendidos a partir do uso de modelos de ensino (tais como analogias, desenhos e esquemas, entre outros);
- Aprender a usar modelos: Aplicação de um modelo já apresentado ao aluno em um certo contexto no qual esse modelo possa resolver um problema ou suscitar uma explicação;
- Aprender a revisar modelos: Tendo aprendido um certo modelo, propor mudanças a ele buscando torná-lo aplicável a outra situação diferente da apropriação original;
- Aprender a reconstruir modelos: Recriação de um modelo em um modo de representação novo, por parte do aluno. Nessa categoria, o modelo a ser reconstruído já é conhecido pelo aluno em algum modo de representação. Preferencialmente, deverá ser um processo criativo no qual novos aspectos e detalhes do modelo são destacados;
- Aprender a construir modelos *de novo*: Nesse tipo de atividade o aluno desenvolve todo o processo de modelização sem conhecer previamente o modelo que resultará. Portanto, ele deverá propor questões sobre o objeto, planejar sua atividade, realizar testes, refletir e avaliar seus resultados.

Os autores apontam ainda que essas abordagens não são mutuamente excludentes, isto é, uma atividade de modelização pode envolver mais de uma dessas perspectivas simultaneamente. Outro aspecto que pode ser observado é que essa categorização, em si, não faz referência a qual conceito de modelo é considerado pelo proponente de alguma atividade de modelização qualquer, sendo em princípio aplicável a qualque concepção de modelo. Trata-se de uma classificação útil para entender e comparar, por exemplo, qual perspectiva de modelização os pesquisadores da área tem

em mente ao apresentar suas respectivas propostas pois, embora todas essas categorias estejam presentes na literatura, muitas vezes essa perspectiva não é apresentada de forma explícita. O diagrama mostrado na Figura 1 também ilustra o grau crescente de sofisticação das abordagens à medida em que estas aproximam-se do pólo da MBT.

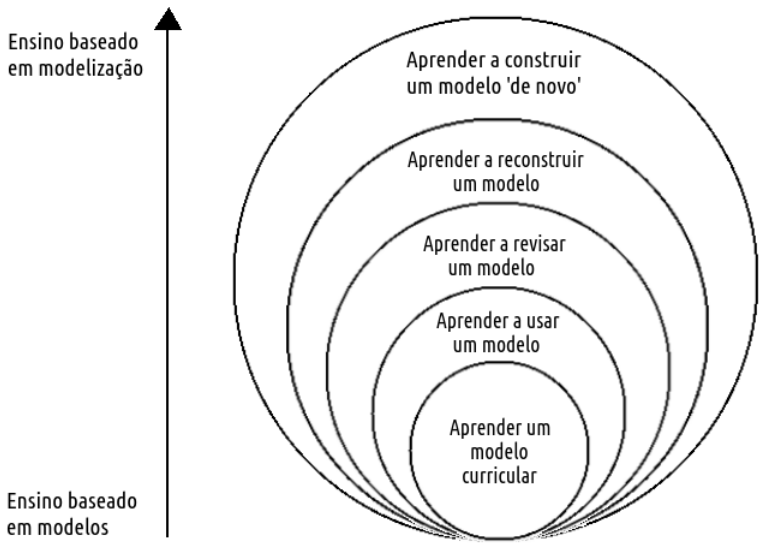


Figura 1. Abordagens à aprendizagem sobre modelos e modelização. Traduzida e adaptada de Gilbert e Justi (2016, p. 62), tradução nossa.

Buscando uma tipologia de modelos relevante ao contexto do ensino de ciências, Harrison e Treagust (1998) enfatizam o que chamaram de "modelos analógicos construtores de conceitos" (*concept-building analogical models*), que representam objetos e fenômenos reais da ciência. De acordo com esses autores, modelos analógicos tanto podem ser concretos (como maquetes) quanto abstratos (como campos magnéticos). Nesse espectro, Harrison e Treagust (1998) propõe então a tipologia de modelos apresentada no quadro 2. Essa classificação tem como objetivos auxiliar o professor de ciências naturais a compreender os requisitos conceituais que se impõem aos estudantes na conceitualização de cada tipo de modelo, além de evidenciar a multiplicidade de modelos que tomam parte na educação científica. Os tipos são

apresentados em ordem crescente de dificuldade conceitual (HARRISON; TREAGUST, 1998).

Harrison e Treagust (1998) apoiam-se ainda em uma perspectiva ausubeliana para argumentar que a aprendizagem é mais efetiva quando o conhecimento novo é construído sobre uma base de conhecimento anterior: daí se justificaria o valor do raciocínio analógico, por este apresentar o novo em termos do já conhecido. Assim, sugerem que o professor desafie os alunos a utilizar modelos gradativamente mais complexos e abstratos. Harrison e Treagust (1998) destacam, também, que nenhum modelo único pode dar conta de um conceito científico, mas deve haver uma multiplicidade, já que cada modelo permite representar apenas uma parte das propriedades de um objeto ou evento: portanto, é também tarefa do professor incentivar os estudantes a utilizar múltiplos modelos explanatórios sempre que possível.

Quadro 2. Tipologia de modelos analógicos construtores de conceitos, proposta por Harrison e Treagust (1998).

Classe	Tipo	Descrição
Modelos concretos ou concreto-abstratos	Modelos em escala	Maquetes de objetos ou seres reais, como animais, carros, aviões ou pontes.
	Modelos analógicos pedagógicos	Modelos concretos, usados no contexto educacional para representar entidades abstratas ou não-visualizáveis como átomos e moléculas.
Modelos desenhados para comunicar a teoria	Modelos icônicos e simbólicos	Representações convencionais, tais como as fórmulas químicas de compostos.
	Modelos matemáticos	Representações matemáticas de propriedades, leis e processos, por exemplo na forma de equações ou gráficos.
	Modelos teóricos	Representações analógicas teóricas, tais como linhas de campo ou fótons.
Modelos que	Mapas, diagramas e	Representam padrões, caminhos ou

retratam múltiplos conceitos ou processos	tabelas	relações, como árvores filogenéticas, cadeias alimentares e a tabela periódica
	Modelos conceito-processo	Referem-se a processos, e não a objetos, tais como a explicação da refração como o movimento de rodas atravessando a interface entre meios.
	Simulações	Modelam processos altamente sofisticados, como o aquecimento global ou o vôo de uma aeronave.

Ainda que Harrison e Treagust (1998) considerem a totalidade dos tipos que propõem como sendo modelos de natureza analógica, essa consideração não é consensual na literatura da área. Embora esse certamente seja o caso de maquetes e análogos concretos, nem todos os estudos sobre modelos matemáticos, por exemplo, tem necessariamente essa conotação. Percebemos que essas duas perspectivas - modelos como analogias e modelos matemáticos - constituem duas grandes linhas de pensamento sobre modelos no contexto da pesquisa em ensino. Por esse motivo, iremos discuti-las separadamente nas páginas a seguir. Além destas, incluiremos uma nova compreensão de modelos como artefatos epistêmicos, trazida recentemente para o contexto do ensino por Gilbert e Justi (2016). Esperamos que essa abordagem permita ressaltar as ênfases das diferentes linhas, especialmente suas compreensões do conceito de modelo. Posto que já existem diversos mapeamentos - alguns exaustivos - dessa temática na literatura da área, e apesar do alto grau de síntese inevitável em revisões de temas tão vastos como é o caso deste, esperamos com isso aprofundar o suficiente para permitir a discussão dos sentidos que vem sendo atribuídos aos modelos e à modelização nesse campo de pesquisa.

2.1.1. Modelos matemáticos

Consideramos nessa categoria trabalhos existentes na literatura da área que enfatizem o caráter matemático ao discutir a modelização. Isso não significa, necessariamente, que tais trabalhos considerem a modelização exclusivamente como o estabelecimento de relações matemáticas, mas apenas que deem maior ênfase à questão da relação entre os aspectos físicos e matemáticos na compreensão de modelização que desenvolvem. Além disso, há diferentes formas de compreender essa relação entre esses trabalhos, algumas incompatíveis entre si, e outros aspectos dos modelos também aparecem de forma complementar em alguns desses trabalhos.

Alguns dos primeiros trabalhos que tratam dos processos de construção de modelos no ensino de ciências focalizam justamente a modelização matemática. Nessa vertente, destacam-se os trabalhos pioneiros de David Hestenes e Ibrahim Halloun, inicialmente voltados a professores e estudantes do ensino superior (HESTENES; HALLOUN, 1987; HESTENES, 1987) e direcionados ao ensino de física. Em essência,

> Um modelo é um objeto substituto, uma representação conceitual de uma coisa real. **Os modelos na física são modelos matemáticos**, o que significa dizer que propriedades físicas são representadas por variáveis quantitativas nos modelos. (HESTENES, 1987, p. 441, tradução nossa, grifo nosso)

Nessa linha, Guillon (1995) esquematiza quatro processos que fariam parte do trabalho do físico no desenvolvimento de modelos para inspirar seu trabalho didático. Tais processos dariam origem a quatro distintos tipos de modelos, que deveriam então ser confrontados entre si.

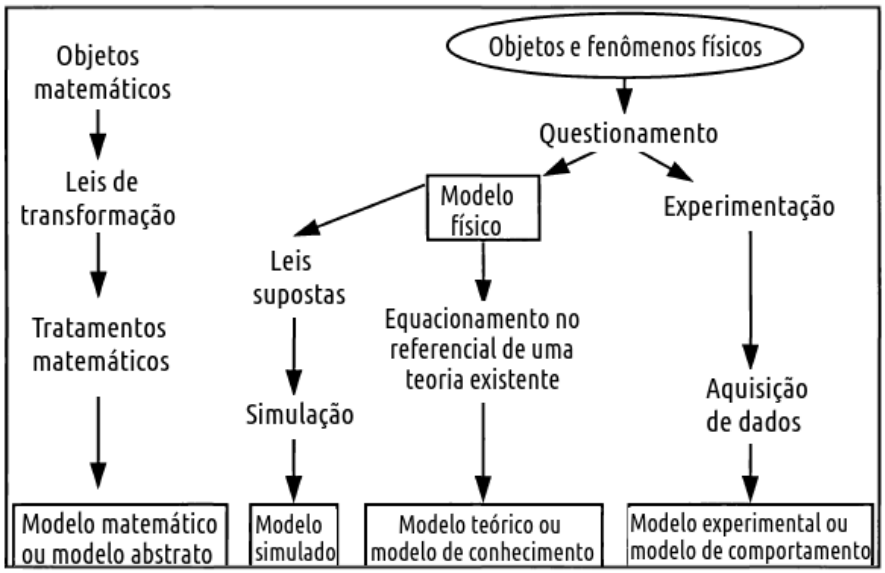


Figura 2. Processos do físico. Traduzido e adaptado de Guillon, 1995, p. 116.

Embora o esquema apresentado por Guillon (1995) refira-se diretamente ao trabalho do físico, o autor pressupõe que a base da formação do físico seja, também, a base do ensino de física: portanto, práticas de ensino de física deveriam refletir, em essência as práticas desenvolvidas pelos físicos em suas investigações. Apesar de afirmar em seu trabalho que a teoria e a experiência são interligadas de forma indissolúvel, Guillon (1995) apresenta diferentes processos que dão origem a diferentes modelos, sejam teóricos ou experimentais, com relação a fenômenos físicos.

A posicionamentos como os de Guillon (1995), opõem-se Uhden et al (2012), quando apontam problemas inerentes à distinção entre modelos puramente matemáticos e puramente físicos. Para esses autores, a história e a filosofia da ciência não corroboram a sustentabilidade dessa distinção. Consideram, também, a dificuldade em traçar uma fronteira nítida entre o físico e o matemático em muitas situações da Física, tais como a consideração de um raio de luz como uma linha reta (representação geométrica) ou de entidades físicas que são representadas como vetores (UHDEN et al, 2012). A crítica a essa distinção também é partilhada por Roque (2005), para quem

> Uma análise que considere separadamente os aspectos físico e matemático de um problema pressupõe, mesmo que implicitamente, que a Física trabalha com a realidade, ao passo que a Matemática deve fornecer condições formais para a descrição física desta realidade. O preço dessa suposição é o de relegar, ao mesmo tempo, a Física a um saber incapaz de se legitimar a si mesmo e a Matemática a uma abstração, a uma mera formalização sem mundo. Este preço é alto, pois tem por consequência um enfraquecimento de ambas tanto da Matemática como da Física (ROQUE, 2005, p. 292).

Outra abordagem da modelização com ênfase na matematização é oferecida por Pinheiro (1996), entitulada pela autora como "modelização de variáveis". Trata-se de uma proposta em que se compreende a modelização como a construção do modelo matemático de um problema concreto (que pode ser físico), através de atividades experimentais. Nos exemplares desenvolvidos por Pinheiro (1996), esse modelo matemático envolve principalmente funções, que são obtidas pelos alunos a partir dos dados experimentais e expressas em forma de tabela, gráfico e algébrica. Portanto, envolve elementos principalmente da terceira e da quarta coluna do esquema de Guillon (1995), mas também sinaliza para aspectos de idealização e abstração presentes na elaboração dos modelos. Como esses aspectos não se encontram na atividade experimental em si, precisam ser introduzidos pelo professor em sua mediação didática (PINHEIRO, 1996). Um procedimento metodológico muito semelhante, embora sem a mesma ênfase em questões relativas à natureza idealizada e abstraída dos modelos construídos foi proposto mais de dez anos depois por Angell et al (2008), sob o nome de "modelização empírico-matemática" (*empirical-mathematical modelling*).

Na linha da educação matemática, diversos trabalhos recentes tem avançado na direção dos chamados "ciclos de modelização" (*modelling cycles*) (Borromeo Ferri, 2006; Blum and Borromeo Ferri, 2009; Rodriguez, 2008; Prediger, 2010), entendidos como um "*... processo de tradução entre o mundo real e a matemática, em ambas direções*" (BLUM; BORROMEO FERRI, 2009, p. 45, tradução nossa).

Um ciclo amplamente utilizado (com mais de 230 citações à época da redação desse texto) é o ciclo de modelização proposto por Blum e Leiß (2007), cujo esquema é apresentado na Figura 3. Uma situação-problema dada, esquematizada pelo sujeito que

realiza a tarefa, forma o que os autores chamam de *situação-modelo* (1). Um processo de simplificação (2) reduz o problema de modo a representá-lo geometricamente, ao que os autores chamam *modelo real*. A identificação de que se trata de um triângulo retângulo fornece então o *modelo matemático* (3). A partir daí o ferramental matemático permite uma resolução, conduzindo a resultados matemáticos (4). Em seguida, deve-se interpretar esses resultados no mundo real (5) e avaliar a razoabilidade desses resultados tendo em conta as diferenças entre o modelo real e a situação modelo (6 e 7) (BLUM; LEIß, 2007).

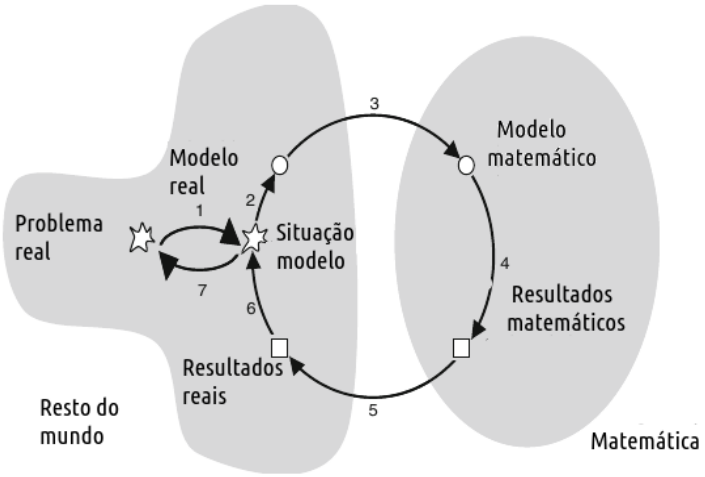


Figura 3. Ciclo de modelização. Traduzido de Blum e Leiß, 2007, p. 225.

Em que pese o avanço das últimas propostas de ciclos de modelização em comparação ao esquema de Guillon (1995), no que tange ao ensino de Física, Uhden et al (2012) tecem também a estes algumas críticas. Notam, em primeiro lugar, que todos esses ciclos ainda trazem os modelos físico e matemático como duas entidades totalmente separadas, dois estados distintos na esquematização do ciclo. Na concepção desses autores, é necessário que um ciclo de modelização para o ensino de física considere explicitamente o emaranhamento próprio da matemática com a física. Além disso, observam que os ciclos propostos na literatura da educação matemática não contemplam, via de regra, a possibilidade de diferentes graus de matematização do

problema de origem: por exemplo, ao se dizer que "*A* é proporcional a *B*"; que "*A* ~ *B*"; ou que "*A* = const. *B*".

Schuchardt e Schun (2016) também tomam a problemática da integração entre os conhecimentos das ciências naturais e da matemática como motivação do seu debate sobre a modelização. Para expor sua compreensão desse processo, Schuchardt e Schun (2016) sugerem uma atividade experimental em que mede-se a aceleração de um carrinho em função de um contrapeso ligado a ele. Schuchardt e Schun (2016) imaginam que um estudante poderia descrever esse fenômeno afirmando que, à medida em que a massa aumenta, a aceleração diminui. Daí, alegam os autores, essa relação poderia ser representada como a=F/m, entendida pelos autores como a Segunda Lei de Newton. A obtenção da equação por um processo desse tipo configuraria uma modelização dessa lei. Schuchardt e Schun (2016) argumentam que a atribuição de significado e a compreensão conceitual dos estudantes beneficiam-se da modelização, em constraste com a mera apresentação direta da equação em um livro didático.

Em síntese, podemos dizer que existe um subconjunto dos estudos sobre modelização que concebe a construção de um modelo como a obtenção de uma representação matemática de um certo fenômeno. Essa representação costumeiramente adquire a forma de uma equação ou um construto geométrico - ou ambos - e frequentemente envolve a experimentação, quer como procedimento de coleta de dados iniciais a serem manipulados, quer como técnica de validação do do modelo. Essa posição pode ser resumida na conclusão de Grandy em seu artigo "*What are models and why do we need them*":

> [...] Minha análise sugere que 'modelos' na física são frequentemente representados matematicamente e, se isso estiver correto, uma atenção mais cuidadosa deve ser devotada a integrar matemática e o currículo de ciências. [...] Modelos são necessários na física quando uma representação apropriada da realidade requer uma equação na qual ocorrem duas variáveis e que não é linearmente aditiva (GRANDY, 2003, p. 777, tradução nossa).

2.1.2 Modelos como analogia

Entre as primeiras propostas de modelização no contexto do ensino de ciências que dão destaque para o papel das analogias está o trabalho de John Clement (Clement, 1989). Esse autor busca aportes na filosofia da ciência, especialmente em questões como o papel da indução e a origem das hipóteses científicas. Fundamentando-se em autores como Harre (1961), Nagel (1961), Hesse (1966) e Black (1962), Clement (1989) argumenta que o raciocínio analógico oferece uma importante fonte não-indutiva de hipóteses para a ciência e, portanto, também pode fazê-lo no ensino de ciências. Assim, o reconhecimento de analogias poderia ser tão importante para a construção inicial de um modelo quanto as observações.

No mesmo ano da publicação do artigo de Clement, Dupin e Joshua (1989) propuseram a "analogia de modelização" (*modeling analogy*). Esses autores esclarecem o que entendem por analogia supondo um modelo M que modela um objeto O; postulam, então, a existência de um segundo par, M' e O', tal que existem "relações isomórficas estruturais" entre M e M'. Assim, M' seria um análogo de M. A analogia de modelização seria útil quando os estudantes tem mais familiaridade com O' do que com O; nesse caso, a modelização poderia ser feita trabalhando inicialmente com O' e M' e depois retornando à M por meio de uma relação analógica (DUPIN; JOSHUA, 1989).

De forma semelhante, para Duit e Glynn (1996), relações analógicas são a essência dos modelos: "*... são as relações análogicas que fazem do modelo um modelo*" (DUIT; GLYNN, 1996, p. 146). Modelizar, portanto, significa construir analogias. Apoiando-se em referenciais piagetianos e em outros autores ligados ao movimento da mudança conceitual, de inspiração cognitivista, esses autores entendem a aprendizagem como o desenvolvimento dos modelos mentais dos estudantes, desde seus modelos pré-instrucionais, em direção a modelos mais semelhantes aos modelos conceituais ensinados. Algumas vantagens do uso de analogias apontadas pelos autores são atuarem como ferramentas para a mudança conceitual; facilitarem o entendimento de uma abstração, ao mostrar suas similaridades com o mundo real; permitirem a visualização de uma abstração e motivarem o interesse dos alunos. Em contrapartida, assinalam também algumas desvantagens: elas podem ser enganosas; nunca há correspondência

total entre o alvo e o análogo e o raciocínio analógico funciona apenas quando os estudantes dominam, de fato, o análogo (DUIT; GLYNN, 1996).

Em sua discussão sobre modelos mentais e modelização, Greca e Moreira (2000) apoiam-se na teorização do psicólogo cognitivista Johnson-Laird, cuja característica mais ressaltada é justamente a consideração de modelos mentais como representações analógicas da realidade (GRECA; MOREIRA, 2000). Compreender um fenômeno físico qualquer, por exemplo, envolveria justamente possuir um modelo mental sobre aquele fenômeno. Com relação à modelização em si, Greca e Moreira destacam se tratar de um processo altamente complexo, sobre o qual ainda se sabe muito pouco. Apesar disso, apontam que a modelização pode constituir um caminho mais frutífero para a aprendizagem significativa do que a simples apresentação de modelos e que os iniciantes possuem as ferramentas básicas para a construção de modelos, que seriam fazer analogias, criar simulações mentais e fazer idealizações e abstrações (GRECA; MOREIRA, 2000).

A centralidade da analogia também é assumida na proposta do *modelo didático-analógico* (GALAGOVSKY; ADÚRIZ-BRAVO, 2001). Trata-se do desenvolvimento de modelos para fins didáticos, baseados em uma relação análogica. Nessa proposta, é o professor que gera a analogia, por já conhecer de antemão o objeto a ser modelado e escolher quais de seus aspectos serão alvo da analogia. O trabalho do professor seria o de traduzir esses aspectos para alguma situação familiar aos alunos, quer seja do cotidiano, do senso comum ou da ficção científica (GALAGOVSKY; ADÚRIZ-BRAVO, 2001). Mas a ideia de um modelo construído especificamente para o contexto do ensino, visando auxiliar a compreensão de um modelo científico já havia sido categorizada anteriormente por Gilbert e Boulter (1998).

Como forma de implementar uma estratégia didática baseada nessa proposta, Galagovsky e Adúriz-Bravo (2001) sugerem que o professor apresente o análogo antes do referente científico, para que os fenômenos que ocorrem na situação análoga (familiar) sejam discutidos. Apenas após essa etapa apresenta-se o conteúdo científico escolar propriamente dito. A tarefa dos alunos, então, consistiria em identificar as relações entre o modelo didático-analógico e o modelo científico escolar, localizando

suas semelhanças e diferenças. Por fim, os autores postulam um terceiro momento, no qual se requer dos alunos uma análise rigorosa das operações metacognitivas que realizaram na etapa anterior: os recortes, aproximações, simplificações, e assim por diante. Os autores esperam que esse último momento promova uma tomada de consciência do salto cognitivo proporcionado pela atividade. No exemplo apresentado pelos autores, busca-se modelizar os processos de locomoção dos diferentes agentes em dinâmica celular. As questões propostas para a discussão do modelo analógico são: d*esloca-se sozinho? de que forma? do que depende seu deslocamento? alguém ajuda?* Algumas associações propostas para o estabelecimento de analogias são: a fumaça como água intra e extracelular; moscas e mosquitos como transporte ativo; elefantes como macromoléculas; ladrões como vírus; entre outros (GALAGOVSKY; ADÚRIZ-BRAVO, 2001).

Nesse ponto, novamente observamos a pré-existência de uma proposta extremamente semelhante às etapas sugeridas por Galagovsky e Adúriz-Bravo em seu "modelo didático-analógico". Trata-se da proposta "ensinando com analogias" (*teaching-with-analogies*, ou TWA), publicada dez anos antes por Shawn Glynn (Glynn, 1991). Um exemplo da TWA é a modelização do átomo de Bohr imaginando-o análogo a uma estante de livros: os livros seriam os elétrons, as prateleiras representariam os níveis de energia e o núcleo seria o chão (Metsala e Glynn, 1996).

Em Gilbert et al (1998) encontra-se a afirmação de que todos os modelos os modelos são formados por um processo de construção de analogia. As analogias seriam estabelecidas entre a fonte (*source*) - algo que é percebido como semelhante, de alguma forma, ao fenômeno de interesse - e o alvo (*target*), isto é, o fenômeno que se pretende modelar. O alvo pode ser um objeto, um evento, um processo ou uma ideia. A fonte, portanto, é alguma entidade mais familiar que servirá como análogo. Essa relação pode ser visualizada na Figura 4. O valor dos modelos para o contexto do ensino está em eles possibilitarem melhor visualização e acessibilidade a conceitos intrinsecamente abstratos, além de poderem constituir referenciais de organização de conhecimentos que, de outra forma, pareceriam fatos isolados (tais como diagramas e espectros). Um terceiro papel dos modelos no ensino estaria em indicar o nível de "adequação"

(*appropriateness*) da abordagem, entendida como uma medida do quão apropriadamente uma explanação satisfaz a uma questão, considerando o momento e as condições em que esta é colocada (GILBERT et al, 1998).

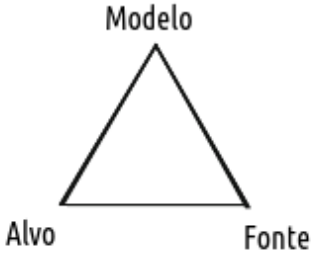


Figura 4. Relação modelo-alvo-fonte. Traduzido de Justi e Gilbert (2006).

Voltando-se ao contexto do ensino de química, Chamizo (2013) busca suporte em discussões da filosofia da ciência, como os trabalhos de Black (1962), Hesse (1966) e Harré e Rothbart (2004) e define: "... *modelos (m) são representações, usualmente baseadas em analogias, que são construídas contextualizando certa parte do mundo (M), com um objetivo específico*" (CHAMIZO, 2013, p. 1618, tradução nossa). Um ponto adicional na discussão de Chamizo (2013) é a sua suposição, seguindo Morgan e Morrison (1999), que os modelos são mediadores. Trata-se assim de uma compreensão que não se resume a pensar os modelos como análogos, mas que também envolve uma noção destes como mediadores entre os domínios empírico e teórico. Para esse autor, modelos são principalmente ideias, mas também podem ser objetos concretos. O processo de construção de modelos seria uma espécie de harmonização entre as similaridades e diferenças do modelo em relação à parte do mundo real que se pretende modelar. Esse processo serviria para formar um modelo mental que, em seguida, deveria ser usado para expressar um modelo material (simbólico, icônico ou experimental). Por fim, o modelo material formado deveria ser sujeito à constrastação com o recorte do mundo real que se pretende modelar (CHAMIZO, 2013).

2.1.3. Modelos como artefatos

A terceira concepção de modelos - como *artefatos* - provém de uma contribuição recente da área da filosofia da ciência, devida à filósofa finlandesa Tarja Knuutila (KNUUTILA, 2005, KNUUTILA; BOON, 2011). Ainda mais recente é sua apropriação pela área da educação científica, ocorrendo principalmente a partir dos trabalhos de John Gilbert e Rosária Justi (GILBERT; JUSTI, 2016). De acordo com a proponente dessa concepção, os modelos não apenas são agentes mediadores autônomos e parcialmente independentes da teoria e dos dados, no sentido proposto por Morgan e e Morrison (1999), mas devem ser vistos para além da relação entre teoria e realidade: seriam independentes dos objetos e sistemas do mundo real. O conceito de modelo seria o de um artefato epistêmico, que teria muito mais objetivos além do de representar e que deveria ser interpretado *materialmente* (KNUUTILA, 2005). Dito de outra forma,

> Sugerimos conceber modelos como *objetos concretos* construídos para certos *objetivos epistêmicos* através de diversos meios representacionais, cujo valor cognitivo deriva largamente de nossa *interação* com eles [...] modelos científicos podem ser vistos como *ferramentas epistêmicas* multifunctionais. (KNUUTILA; BOON,, 2011, p. 314/315, grifo dos autores).

Knuutila e Boon (2011) esclarecem que o seu uso do termo "concreto" refere-se a "*ter uma dimensão tangível que pode ser trabalhada*" (KNUUTILA; BOON, 2011, p. 315). Para eles, essa concretude seria conferida ao modelo através de sua "incorporação material", isto é, um meio representacional concreto que lhe daria coesão espaço-temporal e assim o tornaria manipulável. Embora não neguem que os modelos possam ser também representacionais, os autores propõem não haver distinção em princípio entre modelos concretos e abstratos pois, mesmo quando o sujeito opera com objetos abstratos, ele o faz congregando e manipulando meios representacionais concretos, tais como equações, diagramas, figuras, maquetes, símbolos, e assim por diante.

Além da valorização do caráter concreto do modelo, Knuutila e Boon (2011) enfatizam que sua posição oferece uma alternativa às perspectivas representacionalistas

dos modelos. O problema em considerar modelos como representações de um alvo externo, segundo esses autores, é que tais representações supostamente tem como referência um "algo além" de si mesmas, mas esse "algo além" não é acessível a não ser por via de outras representações. A alternativa que os autores defendem é, essencialmente, substituir a *representação* como noção básica do conceito de modelo pela ênfase no *objetivo epistêmico*, isto é, na questão com a qual se pretende lidar ao construir o modelo (KNUUTILA; BOON, 2011).

Para demonstrar como essas considerações permitiriam interpretar a prática científica, Knutilla e Boon (2011) apoiam-se em uma análise do desenvolvimento do modelo da Máquina de Carnot. Nessa ótica, o primeiro passo de Sadi Carnot teria sido partir de uma questão fundamental que teria servido como *propósito epistêmico* (KNUUTILA; BOON, 2011): há limite para a melhora da eficiência de uma máquina térmica? Para dar conta dessa questão, Carnot constrói um artefato tecnológico que funciona idealmente. Os autores argumentam que essa modelização desenvolvida por Carnot não tem como principal característica representar algo, mas produzir um dispositivo hipotético que atenderia ao seu propósito epistêmico. O modelo da máquina de Carnot não guarda, segundo os autores, relações de isomorfismo ou de similaridade com máquinas térmicas reais, como seria de se esperar dentro da visão semântica de modelos. Isso não significa, porém, que esse modelo não possua qualquer relação com máquinas reais: são elas que motivam o seu desenvolvimento. O modelo de Carnot seria uma *ferramenta epistêmica* (KNUUTILA; BOON, 2011).

Os autores discutem ainda uma série de elementos que seriam co-construídos durante o processo de modelização, além do propósito epistêmico (1). Tais elementos incluiriam:

> ... (2) as idealizações, abstrações e simplificações que torna o problema tratável e viável; (3) o fenômeno-alvo no qual o problema original é traduzido; (4) os meios representacionais específicos com os qua o sistema alvo imaginário (ou hipotético) é traduzido; (5) o conhecimento experimental e teórico usado na construção do modelo; (6) os conceitos, princípios e conceitualizações, alguns dos quais podem emergir no processo de modelização; e (7) os parâmetros relevantes observáveis ou mensuráveis, que possibilitam a

> coordenação do modelo com sistemas reais (KNUUTILA; BOON, 2011, p. 330, tradução nossa).

No caso da máquina de Carnot, os autores sublinham que o "fenômeno-alvo", longe de ser simplesmente observado, é de fato construído por Carnot. Recortando seu problema como a produção de movimento a partir do calor, Carnot produz então uma concepção científica desse fenômeno, ao modelá-lo como transporte de calórico ao longo do ciclo. Um conceito abstrato importante criado (e também não observado) por Carnot é a noção de *processo reverso*. Além destes, outros aspectos desse desenvolvimento histórico são analisados com maior detalhamento em Knuutila e Boon (2011).

No contexo do ensino, Gilbert e Justi (2016) adotam a noção de modelos como artefatos epistêmicos no sentido proposto por Knuutila. A justificativa apresentada por esses autores para sua mudança de posicionamento - já que anteriormente assumiam a visão semântica em suas publicações (GIBERT, 1993; JUSTI, 2006) - é a coerência entre os argumentos levantados por Knuutila e as ideias que eles têm desenvolvido, ao longo dos últimos, em suas pesquisa sobre a modelização no ensino de ciências. Alguns pontos em comum seriam a percepção dos autores de que os estudantes, ao trabalharem com modelos, empregam-nos como artefatos, além da relevância que atribuem para a questão da materialidade e dos múltiplos usos dos modelos, tais como: explicar, simplificar, abstrair, argumentar, representar, entre outros (GILBERT; JUSTI, 2016).

À luz das contribuições de Knuutila, Gilbert e Justi apresentam sua nova concepção de modelização para o ensino de ciências como um processo complexo, cíclico e não-linear, no qual não é geralmente possível estabelecer uma ordem de ocorrência dos estágios e sub-estágios que a constituem, ao contrário do que ocorre com algumas das propostas de modelização discutidas até aqui. A partir de um objetivo epistêmico inicial, é criado um *proto-modelo*, ou modelo mental inicial. Em algum momento, esse deve se tornar um *modelo expresso* em um ou mais modos de representação quaisquer - que podem ser maquetes, equações, simulações, gestos, desenhos, verbalizações, ou outros -, momento que marca a criação do modelo *per se*. Dessa forma, frisam os autores, o modelo propriamente dito (modelo expresso) não

representa uma "realidade". O que ele representa é o proto-modelo (GILBERT; JUSTI, 2016).

Nessa proposta, a fase de testagem do modelo poderia envolver testes empíricos ou experimentos de pensamento. O destaque dos autores com relação a esse momento é que não deve se tratar de um teste único. Como ocorre na ciência, uma série de testes são necessários para decidir pela aceitação do modelo. Alternativamente, falhas podem indicar sua rejeição e reelaboração. Por fim, a avaliação do modelo serviria para analisar questões como domínio de validade do modelo e suas limitações. Espera-se nesse momento que os sujeitos que elaboram o modelo procurem convencer os outros da validade e utilidade deste. Também pode ocorrer, caso o modelo seja excessivamente limitado, a necessidade de retornar a algum ponto anterior para reelaborá-lo (GILBERT; JUSTI, 2016).

Adicionalmente, Gilbert e Justi (2016) dão destaque a quatro processos cognitivos básicos que poderiam tomar parte em qualquer momento durante a modelização: o raciocínio analógico, o uso de representações imagísticas, experimentos de pensamento e argumentação. A identificação dos três primeiros é inspirada em Nersessian (2002, 2008). De forma consistente com o quadro teórico geral que elaboram, Gilbert e Justi (2016) não propõem momentos específicos únicos nos quais cada processo tomaria parte, mas discutem como eles podem ocorrer a qualquer tempo entre os estágios da modelização ou durante estes.

Para enfatizar as características de ciclicidade, não-linearidade e impossibilidade de pré-determinação do processo de modelização, Gilbert e Justi expressam-no na forma de um tetraedro, posicionando os quatro elementos (criação, expressão, teste e avaliação) em cada um dos vértices, como representado na Figura 5. Os autores denominam a proposta de "modelo de modelização v2", pois uma versão mais antiga já havia sido publicada (JUSTI; GILBERT, 2002). A opção por essa figura deve-se a apresentar todos os vértices equidistantes e ligados a todos os demais. Assim, a figura poderia ser "girada" sem prejuízo do entendimento dos significados nela representados. Em sua versão original, as arestas do tetraedro são representadas por cordas, cada uma

delas formada por quatro fios entrelaçados entre si, que por sua vez representam os quatro processos cognitivos básicos.

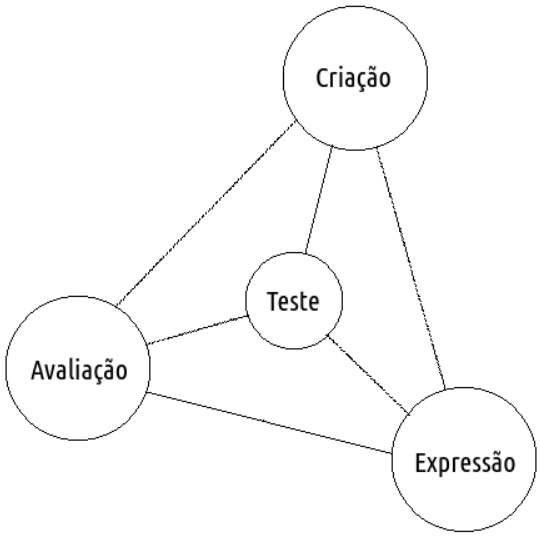


Figura 5. Modelo de modelização v2. Traduzido e adaptado de Gilbert e Justi, 2016, p. 36.

Outras versões do tetraedro do modelo de modelização, enfatizando os elementos básicos e os sub-processos que ocorrem em cada estágio, tem sido empregadas nos últimos anos para auxiliar professores no planejamento didático e também na própria formação de professores. Algumas das pesquisas que focalizam essas iniciativas podem ser consultadas em Gilbert e Justi (2016).

2.2 Discussão e posição própria

Sendo o tema dos modelos no ensino de ciências tão amplo, e o próprio conceito tão polissêmico, o que podemos considerar que há de compartilhado entre as distintas vertentes discutidas nesse capítulo, se é que há algo? Em primeiro lugar, deve-se notar que a categorização apresentada na seção precedente visou distinguir apenas as ênfases

de diferentes propostas e não pretende sugerir que as categorias sejam mutuamente excludentes. Isso significa que uma proposta de modelização que atribui maior peso a determinada característica presumida dos modelos não implica na rejeição de outros aspectos possíveis. Um exemplo evidente é a classificação de Harrison e Treagust (1998) que, embora considere a analogia como essência dos modelos, inclui os modelos matemáticos. De forma similar, propostas de modelização matemática eventualmente também podem envolver alguma forma de analogia; o mesmo ocorre com a proposta de Gilbert e Justi (2016), ainda que a noção de modelos como artefatos não possa ser reduzida a uma relação analógica. Assim, ao optar por apresentar as ênfases na proposição das categorias, deixamos de priorizar as visões de autores individuais, que poderiam envolver mais de uma categoria simultaneamente ou variar ao longo do tempo. Apesar disso, as propostas são suficientemente distinguíveis entre si a ponto de evidenciar a existência de diferentes "modelos de modelo", à semelhança do que ocorre no campo da filosofia da ciência.

Por outro lado, um aspecto comum é a noção de que essa representação é parcial, isto é, que os modelos não são cópias da realidade. Quer seja um modelo analógico, quer seja matemático, não há dúvidas de que alguns aspectos do referente são deixados de fora na modelização. Isso faz com que a discussão sobre modelos apareça frequentemente associada a noções como abstração e idealização, processos que examinamos na seção 1.2. Outro aspecto em comum que pode ser percebido em todas essas categorias é que, em qualquer caso, o modelo não é uma representação unívoca, ou seja, é possível propor diversas representações distintas para o mesmo referente real. Nesse sentido, todas elas distanciam-se de um realismo ingênuo. Ainda outra característica que poderíamos destacar é a existência de propostas semelhantes com diferentes nomenclaturas.

Tendo examinado de forma sintetizada as principais correntes de pensamento sobre modelos na ciência e no ensino de ciências, buscaremos nessa seção situar nossa própria compreensão de modelos que fundamenta esse estudo, relativamente a esse contexto. Ao fazer isso, estaremos nos baseando principalmente nas contribuições de Bunge, discutidas no capítulo anterior, no qual também justificamos a opção pelo

quadro de referência desse autor. Entendemos que a perspectiva desse autor afasta-se tanto da visão sintática quanto da visão semântica de modelos, enquanto guarda alguns pontos importantes em comum com a noção de modelos como mediadores, nas linhas de Cartwright (1983) e de Morgan e Morrison (1999).

Considerando a problemática que sustenta a escolha dos modelos como objeto de estudo, apresentada na Introdução - isto é, a relação entre o conhecimento científico escolar e a realidade -, é necessário ter por base um referencial que permita compreender essa relação, bem como os papéis da teoria, dos modelos de outros elementos que tomem parte no processo de modelizar o real. Na medida em que a teoria bungeana de modelos oferece um quadro consistente e bem articulado dessas relações, consideramos que a transposição de suas ideias para o contexto educacional poderá prover tais bases e potencialmente ensejar contribuições à essa problemática. Isto posto, procuramos nas próximas linhas contrastar a visão bungeana de modelos com as categorias apresentadas neste capítulo - modelos como analogias, modelos matemáticos e modelos como artefatos - visando justificar sua relevância relativamente ao problema de pesquisa dessa tese.

Embora Bunge considere inegável a importância da analogia para a ciência, atribui a esta o papel de ser uma espécie de "primeiro passo", mas não de determinante ou elemento principal dos modelos. Elas teriam um papel principalmente heurístico, podendo *sugerir* classes de equivalência, mas por si sós, não podem estabelecê-las. Em algumas situações elas podem ser úteis, especialmente em fases inicias da elaboração de certas teorizações, mas também podem ser tão enganadoras quanto frutíferas (BUNGE, 1974b). Uma das dificuldades que pode ser introduzida pelas analogias é a sua subjetividade, em contraste com o caráter compartilhado do conhecimento científico: o que parece semelhante a uma pessoa, pode parecer dessemelhante a outra. Outra questão é que o estabelecimento de uma analogia parece ser algo insuficiente para a apropriação conceitual de um certo objeto, porque a analogia é baseada em explicar o que é novo e desconhecido em termos do que é velho e conhecido, ao passo que o novo precisa ser diferente do velho em ao menos um aspecto importante, ou não seria realmente novo (BUNGE, 1973a). Em todo caso, Bunge define a formação dos objetos-

modelo em termos de classes de equivalência, e não em termos analógicos ou metafóricos.

Retomando a discussão sobre a problemática de modelos exposta na Introdução, estamos agora em condições de justificar mais claramente a opção pelo referencial bungeano em detrimento das visões de modelos como analogias. Em primeiro lugar, ao discutir a mediação entre o conhecimento científico e a realidade a que este se refere, precisamos de categorias de pensamento capazes de representar essas instâncias e aquelas que as mediam. Nesse sentido encontramos as categorias bungeanas - teoria geral, modelo teórico e objeto-modelo - como desempenhando justamente essa função: a teoria geral refere-se indiretamente (mediada pelo modelo teórico) a um objeto-modelo, enquanto o modelo teórico refere-se indiretamente (mediado pelo objeto-modelo) a um objeto ou conjunto de objetos ou eventos reais. Tais "estados" seriam por sua vez relacionados um ao outro por processos como as abstrações, idealizações e aproximações. Se o esclarecimento das relações entre o conhecimento e a realidade é um objetivo pretendido, a explicitação didática desses processos parece um caminho potencialmente mais frutífero do que a sugestão de analogias.

Com relação aos modelos matemáticos, notamos que o papel da matematização nas ciências naturais constitui um tema presente nos escritos bungeanos. Uma análise aprofundada das reflexões do autor sobre essa questão está além do escopo dessa tese, mas podemos dizer que, para Bunge, a matematização não é apenas um auxílio útil, mas integra-se à essência de muitos conceitos físicos, estando frequentemente relacionada de forma bastante próxima à interpretação dos enunciados científicos, como nas controvérsias relativas ao conceito de massa no séc XVIII e da função de estado na teoria quântica. No que tange a relação entre conhecimento teórico e realidade, o autor destaca que não há, na verdade, aplicação da matemática à realidade. O que é matematizado em uma teoria física não é a realidade e sim *algumas de nossas ideias sobre ela*. Na elaboração de um modelo matemático nas ciências físicas, o comprometimento ontológico da matemática não está no seu formalismo, mas nos pressupostos semânticos que especificam o tipo de coisa real à qual o modelo se refere e quais propriedades de tal coisa são representadas por conceitos existentes naquele

modelo (BUNGE, 1985). Nesses termos, uma reflexão sobre o papel da matemática no ensino de física tenderia a reforçar a perspectiva estruturante, segundo a qual não faria sentido analisar as partes física e matemática de um modelo separadamente, semelhante ao que foi argumentado por Uhden et al (2012).

Contudo, ao contrário do que fazem por exemplo Uhden et al (2012), no caso da problemática posta nessa tese interessa-nos mais os graus de articulação do modelo teórico com as teorias gerais (domínio teórico do conhecimento) do que seus graus de matematização. Daí que a concepção dos modelos teóricos como distribuídos em um espectro de caixas-pretas a caixas translúcidas constitua-se mais adequado, já que o foco está justamente nas maiores ou menores aproximações com os domínios empírico e teórico. Adicionalmente, por admitir a possibilidade de construção de modelos teóricos tanto pela abordagem de caixa-preta quanto pela articulação entre objeto-modelo e teoria, o referencial bungeano ajuda a explicitar o papel do modelo como elemento que possui relativa autonomia em relação a essas instâncias e que pode ser capaz de mediar entre elas.

Em resumo, Bunge reconhece a importância tanto das analogias quanto, especialmente, da matematização na construção do conhecimento científico, a ponto de sustentar que, sem tais recursos, esse tipo de conhecimento poderia não ser possível (BUNGE 1973a; 1973b). Ambos têm papéis a desempenhar na elaboração de modelos: as analogias trabalhando principalmente na heurística que pode originar classes de equivalência, e a matematização fornecendo uma estruturação para conceitos e modelos. Contudo, nenhum desses recursos é suficiente para definir ou identificar o que são modelos na visão desse autor, ou sequer subconjuntos de modelos como quer Coll (2005). Poderíamos dizer, usando a terminologia que ele emprega na sua teorização de modelos, que um objeto-modelo é algo mais que um analogia, bem como um modelo teórico é algo mais do que um modelo matemático. Portanto, um modelo conforme entendido na concepção bungeana, não é *redutível* quer seja à uma analogia, quer a um construto matemático qualquer, tal como uma equação.

Quanto à visão artefatual, não resta dúvida de que o conceito bungeano de modelo - mais notadamente, do objeto-modelo - consiste, assim como o modelo na

visão de Knuutila, em uma criação humana, por se tratar de uma *invenção,* o que remete também a uma tentativa de retratar o mundo por um processo imaginativo. Também notamos um alto grau de compatibilidade entre a modelização bungeana e a visão artefatual de Knuutila nos elementos do processo de modelização enfatizados pela autora, tais como as idealizações, abstrações e simplificações; a consideração tanto do conhecimento teórico quanto do experimental na construção de modelos; a autonomia dos modelos e a incompletude da representação que estes podem oferecer (KNUUTILA; BOON, 2011; KNUUTILA, 2005).

Por outro lado, a visão artefatual atribui destaque a outros aspectos dos modelos, além do seu papel representacional. Esse é um dos pontos de relativo afastamento entre a visão bungeana e a proposta de Knuutila. Na medida em que as noções de modelo trazidas no problema de pesquisa desse estudo giram em torno da relação entre a teoria e a realidade - que também é a ênfase em Cartwright (1983), Morgan e Morisson (1999) e Koponen (2007) - o caráter representacional dos modelos se constitui como o foco da abordagem, pois são as representações dos objetos do mundo que podem ser articuladas com as teorias, e não as suas expressões materializadas.

Especificamente com relação às propostas ligadas à visão semântica das teorias, ainda que discutam relações entre teoria e modelo e entre modelo e real (IZQUIERDO-AYMERICH; ADÚRIZ-BRAVO, 2003), não costumam colocar os modelos nesses termos, já que os vêem como subconjuntos das teorias. Isso motivou Koponen (2007) a sugerir revisões à VST, buscando exatamente enriquecê-la com a atribuição desse papel mediador aos modelos, com fundamentação explícita no trabalho de Morgan e Morrison (1999). A adoção do referencial bungeano não requer essa revisão pois já inclui esse papel como um pressuposto.

Outra consideração crítica da VST que pode ser desenvolvida a partir de Morrison (1999) é o esvaziamento de significado que essa visão acaba por impor às teorias. Ao defini-las como famílias de modelos, a VST elimina a necessidade de se falar em teorias, como foi notado pela autora. Isso é problemático no contexto do ensino porque tende a obscurecer o papel das teorias de funcionarem como princípios no sentido de guias heurísticos (CUSTÓDIO; PIETROCOLA, 2004) para a construção de

modelos. Sendo potencialmente aplicáveis a todo um domínio, ao contrário dos modelos - que tendem a ser específicos - as teorias também atuam frequentemente impondo vínculos às possibilidades dos modelos que podem ser criados dentro desse domínio. Entendemos portanto que a noção de teoria possui valor epistemológico por si mesma, por oferecer todo um sistema de pensamento que vai além da soma dos modelos a ela relacionados e do conjunto de sistemas empíricos que constituem sua referência. Nesse ponto, o referencial bungeano parece oferecer mais possibilidades ao tratar a categoria das teorias gerais separadamente dos modelos teóricos. Ao assim proceder, esse referencial torna mais clara a dinâmica de construção de modelos teóricos como uma articulação entre as teorias gerais e os objeto-modelo, explicitando assim a relação entre o teórico e o empírico.

Em adição, como foi notado por Morrison (2007), modelos frequentemente envolvem ingredientes que não estão contidos nas teorias. Assim, é possível que a mesma teoria conduza a diferentes modelos de um mesmo referente, de acordo com a escolha desses "ingredientes". A nosso ver, essa característica não pode ser ignorada se se procura compreender a relação entre o modelo e seu referente, à luz da discussão desenvolvida no capítulo anterior. Esses ingredientes de que fala Morrison (2007) são principalmente, em nossa interpretação, os objetos-modelo no sentido bungeano. Ao que parece, compreender que esses objetos constituem a referência do conhecimento científico - e não objetos reais - é indispensável para enfrentar a problemática da relação entre teoria e realidade discutida na Introdução dessa tese. Além disso, a explicitação da existência de diferentes objetos-modelo para o mesmo objeto real é importante para compreender que não há um modelo teórico "correto" em contraste com os "errados", desenvolvidos em momentos anteriores do processo de escolarização ou da história da ciência, mas modelos com diferentes aproximações, objetivos e domínios.

De forma semelhante, observamos que não cabe falar sobre "a" visão de modelos no ensino no sentido de uma concepção "correta" a ser escolhida. O que pode haver são propostas que apresentem maior ou menor sintonia com cada objetivo específico tomado. Isto é, as especificidades de cada estudo é que podem determinar as respectivas ênfases, estratégias metodológicas e concepções filosóficas que podem

contribuir de maneira mais efetiva à sua consecução. Daí que a diversidade das categorias de modelização existentes não implica necessariamente que essas sejam conflituosas entre si: é possível vê-las como complementares, com cada ênfase respondendo a um particular aspecto dos modelos.

Por fim, reiteramos um ponto já explicitado anteriormente nessa tese: nosso emprego do referencial bungeano é feito considerando-o como um modelo de modelos, não como um espelho do que são os modelos. Isso significa que tal referencial não responde a todas as questões que podem ser discutidas sobre o tema modelos, já que estes desempenham outras funções além das que são objeto desse estudo. A justificativa que buscamos apresentar nessa seção concentrou-se na problemática descrita na Introdução dessa tese, e mesmo para esta o referencial não provê uma explicação completa, final e irretocável. Um modelo de modelos também é parcial e aproximativo, assim como acontece com os modelos de coisas reais.

CAPÍTULO 3. A CONCEITUALIZAÇÃO NO CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO: APORTES PARA O ESTUDO DA ELABORAÇÃO INDIVIDUAL DE MODELOS

Neste capítulo, procuramos apresentar e discutir elementos da pesquisa em desenvolvimento cognitivo que entendemos oferecerem potenciais subsídios para a compreensão sobre como se dá o processo de modelização dos sujeitos. As principais questões de fundo que perpassam essa discussão são: Como ocorre a apropriação conceitual da realidade por parte dos sujeitos? Esse processo envolve alguma forma de abstração? A ação dos sujeitos envolve alguma forma de modelo teórico da realidade? Os modelos desenvolvidos pelos sujeitos integram-se em alguma estrutura conceitual mais geral, ou permanecem desconectados entre si?

Para Matthews (2007), o que impeliu a pesquisa sobre modelos e modelização na área de ensino de ciências foram justamente os trabalhos de psicólogos e cientistas da cognição que reconheceram na construção mental de modelos sobre o mundo um papel central para a apropriação de conhecimento. Dentre os primeiros pesquisadores desse campo que enfatizaram a centralidade dos modelos, Matthews (2007) aponta a contribuição de Johnson-Laird, para quem...

> É agora plausível supor que modelos mentais tem um papel central e unificador em representar objetos, estados de sistemas, sequências de eventos, o modo como o mundo é, e as ações sociais e psicológicas da vida diária. Eles possibilitam a indivíduos fazer inferências e previsões, compreender fenômenos, decidir qual ação tomar e controlar sua execução, e sobretudo experimentar eventos por representações; eles permitem usar a linguagem para criar representações comparáveis àquelas derivada do contato direto com o mundo; e eles relacionam palavras ao mundo por meio da concepção e percepção (JOHNSON-LAIRD, 1983, p. 397, tradução nossa).

Adotando um conceito de modelo como uma representação análoga do mundo, Johnson-Laird considera-os como entidades teóricas que emergem da tentativa de dar sentido a inferências implícitas ou explícitas. A visão de modelos desse autor tem

fundamentado numerosos trabalhos sobre modelos mentais no contexto do ensino, principalmente a partir dos anos 1990 (VOSNIADOU; BREWER, 1992; MOREIRA, 1996; BORGES, 1998, 1999; BUCKLEY; BOULTER, 2000; COLL; TREAGUST, 2003). Inspirados nesse referencial, Greca e Moreira (2000) sintetizam sua relevância afirmando que compreender um fenômeno físico significa precisamente dispor de um modelo mental capaz de representá-lo.

O trabalho de Nersessian (1992; 1995) também constitui uma mirada aos modelos do ponto de vista cognitivo, em particular da cognição científica. Por essa especificidade, as contribuições da autora integram reflexões de natureza histórica, filosófica e epistemológica, como demonstra seu método *histórico-cognitivo* (NERSESSIAN, 1995). Essa autora argumenta que o raciocínio baseado em modelos (*model-based reasoning*) pode gerar mudança conceitual na ciência. A hipótese que ela propõe para explicar essa tese é a de que...

> ... analogias, modelos visuais e experimentos de pensamento são prevalentes em períodos de mudança conceitual radical porque tal raciocínio baseado em modelos é um meio altamente eficaz de evidenciar e abstrair restrições em sistemas representacionais existentes e, à luz das restrições fornecidas pelo problema alvo, um meio eficaz de integrar restrições de múltiplas representações de tal forma que resultem novas estruturas representacionais (NERSESSIAN, 2002, p. 145, tradução nossa).

Esse processo envolveria diversas formas de abstração que, em conjunto, permitiram a geração, modificação, substituição e integração das restrições. Essas restrições poderiam ser fornecidas por diversos meios: verbais, matemáticos, imagísticos, pictóricos, físicos, cinestésicos, entre outros. Para essa autora, tanto a formação de conceitos quanto a mudança conceitual envolvem mudanças nas restrições (NERSESSIAN, 2002).

Ao abordarem o tema modelos da perspectiva da psicologia cognitiva e do desenvolvimento, Franco et al (1997) apresentam e discutem as contribuições de três referenciais da área - a teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird, a perspectiva de Nersessian (1992) e a teoria piagetiana - e traçam uma análise comparativa, visando articular as potencialidades das três perspectivas em direção a um modelo dos modelos mentais (FRANCO et al, 1997).

Os autores ressaltam a oposição entre a abordagem piagetiana, que caracteriza a formação das imagens mentais na criança como subordinada à sua competência lógico-matemática, e a abordagem de Johnson-Laird, que não aceita essa subordinação, mas coloca as imagens mentais como "correlatos perceptivos" dos modelos (JOHNSON-LAIRD, 1990). Alinhando-se com essa última perspectiva no tocante a esse ponto, Franco et al (1997) observam, contudo, uma lacuna na proposta de Johson-Laird, que é a de não ter desenvolvido satisfatoriamente uma teorização do processo de formação dos modelos mentais.

Um passo nessa direção seria dado por Nersessian, ao voltar-se para sua análise histórico-cognitiva na busca por compreender como se daria a construção dos modelos científicos em termos de mecanismos e operações de pensamento. Com base nessa metodologia, a autora já indicava que a modelização envolvia técnicas de abstração, nomeadamente o raciocínio analógico, imagístico, experimentos de pensamento e análise de caso-limite (NERSESSIAN, 1992), operações que são por ela examinadas tanto de um ponto de vista cognitivo quanto histórico. Nersessian (1995) diz que a modelização construtiva não é completamente formalizável como procedimento, mas as técnicas que dela fazem parte podem ser explicitadas, aplicadas e avaliadas. Dessa forma, Nersessian contribuía para preencher a lacuna da teoria dos modelos mentais apontada pos Franco et al (1997). A autora também indica como as chamadas *técnicas de abstração* relacionam-se com a aprendizagem em Física (NERSESSIAN, 1992b).

O olhar de Nersessian (1992; 1995; 2002) conduz-nos a pensar a produção, aplicação, adaptação e modificação de modelos sobre a realidade que nos cerca como uma atividade comum, *mutatis mutandis*, entre o trabalho do cientista e o desenvolvimento cognitivo dos sujeitos. Na busca por contribuições ao campo da didática das ciências naturais, parece-nos importante localizar confluências entre as discussões epistemológicas e as contribuições da psicologia do desenvolvimento ao problema da modelização.

Ao formular as questões postas no início desse capítulo, pressupomos que existe, quer na evolução do pensamento científico quer no desenvolvimento cognitivo, uma passagem de estados de menor conhecimento para estados de maior conhecimento.

Como ocorre essa passagem é justamente a questão central que motiva a epistemologia genética[9] (CASTORINA; CARRETERO, 2014). Uma das questões que divide as diversas teorias do desenvolvimento refere-se ao alcance dos processos que são postulados para explicar essa passagem: seriam eles de domínio geral ou de domínio específico? Trata-se de outro aspecto que distancia as abordagens de Piaget, orientado na primeira opção, e de Nersessian (1992), mais inclinada para a segunda.

Do ponto de vista do desenvolvimento, um *domínio* é o conjunto de representações que sustenta uma área específica de conhecimento, tal como a Linguagem, a Matemática ou a Física. Dentro de cada domínio é possível distinguir *microdomínios,* subconjuntos de um certo domínio. Pode-se assim pensar na gravitação como um microdomínio da Física, ou na geometria como um microdomínio na Matemática. No modelo piagetiano de desenvolvimento, grandes mudanças acontecem de forma aproximadamente simultânea em diferentes domínios: mudanças de estágios de desenvolvimento implicariam em alterações nas estruturas lógicas de pensamento dos sujeitos, e estas se aplicariam tanto ao pensamento físico quanto ao matemático, biológico, moral, e assim por diante. Assim é que o modelo piagetiano concebe os mecanismos de mudança entre os estágios como sendo de domínio geral. Tal abordagem confere aos processos cognitivos na visão piagetiana uma independência em relação ao conteúdo e ao contexto, ponto este criticado por Franco et al (1997).

Outros autores, no entanto, defendem a *especificidade de domínio* dos processos cognitivos. Nessa visão, as mudanças cognitivas ocorrem dentro de um domínio, não necessariamente ao mesmo tempo que em outros domínios. Enquanto determinado tipo de transição ocorre, por exemplo, no que diz respeito à aquisição da linguagem, a mesma transição poderá ocorrer no domínio da física apenas em momentos posteriores do desenvolvimento. É fácil notar que, justamente pela sua utilização de uma análise histórico-cognitiva cuidadosa, com atenção aos problemas específicos enfrentados pelos cientistas e à natureza dos próprios conteúdos de conhecimentos científicos, a

9 Essa perspectiva central da obra piagetiana consiste em uma epistemologia que "*... é naturalista sem ser positivista, que coloca em evidência a atividade do sujeito sem ser idealista, que se apóia igualmente no objeto ao mesmo tempo que o considera um limite (portanto, existindo independentemente de nós mas sem ser completamente alcançado) e que, sobretudo, vê no conhecimento uma construção contínua...*" (PIAGET, 2012, p. 6).

contribuição de Nersessian orienta-se num sentido mais voltado à especificidade dos processos cognitivos, respondendo assim à segunda questão problemática da teoria piagetiana posta por Franco et al (1997).

A especificidade de domínio é, por vezes, associada a perspectivas inatistas. Nessa linha, é muito influente o trabalho de Jerry Fodor, "*A Modularidade da mente"* (1983). Para esse autor, a mente seria formada por "módulos" ou sistemas de entrada inatos, que funcionam de forma independente e seriam encapsulados, isto é, teriam seu funcionamento indisponível ao restante do aparelho cognitivo. Entre outros nomes, as psicólogas Elizabeth Spelke e Susan Carey também produziram importantes contribuições à pesquisa em desenvolvimento na linha da especificidade de domínio, dentro de uma perspectiva inatista. No entanto, admitir a existência de processos específicos de domínio não implica uma adesão completa ao inatismo, ou mesmo a convicção de que nada há de domínio geral no desenvolvimento.

Por exemplo, argumentando contra a concepção de desenvolvimento de Fodor, Annette Karmiloff-Smith (1992) rejeita a tese inatista de módulos pré-especificados com os quais a mente já estaria equipada desde o início. No lugar disso, Karmiloff-Smith propõe que o desenvolvimento envolve uma progressiva modularização da mente, que ocorreria de forma gradual. Essa autora defende que o desenvolvimento deve ser compreendido como uma relação intricada entre processos de domínio geral (mais do que é aceito pelos inatistas) e outros de domínio específico (mais do que é aceito pelos piagetianos)

Duas características principais da proposta de Karmiloff-Smith são de interesse para o nosso estudo. Em primeiro lugar, o papel relevante que a autora atribui à desconsideração das propriedades dos objetos reais para a elaboração das representações, o que pode ser considerado uma forma de abstração. A outra característica importante é a sua consideração da *flexibilidade cognitiva*, isto é, da crescente disponibilização dos conhecimentos que o sujeito produz em situação a outras partes do seu aparelho cognitivo. Esse processo poderia ajudar a compreender de que modo os conhecimentos produzidos em determinada situação são transpostos para

outras situações e, no caso dos modelos, como eles poderiam passar a ser reconhecidos como integrando uma estrutura conceitual mais ampla.

Outro autor que enfatiza a questão da especificidade dos conhecimentos é Gérard Vergnaud. Assim como Karmiloff-Smith, Vergnaud foi também estudante de Piaget. Também compartilha com ela uma visão das crianças como produtores de teorias-em-ação. Porém, em uma linha diferente da autora, Vergnaud focaliza a evolução dos esquemas ao longo do tempo em termos de suas componentes, com maior atenção às características dos próprios conhecimentos que são conceitualizados. É essa ênfase que nos conduz a buscar suportes teóricos na obra de Vergnaud, aliada à sua preocupação específica (e que o difere de todos os demais autores citados) com a conceitualização dos conhecimentos escolares.

Uma revisão do intenso debate entre defensores das posições inatistas e construtivistas está fora do escopo dessa tese. Não seria factível mesmo apresentar exaustivamente todas as teorias neopiagetianas de desenvolvimento que foram propostas nas últimas décadas. Em lugar disso, nas páginas que se seguem, apresentamos as propostas dos dois autores supracitados e as discutimos a partir de nossa lente conceitual baseada em modelos. Paralelamente, apontamos outros traços dessas propostas que possam ser de interesse geral ao campo da educação científica.

3.1. A proposta da Redescrição Representacional

Buscando compreender inter-relações entre sequências de ações e teorias implícitas em processos de desenvolvimento cognitivo, Karmiloff-Smith e Inhelder (1975) propuseram a crianças entre 4 a 9 anos a tarefa de equilibrar blocos com diferentes distribuições de massa sobre uma barra estreita. Alguns blocos eram simétricos e homogêneos, outros eram visivelmente assimétricos (tinham um pequeno peso colado em uma de suas extremidades) e um terceiro grupo consistia em blocos aparentemente simétricos, visualmente idênticos aos primeiros, mas que tinham sido

preenchidos com um pouco de chumbo em uma de suas extremidades. As autoras observam que as crianças nessa faixa etária não apenas constroem, mas também generalizam teorias para a condição de equilíbrio, e que o fazem sem procurar espontaneamente por contra-exemplos, inclusive frequentemente ignorando-os quando são encontrados. Apenas gradualmente é que passam a reconhecer os contra-exemplos que se apresentam. Dentre os aspectos apontados pelas autoras nesse estudo, destacamos dois que se relacionam diretamente com os modelos: a produção de teorias e a sobregeneralização.

Construir - e, principalmente, generalizar - teorias-em-ação mostra-se, na análise daquelas autoras, como uma tendência que se apresenta subjacente à atividade dos sujeitos naquela situação, que pareciam buscar produzir explicações simples, gerais e unificadas, isto é, que fossem potencialmente aplicáveis a todos os elementos de seu domínio. Em certo momento durante o desenvolvimento, a teoria-em-ação segundo a qual o ponto de equilíbrio coincide com o centro geométrico do bloco mostra-se profundamente imbuída nos esquemas de ação dos sujeitos. Karmiloff-Smith e Inhelder (1975) relatam então que, após tentativas bem-sucedidas de equilibrar o bloco sobre seu centro geométrico, ao experimentar o insucesso dessa teoria com outros blocos, os sujeitos tendem a apegar-se à teoria inicial tanto quanto possível, muitas vezes tentando equilibrar o bloco sobre seu centro geométrico de forma mais cuidadosa ou, eventualmente, recusando a tarefa por considerar que aqueles blocos são impossíveis de equilibrar.

Assim como a construção de teorias falsas, a sobregeneralização não significa um impedimento ao desenvolvimento mas, pelo contrário, representa um processo criativo. As autores destacam que

> Sobregeneralização, um termo às vezes depreciativo, pode ser visto como uma *simplificação criativa* de um problema ao ignorar alguns dos fatores complicadores [...] Sobregeneralização não é apenas um meio de simplificar, mas também de unificar; não é, portanto, surpreendente que as crianças e os cientistas frequentemente recusem contra-exemplos, já que eles complicam o processo unificador (KARMILOFF-SMITH; INHELDER, 1975, p. 209, tradução nossa, grifo dos autores).

Por exemplo, no problema do equilíbrio dos blocos, o *peso* é uma variável inicialmente desconsiderada pelos sujeitos, que focam sua atenção no *comprimento* dos blocos. E, de fato, para muitos dos blocos - assim como para situações de equilíbrio de outros objetos na vida cotidiana - a consideração do tamanho pode bastar para obter sucesso com a tentativa de equilíbrio. Aí se encontra a relevância da sobregeneralização no processo de desenvolvimento, pois a surpresa experimentada pelo sujeito frente ao bloco que não se equilibra apoiado pelo centro geométrico parece ocorrer apenas quando aquela previsão deriva de uma teorização já consolidada. Nesse sentido, a sobregeneralização parece desempenhar uma função criativa para o questionamento das teorias-em-ação do sujeito e eventual desenvolvimento de novas teorias-em-ação. Esse processo é implícito no caso das crianças, mas poderia ser intencional no caso dos cientistas (KARMILOFF-SMITH; INHELDER, 1975). Esse exemplo também permite ilustrar a maneira pela qual a abstração toma parte na produção de teorias-em-ação dos sujeitos: ao desconsiderar uma das variáveis do problema que se torna possível a sobregeneralização necessária à formação e à unificação da teoria-em-ação mobilizada nessa situação.

Em um trabalho posterior, Karmiloff-Smith propõe uma concepção para o desenvolvimento cognitivo fundamentada na hipótese de que a construção do conhecimento se dá pela possibilidade de a mente explorar, internamente, as informações com que está equipada (quer seja pela via inata, quer adquirida na interação com o ambiente externo), ao redescrever suas representações, isto é, ao reelaborar sucessivas representações internas, em diferentes formatos (ou *níveis).* Através desse processo, a informação implícita *na* mente transformaria-se progressivamente em conhecimento explícito *para a* mente. Tal processo é chamado pela autora de Redescrição Representational (RR) (KARMILOFF-SMITH, 1992).

A existência de um *processo* de RR, por si mesma, significa apenas que as representações internas passariam por uma recodificação, em diferentes formatos, ao longo do desenvolvimento. Adicionalmente, Karmiloff-Smith (1992) propõe também um *modelo* para os formatos ou níveis, além de analisar a dinâmica de transição entre eles. Neste modelo, a autora propõe a existência de pelo menos quatro níveis, cada um

deles representando um formato no qual o conhecimento é representado e re-representado: Implícito (I), Explícito 1 (E1), Explícito 2 (E2) e Explícito (E3).

No nível I, as representações estariam codificadas em um formato procedimental, que possibilita ao sujeito usá-las para analisar e responder a estímulos externos. Essas representações são fragmentadas em relação ao universo de conhecimento do sujeito: não formam ligações com o restante do domínio ao qual pertencem. Com isso, permanecem indisponíveis para outros operadores no sistema cognitivo do sujeito.

A redescrição dessas representações procedimentais, que culminaria no formato representacional E1, é descrita pela autora como um processo de *abstração* "em linguagem de alto nível" (KARMILOFF-SMITH, 1992, p. 21). Seriam descrições reduzidas, que abandonam vários detalhes das informações perceptuais. Assim, por exemplo, uma placa de trânsito mostra uma imagem icônica para avisar que há zebras na estrada. Claramente, o estímulo de entrada recebido pelo sistema perceptivo do sujeito frente a uma zebra real é bastante diferente daquela imagem; ainda assim, o sistema cognitivo permite relacioná-la a uma zebra real. A partir do nível E1, as representações são conceituais. Em comparação às representações do nível I, estas são mais simples e cognitivamente flexíveis. Pelo fato de serem conceituais, decorre que não sejam mais tão fragmentadas; estão acessíveis ao restante do sistema cognitivo para serem manipuladas e relacionadas com outras representações. Daí decorre que é a partir do nível E1 que se inicia o processo de construção de teorias-em-ação. No entanto, isso não significa que estejam acessíveis à consciência, e ainda menos que sejam passíveis de verbalização.

É a RR seguinte que torna essas representações acessíveis à consciência, constituindo assim o formato correspondente ao nível E2. Mas o modelo proposto por Karmiloff-Smith pressupõe que consciência não possa ser reduzida à verbalização. É esse aspecto que diferencia os níveis E2 e E3: embora as representações em ambos os níveis sejam conscientes, é apenas no último que elas se tornam disponíveis ao relato verbal. É assim que, por vezes, desenhamos diagramas de coisas que não conseguimos verbalizar; ou, em certos momentos do desenvolvimento, o sujeito experimenta uma

sensação do tipo "eu sei, mas não sei explicar". No caso da conceitualização no domínio da Física, notamos que não é infrequente que um estudante seja capaz de resolver corretamente um problema, mas encontre grandes dificuldades ao produzir uma explicação, oral ou escrita, sobre como o fez.

Já as representações no formato do nível E3 são próximas o suficiente da linguagem natural para que possam ser traduzidas de forma comunicável. Há dois aspectos desse formato que devem ser destacados. Em primeiro lugar, Karmiloff-Smith (1992) mantém aberta a possibilidade de que certos conhecimentos, obtidos pela interação entre os sujeitos através da via linguística, sejam diretamente codificados nesse formato, sem terem antes passado pelos níveis anteriores. Por outro lado, a autora aponta também a possibilidade de que alguns conhecimentos obtidos dessa forma não consigam se ligar ao restante das representações, armazenadas no aparelho cogntivo em outros formatos. Essa última observação também nos parece interpretável no contexto da conceitualização em Física, já que a simples enunciação verbal de leis ou princípios claramente não conduz, necessariamente, ao sucesso do sujeito na interpretação de uma situação ou na resolução de um problema.

Mas como acontecem as transições de um nível para outro? Karmiloff-Smith (1992) defende que esse processo envolve três fases recorrentes. Na primeira fase, o foco do sujeito é nas informações do ambiente externo e sua ação é orientada pelos dados. A partir desses dados, ele cria "adjunções representacionais", isto é, representações armazenadas independemente, que podem ser acrescentadas ao rol disponível ao sujeito, mas não estão ligadas a outras representações anteriores e já estáveis. O ponto culminante da fase 1 é o sucesso consistente do sujeito em desempenhar com êxito uma tarefa, seja equilibrar blocos, amarrar os cadarços, produzir uma forma linguística corretamente, ou qualquer outra do microdomínio considerado. É o que Karmiloff-Smith (1992) refere-se como *behavioral mastery*, e ele é sustentado pelas adjuções representacionais.

Mas esse sucesso da conduta do sujeito na realização de uma tarefa não constitui um fechamento do desenvolvimento cognitivo naquele microdomínio. Segue-se a ele uma segunda fase, durante a qual o foco do sujeito deixa de ser nos dados externos e

passa para as mudanças nas representações internas. É durante essa fase que passaria a ocorrer uma desconsideração das propriedades do ambiente externo, tais como o ato de ignorar parte das propriedades e fatores complicadores que existem naquele ambiente. Segundo Karmiloff-Smith (1992), essa desconsideração pode - mas não necessariamente irá - reduzir o sucesso do sujeito na realização da tarefa.

Eventualmente, um equilíbrio é alcançado entre os controles externo e interno. Esse ponto é colocado pela autora como uma terceira fase do desenvolvimento. Nela, as representações internas são conciliadas com os dados recebidos do ambiente externo. O resultado pode conduzir a uma conduta semelhante à observada durante a fase 1, isto é, ao sucesso na realização da atividade proposta.

Um aspecto interessante dessa dinâmica é o papel atribuído ao conflito cognitivo. O modelo de RR proposto por Karmiloff-Smith (1992) reconhece um papel importante exercido pelo feedback negativo (lacunas e contradições) dentro de uma fase, pois através desse feedback o sujeito produziria as adjunções representacionais que culminariam com a *behavioral mastery*. Contudo, na passagem de uma fase para outra, é o feedback positivo que tem um papel crucial: apenas as representações que tenham atingido um estado estável é que sofrem uma redescrição representacional. Esse é outro ponto de afastamento entre a proposta de Karmiloff-Smith e a visão piagetiana, para a qual um sistema em equilíbrio não iria progredir espontaneamente.

A RR poderia ser entendida assim como "*... um processo de 'apropriação' de estados estáveis para extrair as informações que eles contém, que podem então ser usadas de forma mais flexível para outros propósitos*" (KARMILOFF-SMITH, 1992, p. 25, tradução nossa). Esse processo reiterativo, ao invés da simples interação com o ambiente externo, é que seria responsável pelo aumento da flexibilidade cognitiva e pela eventual emergência das representações ao nível consciente.

Desde a proposição do processo e do modelo de RR, outros grupos de pesquisa em desenvolvimento têm replicado o experimento do equilíbrio dos blocos utilizado por Karmiloff-Smith (1992). Karen Pine e David Messer desenvolveram sistematicamente diversas variações e extensões do desenho original pelo menos desde 1998 (PINE; MESSER, 1998, 1999, 2003; MESSER; PINE; BUTLER, 2008). Em um desses

estudos, um grupo de 25 crianças era apresentado a um conjunto de tarefas de equilíbrio de blocos sobre um fulcro a cada dia, por cinco dias consecutivos. Os níveis das representações, originalmente em número de quatro (Karmiloff-Smith, 1992), foram transformados em sete: implícito; transição do implícito, abstração não-verbal; abstração verbal; transição do explícito; explícito E3 e explícito E4. Esses níveis correspondem a uma descrição mais gradual e extensa, mas no mesmo direcionamento da proposta de Karmiloff-Smith. Os dois níves de abstração (verbal e não-verbal) corresponderiam ao nível E1, e evidência sugerindo a existência deste foi encontrada no estudo. Para o nível E2, que consistiria na habilidade de equilibrar tanto blocos simétricos quanto assimétricos de forma consciente e sem verbalização, não foi encontrada nenhuma evidência. Por fim, o nível E3, que nesse estudo foi dividido em E3 e E4, também foi corroborado por meio dos dados. Os autores endossam a existência de um processo de re-elaboração das representações dos sujeitos iniciando-se em um nível implícito e progredindo para novos formatos, passando por alguma forma de abstração.

Em um trabalho posterior, Messer, Pine e Butler (2008) aplicaram um teste no qual duas tarefas eram propostas aos participantes: uma delas consistia em equilibrar pesos a diferentes distâncias sobre uma tábua horizontal equilibrada por um fulcro, como uma espécie de balança (SIEGLER, 1976) e a outra consistia numa versão do experimento de equilíbrio proposto por Karmiloff-Smith (1992), acrescido da tarefa de prever se determinadas configurações do sistema (em termos da distribuição dos blocos em torno do fulcro) iriam resultar em equilíbrio ou desequilíbrio. O objetivo desses pesquisadores era o de avaliar se o contexto específico da tarefa proposta ao sujeito interfere na sua performance. Assim, embora ambas as tarefas envolvam o equilíbrio de corpos, elas não são idênticas. Participaram deste experimento 86 crianças com idades entre 5 e 7 anos. Os níveis das representações das criaças foram assim classificadas: crianças que obtiveram sucesso em equilibrar pelo menos dois blocos simétricos e dois assimétricos, apresentaram explicações implícitas e não usaram as palavras peso e distância em mais de um problema foram categorizadas no nível Implícito (nível I); aquelas que equilibraram pelo menos dois blocos simétricos e no máximo um

assimétrico, no nível Abstração; (semelhante ao nível E1) e aquelas que equilibraram pelo menos dois blocos simétricos e dois assimétricos, além de usar as palavras "peso" e "distância" para explicar ao menos dois problemas, foram classificadas no nível Explícito (semelhante ao nível E2/3). Os pesquisadores destacam que os participantes não utilizaram-se dos mesmos processos cognitivos nas diferentes tarefas: as próprias características da tarefa parecem ter influenciado consideravelmente a performance das crianças (MESSER; PINE; BUTLER, 2008).

Os resultados desse último estudo também levaram os autores a questionar a caracterização do nível (I) conforme proposto por Karmiloff-Smith, pois, ao solicitar às crianças uma previsão do comportamento dos blocos, elas foram capazes de produzir explicações explícitas e de utilizar-se de regras nessas explicações. Esses resultados, entre outros, foram interpretados pelos pesquisadores como um indicativo de que o desenvolvimento não consiste em um processo linear, mas que existiria um conjunto multidimensional de processos cognitivos, cujo uso pelo sujeito é variável conforme as particularidades da tarefa proposta. Com base nessas considerações, Messer e seus colaboradores destacam a dificuldade em classificar crianças em termos de estágios ou níveis gerais, mesmo quando essa análise é restrita a um único domínio, e concluem sugerindo que uma compreensão melhor sobre o desenvolvimento poderia ser alcançada identificando-se dimensões do processamento de informação relevantes a um dado domínio (como por exemplo a codificação) e os contextos nos quais essas dimensões operam (MESSER; PINE; BUTLER, 2008).

Em sua tese de doutorado, Butler (2007) apresenta uma série de estudos em torno da perspectiva da RR de Karmiloff-Smith que, além de apontar parte das indicações publicadas em Messer, Pine e Butler (2008), corrobora algumas das observações de Karmiloff-Smith acerca dos mecanismos de mudança. Um dos pontos destacados é a existência de uma estabilidade no nível representacional das crianças participantes que antecede (embora não seja, necessariamente, imediatamente anterior) a mudança representacional. Conforme já foi discutido, esse é um dos aspectos de afastamento entre a proposta da RR com relação à visão piagetiana do desenvolvimento, que enfatizava a necessidade da instabilidade das representações como motor da

mudança. O estudo também apresenta alguns avanços sobre a proposta original, em especial denotando um papel-chave da verbalização no processo de mudança cognitiva.

3.1.1 Possíveis contribuições da RR à compreensão do processo de Conceitualização na Educação Científica

Antes de considerar a possibilidade de derivar contribuições da proposta da RR para o contexto da educação científica, faz-se necessário considerar alguns aspectos da proposta em si. Primeiramente, deve-se notar que o processo de ensino-aprendizagem escolar não é diretamente um objeto da RR. A área de formação e de atuação profissional de Karmiloff-Smith é o campo da psicologia, em especial na linha dos distúrbios do desenvolvimento, com grande número de publicações sobre a Síndrome de Williams. *Beyond Modularity*, a obra na qual apresenta a proposta da RR, concentra-se na questão sobre "*... o que a perspectiva do desenvolvimento pode oferecer à ciência cognitiva*" (KARMILOFF-SMITH, 1992, p. xiii, tradução nossa). Não se trata, portanto, de uma obra voltada primariamente à didática. Por outro lado, a RR é também uma hipótese sobre como a mente humana explora e organiza o conhecimento de tal modo a possibilitar um auto-enriquecimento. É nesse sentido que nos parece muito pertinente à tentativa de compreender a conceitualização, inclusive com relação aos conhecimentos científicos, já que a construção destes envolve, entre outros fatores, uma atividade complexa do aparelho cognitivo.

Um dos pontos de interesse comum entre a proposta da RR e a investigação sobre a conceitualização no contexto educacional refere-se à existência de conhecimentos implícitos, suas funções ao longo da apropriação conceitual e o seu processo de explicitação. Sabe-se, por exemplo, que as chamadas concepções alternativas possuem um caráter eminentemente implícito (NARDI; GATTI, 2008) e que também podem ser bastante efetivas nas situações cotidianas. Pensar que a força é algo que se extingue espontaneamente, ou que o mais pesado cai mais depressa, ou

ainda que materiais isolantes são capazes de nos aquecer, pode conduzir ao sucesso no enfrentamento de pequenas tarefas como abrigar-se do frio ou jogar uma bola para alguém em um jogo. Essas representações tem, assim, o potencial de produzir *behavioral mastery*. De fato, o próprio exemplo da teoria de equilibração dos corpos pelo centro geométrico, estudada por Karmiloff-Smith (1992), consiste em um bom exemplo também de concepção alternativa. Na pesquisa em ensino de ciências, surgiram nas décadas de 1980 e 1990 muitos estudos visando a superação das concepções alternativas com base na explicitação destas, seguida de um momento de "conflito cognitivo", que introduziria um feedback negativo às representações e assim, acreditava-se, abriria caminho para a "mudança conceitual" (POSNER et al, 1982). No entanto, após o desenvolvimento de um extenso programa de pesquisa na área, essa estratégia não pareceu funcionar, ou, no mínimo, não tão bem quanto esperado. Uma série de motivos, de diferentes ordens, pode ser apontada como possíveis explicações para a ineficácia dessa proposta (LIMÓN, 2001). Mesmo quando ocorre uma aparente mudança conceitual, não há garantias de que isso signifique ter havido uma troca de concepções, extirpando a antiga e colocando uma nova em seu lugar: é possível que esteja ocorrendo apenas uma seleção de concepções de acordo com o contexto (MORTIMER, 1996; DRUIT, TREAGUST, 2003).

Embora também pressupondo uma explicitação progressiva, o modelo de RR de Karmiloff-Smith (1992) não vai ao encontro das propostas de mudança conceitual. Na visão clássica da mudança conceitual, uma representação que possa ser problematizada deve ser explícita ou, no mínimo, consciente: assim, Posner et al (1982) falam de uma conscientização (*awareness*) do estudante em relação às suas assunções fundamentais que precederia a mudança conceitual. Em contraste, Karmiloff-Smith (1992) defende a ocorrência de uma redescrição que incide diretamente sobre representações no nível implícito, o que já implica em um processo de transformação dessas representações de um formato para outro. Mais do que isso, ela postula a existência de um nível que não é implícito, nem totalmente explícito, nem disponível ao acesso consciente, e que corresponde ao formato E1. Uma implicação dessa hipótese é que o *status* das representações do sujeito não poderia ser acessado apenas com base na interação

linguística. E a diferenciação entre as representações I e E1 seria relevante, pois apenas no último caso elas estariam disponíveis para o restante do conteúdo do aparelho cognitivo. Além disso, Karmiloff-Smith aponta que a acumulação de anomalias não leva necessariamente à elaboração de uma nova representação, ao passo que a emergência de uma nova representação também não requer, necessariamente, o recebimento de novos dados do ambiente externo (KARMILOFF-SMITH, 1992).

Especificamente no contexto do ensino de ciências, tomando-se o aspecto *reiterativo* do processo de RR e a observação de Messer, Pine e Butler (2008) dos diferentes processos cognitivos e diferentes representações desenvolvidas pelas crianças de forma variável de acordo com a tarefa proposta, também é possível vislumbrar um panorama um pouco mais amplo para a questão da convivência de diferentes representações. Após o abandono da expectativa de produzir-se uma mudança conceitual súbita pela via do conflito cognitivo, algumas pesquisas da área passaram a considerar que as concepções espontâneas ou alternativas continuam coexistindo com as concepções científicas, introduzidas pela educação escolar (e.g., Shtulman e Valcarcel, 2012). Notamos que essas pesquisas tendem a considerar como pólos opostos as representações espontâneas e as científicas, sendo a questão de fundo descobrir como trazer o estudante para mais próximo das últimas.

Esse direcionamento parece trazer implicitamente a noção de que as representações científicas são unívocas, isto é, cada conceito físico teria um único significado, ao qual cabe ao estudante apropriar-se, se não substituindo sua concepção alternativa, pelo menos acrescentado a científica ao seu rol e utilizando-a quando o contexto assim o exige. Mas esse não parece ser o caso dos conceitos científicos. Assim como as diferentes situações suscitam nas crianças a produção de diferentes representações, parece-nos que os conceitos científicos também podem se revestir de significados diversos. Isso ocorre não apenas ao longo da história de um conceito (ver, por exemplo, os conceitos de força em Coelho, 2010), mas também dentro de um mesmo período histórico (por exemplo, os significados do conceito de massa na física contemporânea em Jammer, 2000). Isso significa dizer que não são apenas as representações espontâneas - geralmente vistas como o alvo da mudança conceitual -

que são múltiplas, mas também as científicas - tidas em geral como o produto desejável dessa mudança. Tal multiplicidade é um dos aspectos que inspira, por exemplo, a proposta do perfil conceitual (MORTIMER, 1996).

Por outro lado, a discussão sobre o implícito e o explícito tem um interesse para a pesquisa em ensino que se estende para muito além da mudança conceitual. Dificilmente se poderia negar que o conhecimento individual dos sujeitos tem uma parcela considerável de conteúdo implícito, tanto nos conteúdos relacionados aos objetos da ciência (POZO; CRESPO, 2005) quanto naqueles relacionados à natureza da ciência (CLOUGH, 2006). Augé (2014) destaca imbricações entre as representações implícitas e outros aspectos da cognição, em especial as restrições cognitivas e a especificidade de domínio. À luz da proposta da RR, nem o implícito, nem o explícito, por si mesmos, poderiam ser colocados como objetivos finais do processo de conceitualização. Não apenas porque trata-se de um processo reiterativo de reelaboração das representações, mas também porque, no contexto do ensino-aprendizagem, é desejável tanto a capacidade de comunicação dos conhecimentos (representada pelo nível E3), como também a sua acessibilidade ao corpo de conhecimentos do sujeito como um todo e à sua capacidade de operar com essa representação em situações (tarefas) que a envolvam, o que não é necessariamente garantido pelo formato representacional E3.

Tal acessibilidade está ligada à propriedade de uma representação de apresentar algum grau de flexibilidade cognitiva. Notamos que essa flexibilidade é importante para o contexto do ensino-aprendizagem de ciências, pois

> ... o modelo RR postula que representações através de diferentes códigos só podem ser ligadas se as representações estiverem todas definidas explicitamente, pelo menos, em um formato E1. Portanto, para o conhecimento de física ser relacionado com o conhecimento matemático, o último deve também sofrer redescrição representacional (KARMILOFF-SMITH, 1992, p. 89, tradução nossa).

Essa observação pode auxiliar, pelo menos em parte, a interpretar a dificuldade encontrada pelos estudantes em apropriarem-se da Matemática como uma *estruturante* do conhecimento físico (PIETROCOLA, 2002). Isso ocorreria porque não se trata de

uma mera aplicação de conhecimentos matemáticos a um contexto "aplicado" na Física, como foi notado pelo autor citado, mas sim da necessidade de redescrever um conjunto de representações, atribuindo-lhes novos significados. Pode assim ocorrer que, estando em um nível implícito, tais representações até contribuam para algum sucesso dos sujeitos no enfrentamento de situações dentro do domínio da Matemática (*behavioral mastery*). Contudo, o obstáculo que se interpõe aos estudantes na busca por uma apropriação do caráter *estruturante* desses conhecimentos matemáticos no contexto da física (KARAM; PIETROCOLA, 2009) parece ser, de um ponto de vista cognitivo, a necessidade de tornar esses conhecimentos disponíveis a outros domínios, isto é, torná-los mais cognitivamente flexíveis. Dado que esse processo implica em uma redescrição representacional, não deveria causar qualquer surpresa o fato de que ele não ocorre automaticamente, mas frequentemente impor dificuldades consideráveis aos estudantes.

No âmbito das questões relacionadas à modelização, a proposta da RR estabelece algumas relações interessantes. Consideremos, inicialmente, a função atribuída à abstração nesse processo. No caso da passagem das representações do nível implícito para o nível explícito E1, Karmiloff-Smith (1992) propõe que essa redescrição é, ela própria, uma abstração (p. 21). Embora não haja na obra uma definição exata do que a autora compreende por "abstração", aparentemente o significado é bastante próximo daquele que viemos discutindo no capítulo anterior. Algumas das expressões empregadas para descrever o nível mais abstrato são "descrições reduzidas, que perdem vários detalhes da informação codificada procedimentalmente" (1992, p. 21); "mais simples" (1992, p. 21); é também uma representação que "perdeu muitos detalhes perceptuais" (1992, p. 21, traduções nossas). Certamente, no contexto da apropriação individual do conhecimento esse processo não é intencional, pelo menos não no caso de crianças pequenas. Não está totalmente claro, na proposta de Karmiloff-Smith, se a produção de abstrações é uma tendência para a qual o desenvolvimento conceitual se dirige, ou se é um sub-produto deste. Ainda assim, fica claro que ela toma parte no processo de redescrição de uma representação implícita para um formato mais flexível.

Outro ponto convergente com as discussões sobre abstração do capítulo precedente é a observação de que esse processo resulta em representações que são

produtivas, no sentido de já não serem mais encapsuladas, mas sim manipuláveis e disponíveis para o conjunto das demais representações E1, ou seja, transportáveis para outros contextos. Assim, enquanto no caso da produção de conhecimento científico a abstração se faz necessária para elaborar contrapartes conceituais dos objetos reais, de modo que esses conceitos possam ser articulados com modelos e teorias da ciência, no caso da conceitualização ela parece exercer um papel semelhante, ao possibilitar a emergência de representações passíveis de serem ligadas ao restante do universo de representações do sujeito, tanto intra quanto inter-domínio. Sobre o segundo caso, Karmiloff-Smith postula ainda que a RR pode ocorrer espontaneamente, sem que nenhuma análise de novos dados esteja ocorrendo, e até mesmo sem nenhum tipo de pressão externa (KARMILOFF-SMITH, 1992).

Ainda outra questão que pode ser analisada sob a ótica da RR é a flexibilidade cognitiva das representações dos sujeitos comparando-se diferentes modelos teóricos relacionados a uma mesma teoria geral. Por exemplo, seriam os princípios que sustentam determinada teoria geral reconhecidos como pertinentes pelos sujeitos, em situações relacionadas com diferentes modelos teóricos? Ou estariam esses princípios codificados em formatos encapsulados, sendo mobilizados apenas para um pequeno conjunto de modelos? Essa indagação é relevante pois incide justamente sobre o caráter de um princípio de funcionar como um *guia heurístico* (CUSTÓDIO; PIETROCOLA, 2004), permitindo a mobilização dos saberes para outros contextos. Além disso, os princípios ou teorias gerais também são responsáveis por favorecer uma unificação dos conhecimentos, formando um sistema de pensamento coerente.

O mesmo tipo de questionamento poderia ser feito relativamente ao status de determinados objetos-modelo. A noção de centro de massa, por exemplo, seria mobilizada pelos sujeitos para explicar o equilíbrio de corpos inomogêneos tanto quanto nas explicações relacionadas ao movimento de projetéis? Ou receberia ela diferentes sentidos de acordo com as situações propostas? Em que medida os estudantes conseguem flexibilizar os objetos-modelo estudados para novas situações? A priori, não parece haver razões para esperar que as respostas sejam as mesmas para os diferentes microdomínios das ciências empíricas. Isto é, mesmo admitindo-se a existência de um

processo geral de RR, os modelos específicos de organização dos níveis podem ser distintos em cada microdomínio. Ainda assim, se a flexibilidade cognitiva for considerada desejável como parte da educação científica, parece-nos que as questões levantadas aqui podem contribuir para pensar-se em estratégias didáticas que a favoreçam.

3.2. A TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS

Proposta pelo psicólogo e didata francês Gérard Vergnaud, a Teoria dos Campos Conceituais (TCC) é uma teoria cognitivista, de matriz neopiagetiana, mas também com reconhecidas contribuições de Vygotsky (VERGNAUD, 2007a). Tendo por objeto o processo de conceitualização do real, a TCC provê um referencial teórico que permite localizar e analisar continuidades e rupturas na formação de um conceito, do ponto de vista de seu conteúdo (VERGNAUD, 1990). Nesse sentido, possivelmente o avanço mais importante da proposta de Vergnaud em relação a outros teóricos seja a consideração das especifidades dos conhecimentos científicos como essenciais para compreender o processo de conceitualização desenvolvido pelos sujeitos. Ademais, trata-se de uma proposição que busca considerar a conceitualização do real como sendo

> ... específica de conteúdo e não pode ser reduzida nem às operações lógicas gerais, nem às operações puramente lingüísticas, nem à reprodução social, nem à emergência de estruturas inatas, nem, enfim, ao modelo do processamento da informação (MOREIRA, 2002, p. 8).

O pressuposto do autor é que o conhecimento organiza-se em campos conceituais, a serem progressivamente dominados pelos sujeitos ao longo do tempo. A noção de campo conceitual desenvolvida por Vergnaud é, de certa forma, análoga ao conceito de domínio, embora não seja idêntica. À dimensão das representações, Vergnaud acrescenta a dimensão das *situações*. Um *campo conceitual* é formado por um *conjunto de situações entrelaçado com um conjunto de conceitos* (VERGNAUD, 2009). A ideia central da teoria é a de que o sentido de um conceito só pode ser formado a partir de uma multiplicidade de situações, ao passo que cada situação requer, também, mais de um conceito para ser analisada. Embora os exemplares apresentados pelo autor sejam concentrados nos campos conceituais das estruturas aditivas e multiplicativas, a TCC não se restringe à conceitualização na Matemática. No caso da Física, o próprio Vergnaud interessou-se pelo campo conceitual da Mecânica (WEIL-BARAIS; VERGNAUD, 1990) e da Eletricidade (VERGNAUD, 1993).

De um ponto de vista epistemológico, Vergnaud (2002) rejeita a noção pela qual a essência da Ciência estaria no método. Para esse autor, o progresso da Ciência é, principalmente, o progresso da conceitualização: conceitos mais amplos, mais interligados e que possuem propriedades mais definidas vão substituindo, seja por etapas, seja por evoluções bruscas, aqueles conceitos mais primitivos e que possuem validade mais restrita. O conhecimento científico estaria assim fortemente relacionado com a produção de sistemas gerais envolvendo diversos conceitos e teoremas. Tais sistemas é que dariam à Ciência o seu caráter explicativo. Mas a produção desse tipo de sistemas exige uma criatividade por parte dos cientistas: é através dela que eles chegam a representar objetos e relações que não correspondem diretamente a nenhuma percepção, tais como a força, o átomo ou o gene (VERGNAUD, 2002).

Uma questão de fundo que perpassa toda a TCC é a relação entre as duas formas do conhecimento: operatória e predicativa. A forma predicativa do conhecimento refere-se à enunciação dos objetos de pensamento e consiste em sentenças e textos (VERGNAUD, 1998). A forma operatória do conhecimento está ligada à atividade do sujeito em situação. Ela não é constituída por textos, mas pela atividade do sujeito, seja observável ou não. Essas duas formas não são opostas entre si, pelo contrário: elas são interligadas[10] e ambas precisam ser consideradas se se procura compreender o processo de conceitualização (VERGNAUD, 2009). Do mesmo modo, as duas formas do conhecimento tomam parte no desenvolvimento das representações. Vergnaud (2011) assinala que, tanto quanto Piaget é uma referência para a forma operatória, Vygostky o é para a forma predicativa.

Mas o que é, afinal, representação? Para Piaget, há um sentido geral e um sentido restrito de representação. O autor identifica a representação no sentido geral como o pensamento conceitual, isto é, no fato de que a inteligência é baseada em todo

10 "*As formas predicativas do conhecimento são mais analíticas do que as formas operatórias do conhecimento que utilizamos na ação, embora, paradoxalmente, são as formas operatórias a fonte das formas predicativas. Os especialistas mais experientes não são capazes de colocar em palavras os conhecimentos que utilizam na ação, mesmo aqueles que são justamente a marca da sua especialidade. Da mesma forma, as crianças não são capazes de explicitar todos os conhecimentos que contribuem para a organização racional de sua atividade*" (VERGNAUD, 2013, p. 144, tradução nossa).

um sistema de conceitos e esquemas e não meramente em percepções e ações. No sentido restrito, o conceito de representação estaria ligado à formação e ao uso de imagens, símbolos e signos que evocam realidades ausentes (PIAGET, 1962). Vergnaud (2007b) declara que poucos conceitos podem ter tantos significados diferentes quanto o de representação, mesmo considerando-o apenas dentro do campo de estudo da psicologia. Dentre estes, o autor aponta três dos mais frequentemente adotados e introduz um quarto significado. O primeiro sentido mencionado pelo autor é o do próprio fluxo de consciência, referindo-se ao fluxo contínuo de imagens, sons, percepções, gestos, palavras, ideias, que de forma espontânea e inevitável perpassa a consciência de qualquer indivíduo, a todo momento. Um segundo sentido estaria nos signos e símbolos, sem os quais a representação não poderia ser comunicável. Uma terceira possibilidade é compreender a representação como um sistema de conceitos que permitem ao sujeito selecionar a informação com vistas a conduzir sua ação. Por fim, o quarto sentido da representação proposto por Vergnaud é um conjunto de esquemas, ou seja, um conjunto hierarquizado de processos dinâmicos que não só organizam a ação do sujeito em situação, mas ao mesmo tempo são o produto dessa ação.

A percepção, por si mesma, já é interpretada por Vergnaud como uma forma de representação. A percepção que construímos do tamanho ou da velocidade de um carro que se aproxima, por exemplo, envolve uma tomada de decisões cognitivas que não seriam puramente institivas, mas fruto de um processo de construção. É com apoio nesse tipo de representação que reconhecemos a invariância em certos objetos materiais, apesar de suas transformações aparentes. Por outro lado, a ciência, a tecnologia, a arte e a literatura são ricas em objetos de pensamento cuja relação com os objetos percebidos no ambiente é bem mais distante: daí a complexidade dos processos de construção das representações nesses domínios.

O processo de conceitualização é modelizado na TCC principalmente através do conceito de esquema, que por sua vez é indissociável da noção de situação. Por esse motivo, a seção seguinte se ocupa do par esquema/situação, com objetivo de fornecer uma apresentação mais detalhada da teoria.

3.2.1. Esquemas e situações

O conceito de esquema[11] (*schème* no original francês) foi empregado por Piaget ao analisar a atividade do sujeito, desde o chamado período "sensório-motor", que é anterior ao desenvolvimento da linguagem e da função simbólica e que caracteriza-se por uma inteligência essencialmente prática, mas ainda assim constituída por um "... *sistema complexo de esquemas de assimilação e* […] *organizar o real de acordo com um conjunto de estruturas espácio-temporais e causais*" (PIAGET; INHELDER, 2011, p. 12). O autor define o conceito de esquema como "*... o que, em uma ação, é assim transponível, generalizável ou diferenciável de uma situação à seguinte, dito de outro modo, aquilo que há de comum a diversas repetições ou aplicações da mesma ação*" (PIAGET, 1973, p. 23, tradução nossa). A função dos esquemas, para Piaget, é principalmente possibilitar que as formas de organização da atividade do sujeito sejam generalizadas para objetos novos. Essas organizações são indissociáveis do processo de adaptação ao real: "*é se adaptando às coisas que o pensamento organiza a si próprio, e é organizando a si próprio que ele estrutura as coisas*" (PIAGET, 1952, p. 8).

Tanto na ação quanto na conceitualização, trata-se de tomar decisões com base em informações incompletas. Essa "resistência indefinida do real" (VERGNAUD, 2002) impõe, ao sujeito, a necessidade de agir sem saber tudo. Isso significa que o reconhecimento de um novo conhecimento-em-ação (seja ele uma relação, um princípio, um objeto de pensamento) requer escolher aquilo que é pertinente e o que não é para tomar uma decisão cognitiva. A tomada de uma decisão cognitiva, assim como a própria conceitualização são, portanto, um tipo de ação, embora certamente não seja uma ação automática (VERGNAUD, 2002). É essa complementaridade entre ação que conceitualização que o conceito de esquema pretende captar.

Vergnaud atribui ao conceito de esquema uma interpretação mais detalhada do que aquela dada por Piaget, com uma ênfase mais forte na noção de *situação*. Para esse autor, o esquema pode ser descrito como a organização sequencial da ação do sujeito, a

11 Para uma análise detalhada do desenvolvimento do conceito de *schème* em Piaget, ver Carvalho Jr. e Parrat-Dayan (2015).

qual é invariante para uma certa classe de situações. É através do esquema que os recursos cognitivos podem se adaptar a situações de complexidade progressiva. Assim, a função dos esquemas na aprendizagem é dupla: por um lado, contém aqueles modos de proceder que foram formados nas situações já dominadas pelo sujeito; por outro, é necessário que ofereçam conceitos abertos, adaptáveis, assegurando que existam possibilidades de inferência quando o sujeito enfrenta situações novas.

A primeira função mencionada no parágrafo precedente está ligada ao caráter *sistemático* dos esquemas, isto é, à existência de um conjunto de regras às quais a atividade do sujeito está submetida, em um dado conjunto de situações. Contudo, é preciso destacar que um esquema não é um estereótipo e não pode ser interpretado como uma simples automatização dos modos de fazer, pois a ação do sujeito não é desencadeada diretamente pelo estímulo fornecido pela situação. Assim, ele não é um algoritmo; não há garantias de que o esquema irá gerar uma solução correta em um número finito de passos. Além disso, a ação do sujeito não é, ela própria invariante; apenas a *organização* da ação é invariante. Mas importa destacar também o caráter *contingencial* dos esquemas, pois essas regras geram ações e condutas diferentes de acordo com a situação que se apresenta ao sujeito. Esse último aspecto é de especial importância quando o sujeito confronta uma situação nova, já que nesse caso ele não possui um esquema completamente pronto. Daí se depreende o caráter adaptativo dos esquemas (VERGNAUD, 2007b; 2009). A flexibilidade dos esquemas que garante o caráter contingencial destes é devida, principalmente, à diversidade de situações a partir das quais os invariantes operatórios adquirem seu sentido.

Assim, a relevância do conceito de esquema reside no pressuposto básico de que a construção do conhecimento pode ser entendida como um processo adaptativo, no qual os esquemas adaptam-se às situações. Reciprocamente, as situções adaptam-se aos esquemas na medida em que as tarefas são percebidas de formas diferentes pelo sujeito à medida em que vão sendo por ele dominadas. A relação entre esses dois construtos – esquemas e situações – é tão próxima que, segundo Vergnaud (2009), por vezes eles são confundidos, de modo que alguns pesquisadores utilizam a expressão *esquema* para se referir a situações. Por outro lado, essa proximidade entre os dois conceitos revela a

amplitude da noção de esquema: os sujeitos utilizam esquemas cotidianamente em uma grande variedade de situações na sua realidade vivencial, tanto em tarefas simples quanto em tarefas complexas, seja o ato de falar, fixar um prego na parede, dirigir, analisar a validade de uma dada argumentação, resolver um problema, produzir uma explicação, e assim por diante.

Um exemplo de esquema apresentado por Vergnaud (1986) consiste no esquema de enumeração. Um dos primeiros conhecimentos-em-ação que as crianças jovens utilizam no início dessa conceitualização é a noção de correspondência biunívoca: a cada objeto sendo contado, corresponde um gesto com o dedo, depois com a fala, e, mais tarde, apenas com o olhar. Posterioremente no desenvolvimento, diante da tarefa de contar, por exemplo, o número de pessoas presentes em uma certa casa, dado que há X pessoas na sala e Y pessoas no jardim, a criança desenvolve também diferentes esquemas ao longo do tempo. Um deles pode ser a recontagem de todas as pessoas desde o início. Outro esquema consistiria em partir da cardinalidade de X e recontar o número de elementos em Y. Claramente, o conceito-em-ação da cardinalidade também está presente nesses esquemas. A partir do desenvolvimento das operações aditivas, outro esquema utilizado pela criança poderá ser baseado em um novo teorema-em-ação, segundo o qual a cardinalidade da união entre os conjuntos X e Y é igual à cardinalidade de X somada à cardinalidade de Y (VERGNAUD, 1986). Sem dúvida, outros conhecimentos-em-ação estão envolvidos nesses esquemas, tais como a noção de união entre conjuntos, a independência da cardinalidade em relação à posição de cada elemento, e assim por diante.

É essencial destacar que o conceito de esquema não se refere somente à conduta observável, mas igualmente às atividades de pensamento subjacentes (VERGNAUD, 2011). Isso significa dizer que a representação também é parte integrante dos esquemas, e ela "*... não é nem uma biblioteca, nem um dicionário: é uma instância eminentemente ativa*" (VERGNAUD, 2011, p. 47, tradução nossa). É aplicando e adaptando seus esquemas que os sujeitos tentam dar sentido a uma situação nova. Vergnaud (2007b) atribui ao próprio Piaget o hábito de declarar: "*os sentidos são os esquemas"* (p.10, tradução nossa). Assim como ocorre com os esquemas, os sentidos atribuídos a um

mesmo conceito podem ser diferentes conforme as distintas situações que ajudam a formá-lo. Nas páginas que se seguem, pormenorizamos a constituição dos esquemas e, em seguida, discutimos de modo mais detalhado a relação entre as situações e a construção de sentidos.

Componentes dos esquemas

Vergnaud (2007b, 2012) propõe quatro componentes básicos dos esquemas: o aspecto *intencional*, que se traduz como um ou mais objetivos, sub-objetivos e antecipações; o aspecto *gerador*, que envolve as regras do tipo "se... então..." e que dirigem a ação do sujeito-em-situação; o aspecto *epistêmico*, que se refere às invariantes operatórias (denominadas pelo autor como *conceitos-em-ação* e *teoremas-em-ação*) e o aspecto *operacional*, relativo às várias possibilidades de inferência dentro da atividade.

Os objetivos são essenciais para a organização da atividade, mesmo que muitas vezes não sejam totalmente conscientes. Eles revelam já alguma forma de decisão cognitiva, ao refletirem a escolha por um ou outro caminho, direcionarem a ação para uma ou para outra questão. Os objetivos podem derivar em sub-objetivos, organizados sequencialmente e hierarquicamente (VERGAUD, 2013). A própria seleção de determinados objetivos, e não de outros, já é por si mesma realizada tendo por base algum teorema-em-ação.

Os invariantes operatórios são aqueles elementos do esquema que tem por função reconhecer e identificar os objetos, suas propriedades, relações e transformações. São os responsáveis por possibilitar que o conhecimento do sujeito assuma sua função operatória (para além da função predicativa). Invariantes operatórios podem ser de dois tipos: conceitos-em-ação e teoremas-em-ação. Os conceitos-em-ação se constituem como categorias de pensamento tidas como relevantes pelo sujeito e são os elementos a partir dos quais é possível construir os teoremas-em-ação. Um teorema-em-ação é uma proposição sobre a realidade que envolve mais de um conceito e que é tida como verdadeira na atividade. Ao contrário do que ocorre com um conceito-em-ação, um teorema-em-ação é suscetível de verdade ou falsidade.

Para Vergnaud, os invariantes operatórios permanecem, de forma geral, implícitos no interior dos esquemas mobilizados pelos sujeitos. Portanto, não se trata de conceitos ou teoremas científicos, ou sequer compartilhados, ao menos em um primeiro momento, o que não impede que venham a evoluir para conhecimentos científicos no decorrer do desenvolvimento. É importante notar que a formação de um conceito-em-ação se dá por meio de uma multiplicidade de teoremas-em-ação distintos, evidenciando o caráter dialógico da relação entre os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação. Por esse motivo, o autor observa que, muitas vezes, a afirmativa de que um determinado sujeito compreendeu um determinado conceito é desprovida de sentido: poder-se-ia afirmar apenas que o sujeito é capaz de utilizar determinados teoremas-em-ação específicos em uma dada situação (VERGNAUD, 2007b).

As regras de ação, que envolvem a tomada e o controle das informações, podem ser entendidas como uma "tradução" dos teoremas-em-ação na prática. Considerando que as variáveis das situações podem ser diversas, o sujeito que domina o esquema deve ser capaz de adaptar a aplicação do teorema-em-ação às variáveis específicas daquela situação em particular, e o elemento que se "adapta" nesse processo são as regras de ação. Ao dizer que essa componente é a que gera a ação do sujeito, Vergnaud (2007b) não se refere apenas à conduta observável, mas também à atividade não diretamente observável, inclusive a construção das inferências.

Um esquema não é um estereótipo e não pode ser interpretado como uma simples automatização dos modos de fazer, pois a ação do sujeito não é desencadeada diretamente pelo estímulo fornecido pela situação. É por esse motivo que a questão das várias possibilidades de inferências é incluída entre os componentes dos esquemas (VERGNAUD, 2013). A construção de inferências – que ocorre em todas as situações – é regulada pelas adaptações do esquema à situação. As inferências, por sua vez, "*... são relações entre as proposições e se encadeiam através de metateoremas (ou teoremas de ordem superior) como os silogismos aristotélicos ou a transitividade das relações de ordem: a>b e b>c => a>c"* (VERGNAUD, 2007b, p. 8, tradução nossa). Nesse sentido, as inferências também permitem gerar novas proposições que passarão a ser consideradas verdadeiras na atividade. Para Figueroa e Otero (2011), as próprias regras

de ação são também geradas por inferências, embora as primeiras possuam um caráter pragmático, enquanto as últimas podem ser separadas das ações e expressas na forma predicativa.

Situações e suas classes

Para Vergnaud, o conhecimento se forma a partir de problemas a resolver ou, o que significa a mesma coisa, de situações a dominar: isso "*... pode ser visto na história das ciências e das técnicas, igualmente no desenvolvimento dos instrumentos cognitivos da criança jovem, notavelmente na apropriação do espaço e na compreensão e categorização de objetos comuns*" (VERGNAUD, 1986, p. 21, tradução nossa). Assim também deveria ser, continua Vergnaud, no ensino. Porém, não é isso que ocorre: os procedimentos e algoritmos de resolução parecem ter centralidade, e não as situações. Um problema, ou um situação, no sentido dado por Vergnaud, refere-se amplamente a toda situação na qual é preciso descobrir relações, explorar hipóteses e verificá-las para produzir resoluções. De forma simples, situações são tarefas a resolver.

Com base nas considerações feitas até este ponto, é possível elucidar melhor a afirmação central da TCC, que declara que o sentido de um conceito requer uma diversidade de situações ao mesmo tempo em que cada situação põe em jogo uma multiplicidade de conceitos. Tomemos como exemplo um caso amplamente investigado e analisado por Vergnaud: o campo conceitual das estruturas aditivas (1986, 1988, 2007). Quais são os sentidos de adição construídos pela criança durante o desenvolvimento nesse campo conceitual?

Um desses sentidos é dado pela composição de medidas. O exemplo apresentado anteriormente sobre a *contagem do número total* de pessoas presentes, sendo conhecida uma parte e outra parte, envolve exatamente este sentido. Outro significado da adição é a de uma *transformação entre estados*, na forma F = T(I), em que T é uma transformação e F e I são os estados final e inicial. É o caso de situações que solicitam, por exemplo, a altura de uma árvore dadas a altura inicial e o crescimento; a quantidade de bolinhas de gude que pertencem a André, conhecendo a quantidade inicial e o

número delas que ele ganhou em uma partida; e assim por diante. Um terceiro sentido da adição é o de *comparação entre medidas*: se João tem cinco bolinhas e Pedro tem oito, quantas Pedro tem a mais do que João? Observe-se que neste último caso a operação efetuada consiste em uma subtração, na forma em que foi apresentada. O mesmo pode ocorrer com os exemplos anteriores, quando se invertem a variável solicitada com alguma das variáveis dadas ou ainda quando as variações são negativas. Cada uma dessas possibilidades dá origem a uma classe de situações: percebe-se, assim, que mesmo para o campo conceitual das estruturas aditivas, existem numerosas classes de situações (VERGNAUD, 1986). Daí que a *variedade* é uma característica importante das situações que formam um campo conceitual.

Muito mais do que uma mera classificação, essa forma de categorizar as situações pertinentes a um campo conceitual permite evidenciar, no contexto do ensino, a importância de compreender a diferença entre um significante e seus possíveis significados. A relação entre significante e significado não é biunívoca (VERGNAUD, 1996). Basta pensar em quantos significados diferentes podem estar representados por símbolos aparentemente tão simples como (+) e (-) ! O que poderíamos considerar, nesse contexto, sobre conceitos científicos de alto nível de abstração, como os conceitos de energia, potencial e entropia?

Além disso, os exemplos de classes de situações analisados por Vergnaud no campo conceitual das estruturas aditivas e subtrativas também ajuda a evidenciar o acoplamento esquema-situação. Cada classe de situações pode mobilizar, no sujeito, diferentes esquemas e, com isso, diferentes conhecimentos-em-ação. Isso implica que as representações elaboradas pelos sujeitos não sejam, necessariamente, homogêneas para as diferentes situações, tampouco que suas mudanças sejam transportadas automaticamente para todas as situações do campo conceitual considerado. À luz dessa perspectiva teórica, já não causa qualquer surpresa a observação de Messer, Pine e Butler sobre a diferença nas performances das crianças quando apresentadas a duas tarefas diferentes pertencentes ao mesmo microdomínio (MESSER; PINE; BUTLER, 2008). Dado que as contingências apresentadas por cada tarefa/situação são diferentes,

seria razoável esperar que os esquemas desenvolvidos pelos sujeitos igualmente sejam diferentes.

Esse acoplamento, aliado à multiplicidade de sentidos discutida mais acima, é o que conduz Vergnaud a rejeitar a redução de um conceito à sua definição e a propor um "conceito de conceito" como um tripleto de três conjuntos: {S}, {I} e {φ}, sendo:

> S: o conjunto de situações que dão sentido ao conceito;
> I: o conjunto de invariantes operatórios que constituem as diferentes propriedades do conceito;
> φ: o conjunto das representações simbólicas que podem ser utilizadas.
> (VERGNAUD, 2002, p. 31, tradução nossa)

Deve-se notar que φ, o conjunto das representações simbólicas, contempla as formas de representação linguística, gráfica, algébrica, e assim por diante. Esse conjunto evoca também a a distinção entre significante e significado. A representação simbólica, para Vergnaud (2009), não só é indispensável para a comunicação intersubjetiva das representações, mas, além disso, desempenha um papel importante nas operações de pensamento. Embora os símbolos não sejam, por si mesmos, conceitos, eles são necessários na conceitualização, assim como "... *notação musical também não é música, mas as sinfonias não seriam possíveis sem ela*" (VERGNAUD, 2009, p. 92).

A importância que Vergnaud atribui às situações, colocando-as como os elementos que - de forma acoplada com os esquemas - formam os campos conceituais, constitui um passo para além do referencial piagetiano, o qual não continha tal preocupação. Parece-nos existir três fatores que contribuíram a esse direcionamento. Em primeiro lugar, a atuação didática e a formação em matemática que conduzem Vergnaud a um olhar sobre as especificidades dos conteúdos dos conceitos e como estas interferiam no processo de conceitualização. Outro aspecto, mencionado pelo próprio, é o trabalho de Guy Brousseau, que dá ao conceito de situação um sentido que não era pensado na psicologia (VERGNAUD, 1990).

Mas uma terceira questão que também parece-nos ter contribuído é a preocupação de Vergnaud com a dimensão das interações sociais como motores do desenvolvimento. O autor destaca que a escolha das situações a serem propostas no ensino é o primeiro ato de mediação do professor (VERGNAUD, 2004a). Para ele,

conhecimento é adaptação, mas o que se adapta são os esquemas; e se os esquemas adaptam-se às situações, geralmente isso acontece com ajuda de outras pessoas. No caso do ensino de ciências, em que essa ajuda é principalmente aquela do professor, como deverá este guiar a escolha das situações?

É aí que Vergnaud (2004a) apóia-se na noção vigostkiana de *z*ona de desenvolvimento proximal, pois é dentro dela que o professor pode esperar ajudar o estudante: "*um campo conceitual é então um modo de captar, com uma certa amplitude, a zona de desenvolvimento proximal dentro da qual o educador pode situar sua ação*" (VERGNAUD, 2004a, p. 5, tradução nossa). Ainda ao discutir o papel mediador do professor, Vegnaud sublinha que a linguagem em situação tem uma função comunicativa que permite a ele gerir a progressão da atividade, mas também atua na própria conceitualização. Embora a linguagem não esteja presente todo o tempo durante esse processo, os enunciados linguísticos podem modificar profundamente o status dos conceitos (VERGNAUD, 2004a).

3.2.2 Alguns usos da Teoria dos Campos Conceituais na literatura do ensino de ciências

Até os anos 1990, a TCC inspirou inicialmente trabalhos de pesquisa em educação matemática, seu contexto de origem. É principalmente a partir dos anos 2000 que a área de ensino de ciências começa a se apropriar desse referencial e a utilizá-lo para embasar suas pesquisas. Nas páginas que se seguem, descrevemos algumas destas últimas, a fim de explicitar os usos que vem sendo feitos dessa teoria, as abordagens propostas por diferentes autores e os sentidos que tem sido atribuídos aos campos conceituais nos estudos sobre ensino de ciências naturais, além de suas contribuições para os problemas da área.

Sousa e Fávero (2002) estudam procedimentos de Resolução de Problemas situações de interação verbal entre um especialista e um novato. A investigação

envolveu dois alunos de um curso pré-vestibular entrevistados individualmente em cinco sessões cada, cujas temáticas foram conceitos de Eletricidade. Os dados obtidos a partir dessas entrevistas foram analisados à luz da TCC, localizando-se principalmente os invariantes operatórios mobilizados pelos participantes. Os autores concluem, entre outros pontos, que a TCC mostrou-se apropriada para embasar estudos sobre aprendizagem de conteúdos complexos tais como os da Física.

Llancaqueo, Caballero e Moreira (2003) apóiam-se nessa teoria para estudar a conceitualização do conceito de campo em estudantes de primeiro ano de bacharelado e licenciatura em química. Os 55 estudantes participantes responderam a um conjunto de dez problemas abertos, de lápis e papel. A análise dessas resoluções conduziu os autores a categorizar as respostas em cinco níveis de conceitualização e indicar uma ausência de invariantes operatórios para o enfrentamento dos problemas postos. Também assinalam uma tendência dos participantes a utilizar representações geométricas mais do que analíticas, além de discutir algumas relações entre representações simbólicas, seus significados e os invariantes operatórios empregados e enfatizar, ao final, a relevância das situações na regulação do processo de conceitualização.

Bagheri-Crosson, Venturini e Lefèvre (2004) investigam os invariantes operatórios mobilizados por dois estudantes de ensino superior frente a situções do campo conceitual do eletromagnetismo, com atenção para a indução eletromagnética. A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas semi-estruturadas. Esses estudantes foram escolhidos entre dez sujeitos entrevistados no total porque um deles demonstrava maior dificuldade e outro dominava melhor os conceitos envolvidos, entre os participantes. Os autores concluem que ambos mostram condutas muito semelhantes quando comparadas para a mesma situação, mas diferem no uso dos invariantes operatórios e no reconhecimento dos objetivos pertinentes a cada situação.

Conhecimentos-em-ação sobre a cinética do corpo rígido mobilizados por oito estudantes em uma situação de resolução de problema de lápis e papel são investigados por Costa e Moreira (2005) à luz da TCC e da teoria dos modelos mentais de Johson-Laird. Os dados coletados foram as próprias resoluções dos estudantes, acompanhadas por entrevistas semi-estruturadas. Os autores sintetizam suas observações sobre os

resultados indicando que a percepção visual teria um papel central na construção de conhecimentos por parte dos alunos (COSTA; MOREIRA, 2005).

Matheus, Sousa e Moreira (2005) articulam aportes teóricos dos referencias de Johnson-Laird sobre modelos mentais e da TCC de Vergnaud para averiguar se os estudantes criam um modelo de trabalho para agir perante uma situação experimental e como se caracterizaria tal modelo. Para isso, propõem-se a explorar possíveis invariantes operatórios que evidenciem-no. A primeira parte dessa pesquisa consistiu em um levantamento de resoluções escritas por alunos de graduação a questões que acompanhavam relatórios de laboratório e avaliações. Esse material foi analisado qualitativamente em busca dos invariantes operatórios trazidos pelos participantes. Em um segundo momento da pesquisa, foi proposta uma situação problemática experimental e a conceitualização dos estudantes foi acompanhada por meio de questões a serem respondidas durante o processo de experimentação no laboratório. Os autores categorizaram as respostas que emergiram desse material e encontraram que apenas 26% destas sugeriam a presença de modelos mentais que indicassem algum grau de domínio da respectiva situação proposta. Porém, mesmo nesses casos, os autores não puderam determinar se tratava-se de fato de modelos mentais ou de modelos que foram negociados, já que as atividades experimentais foram realizadas em pequenos grupos. Ainda assim, os autores concluem que as atividades experimentais de laboratório não se mostraram como situações capaz de conferir sentido aos conceitos, mas favoreceram apenas uma aprendizagem mecânica baseada no uso de fórmulas e de regras (MATHEUS; SOUSA; MOREIRA, 2005).

Em sua tese de doutorado, Rezende Junior (2006) examina a tradição do ensino de Física para defender que ocorre nela uma fragmentação, pois centra-se apenas nos invariantes operatórios e nas representações simbólicas e deixam de lado as situações. O autor aponta, entre essas questões, que tal fragmentação para o fracasso do ensino de ciências, especialmente nos níves fundamental e médio e na formação de professores. Entre outras pontos, Rezende Junior (2006) também faz uma apreciação crítica do papel da modelização no resgate das situações. Referindo-se aos livros didáticos das áreas científicas voltados ao ensino médio, destaca que

> ... na sua maioria, trazem situações modelizadas prontas, sem qualquer tocante ao processo de modelização para se chegar àquele modelo. Sendo assim, não fica claro quando se trata de um modelo ou da realidade em si, o que nos leva a conclusão de que, aparentemente, a escola cria uma realidade própria (REZENDE JUNIOR, 2006, p. 111).

Carvalho Jr. e Aguiar Jr. (2008) utilizam a TCC como referencial teórico de análise de uma sequência de ensino proposta pelos autores em torno de conceitos de Física Térmica. Para isso, explicitam uma série de conceitos-em-ação e teoremas-em-ação pertinentes a essa temática e que seriam compatíveis com o conteúdo escolar do Ensino Médio. Ao longo dessa pesquisa os autores aplicaram um pré-teste, dois testes e uma entrevista final e os dados assim coletados subsidiaram uma análise da evolução dos modelos explicativos dos estudantes ao longo da atividade. Os autores concluem defendendo a potencialidade da TCC tanto como referencial de análise quanto ferramenta de planejamento didático (CARVALHO JR.; AGUIAR JR., 2008). Essa dupla funcionalidade da TCC também é empregada no trabalho de Grings, Caballero e Moreira (2008). Contudo, ao utilizar a TCC para o planejamento didático, os autores centram-se na questão da escolha das situações a serem propostas aos estudantes. Com escopo mais restrito, esse trabalho investigou a apropriação do conceito de temperatura. Tendo como objetivo pedagógico a promoção de uma mudança conceitual, os autores analisam, na fala dos estudantes, o uso de um esquema do qual o estudante já dispunha ou a construção de um novo esquema durante a ação (GRINGS; CABALLERO; MOREIRA, 2008).

Escudero, Moreira e Caballero (2009) analisam respostas a problemas de dinâmica rotacional escritas por estudantes universitários buscando localizar elementos dos esquemas que os estudantes desenvolvem nesse tipo de situações. Dados complementares foram tomados com entrevistas informais e observações de campo. Foram analisadas resoluções escritas de 41 estudantes de primeiro ano de Engenharia e 16 estudantes de primeiro ano de Geologia. A situação proposta foi o movimento de queda de dois corpos ao longo de um plano inclinado, partindo do repouso, sendo um cilindro e uma esfera oca, ambos de mesma massa e mesmo raio. Questionava-se qual chegaria primeiro à base do plano e por quê. Foram categorizados quatro diferentes

grupos de conceitos-em-ação e teoremas-em-ação, a partir das quais os autores comentam algumas implicações para o ensino.

Na pesquisa em ensino de química, Bueno Filho, Fernandez e Marzoratti (2009) exploram esquemas de alunos de graduação em Farmácia, Bioquímica, Engenharia e Química relativos a tópicos de estereoquímica. Os participantes, em total de 37, deveriam explicar questões sobre a reflexão especular de uma figura planar. Essas explicações foram gravadas em vídeo e analisadas tanto nas expressões verbais quanto nos gestos feitos pelos participantes para apoiar a explicação. Os autores mostram, entre outros pontos, como essas manifestações gestuais contribuem para compreender os conceitos-em-ação que entram em jogo na conduta cognitiva dos participantes.

De uma perspectiva da Didática das Ciências, Otero (2010) desenvolve uma análise comparativa do conceito de situação em quatro referenciais teóricos de origem francesa: a TCC, a Teoria das Situações Didáticas (Guy Brousseau), a Dialética Instrumento-Objeto (Régine Douady) e a Teoria Antropológica do Didático (Yves Chevallard). Com relação a esse conceito na TCC, Otero (2010) sublinha a ênfase de Vergnaud no aluno e no saber e as características de variedade - que já destacamos - e história - que se refere ao domínio progressivo de um campo conceitual ao longo do desenvolvimento individual - das situações que formam um campo conceitual dado. Adicionalmente, a autora pontua o interesse de Vergnaud pelo referencial de Vygostky e o acoplamento esquema-situação. Em termos comparativos, Otero (2010) conclui que a noção de situação de Vergnaud é mais geral e é compatível com as demais noções encontradas nos outros três referenciais analisados.

Em um olhar metacientífico, Brandão, Araújo e Veit (2011) congregam os dois referenciais principais em que fundamentamos essa tese - G. Vergnaud e M. Bunge - e discutem temas da TCC e dos modelos para defender a tese de que "*o processo de modelagem científica pode ser visto como um campo conceitual subjacente ao domínio de campos conceituais específicos da Física*" (BRANDÃO; ARAÚJO; VEIT, 2011, p. 535). Em outras palavras, os autores afirmam que o processo de construção de modelos conforme entendido por Bunge pode ser considerado como um campo conceitual no sentido de Vergnaud. Isto significa considerar a existência de invariantes operatórios em

um nível metacientífico. Os autores propõem um quadro desses invariantes, cada um associado à uma categoria da modelização - tais como abstração, idealização, aproximação, variável, parâmetro, e assim por diante. No entanto, ao indicar quais seriam esses invariantes operatórios, os autores os expressam na forma de procedimentos, tais como: formular questões sobre uma situação física; decidir quais são os traços-chave de um sistema; identificar um fenômeno como sendo o caso-limite de outro; decidir quais simplificações matemáticas assumir; entre outros.

O trabalho de Scheffler (2011) é mais uma incursão da TCC na pesquisa em ensino de química. O autor elabora inicialmente um mapa conceitual voltado ao ensino da Radioatividade para orientar a distribuição dos conceitos em uma sequência de ensino para um curso técnico em Radiologia. Essa sequência foi aplicada e a evolução conceitual dos estudantes participantes foi monitorada por meio de questionários. Ao final, o autor tece alguns comentários relativos aos invariantes operatórios manifestados pelos participantes, mas destaca a fecundidade da TCC principalmente para o planejamento da atividade didática.

Viveiros (2013), sob orientação de Eder Pires de Camargo e co-orientação de G. Vergnaud, investiga a utilização de uma interface cérebro-computador como tecnologia assistiva para o processo de conceitualização de pessoas com deficiência visual e física em aulas de Física, com o emprego de estratégias multissensoriais. Entre outros aspectos, as conclusões indicaram que uso dessa ferramenta contribuiu para a construção dos invariantes operatórios dos estudantes e mostrou-se útil para o acompanhamento das funções neurocognitivas, via eletroencefalograma. O autor assinala que

> Uma análise dos dados didáticos (esquemas e invariantes operatórios), conjuntamente com os dados e variáveis cognição emocional, atenção e memória, sugere que a aprendizagem da Física mobiliza modalidades bem específicas de "constructos cognitivos", bem como mecanismos singulares de incorporação cognitiva. Isto traz como resultado final a indicação da existência de constructos cognitivos próprios para o ensino-aprendizagem da Física (VIVEIROS, 2013, p. 3).

Mozzer (2013), sob orientação de Rosária Justi e co-orientação de G. Vergnaud, investiga o entendimento conceitual do processo de dissolução vivenciado por um grupo de seis alunos participantes em atividades de modelagem. A autora emprega entrevistas e estudos de caso, tendo realizado uma análise micro-desenvolvimental e processual dos dados coletados. Além de caracterizar os esquemas de representação desenvolvidos pelos sujeitos, Mozzer (2013) destaca a fecundidade da conjugação entre o referencial da modelagem no ensino e a TCC na busca por compreender aspectos da construção do conhecimento por parte dos estudantes.

Sob orientação de Rezende Junior, Lameu (2014) elabora, aplica e analisa uma sequência didática voltada ao último ano do ensino médio relativa ao tema do efeito fotoelétrico. A elaboração e análise é inspirada na TCC, sendo a última também embasada na metodologia da Análise do Conteúdo. Além de avaliar a viabilidade de sua proposta, o autor indica também alguns dos invariantes operatórios encontrados sobre essa temática com seus alunos participantes.

Otero, Arlego e Prodanoff (2015) propõem, implementam e analisam os resultados de uma sequência de ensino sobre relatividade restrita no ensino médio. A análise é feita sob a ótica da TCC, buscando identificar os teoremas-em-ação utilizados pelos 43 estudantes participantes. Os dados coletados nessa pesquisa foram resoluções de problemas por escrito feitas pelos estudantes, gravações em áudio das aulas, além das observações do professor e de outros membros da equipe. Da análise dessa material, os autores destacam a existência de concepções pré-galileanas que não foram superadas pelos estudantes, o que motivou uma reelaboração da sequência, a fim de incluir a relatividade de Galileu como um passo inicial.

Sem pretender esgotar a literatura inspirada na TCC, podemos notar uma tendência clara nessas pesquisas a orientarem-se numa perspectiva de natureza qualitativa, com uma predominância de entrevistas e registros de produções escritas dos participantes como instrumentos de coleta de dados. Também é possível perceber que a maioria dos trabalhos tem por objetivo a identificação dos invariantes operatórios, mais do que os outros componentes dos esquemas. Essa tendência é compreensível

considerando-se que estes são os componentes epistêmicos, o que permite relacioná-los de forma mais direta ao saber de referência.

Outro ponto a notar nesse breve revisão é que a utilização desse referencial teórico não se restringe a investigações das estruturas cognitivas dos sujeitos por meio da análise de suas condutas em situação, mas frequentemente serve como balizador para o planejamento do ensino, especialmente para a elaboração de sequências didáticas. Esse uso da TCC geralmente concretiza-se na proposição de situações didáticas pensadas para favorecer a produção de sentidos aos conceitos trabalhados. Além disso, o referencial também pode fundamentar análises de materiais como os livros didáticos, como pontuado por Rezende Junior (2006). Ainda outra possibilidade seria explorar campos conceituais metacientíficos, como indicado por Brandão, Araújo e Veit (2011).

3.3 Detalhamento dos objetivos da pesquisa

Com base nas discussões teóricas apresentadas até este ponto, estamos em condições de explicitar de forma mais clara o problema de pesquisa abordado nesse estudo. Nos termos da fundamentação teórica, esse problema pode ser formulado como:

Qual o papel dos elementos do processo de modelização (abstrações; idealizações; e, principalmente: objeto-modelo; modelo teórico; teoria geral) na conceitualização de estudantes do Ensino Médio ao enfrentamento de situações no campo conceitual da dinâmica da partícula?

Na busca pelo enfrentamento dessa questão, o objetivo desse estudo será o de investigar relações entre elementos do processo de modelização e os componentes constitutivos de esquemas na conceitualização dos estudantes do Ensino Médio para o enfrentamento de situações durante a conceitualização do campo conceitual da dinâmica da partícula. Este objetivo pode ser subdividido nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um referencial teórico de análise a partir de aproximações entre a Teoria dos Campos Conceituais de G. Vergnaud e a transposição da perspectiva de M. Bunge sobre a construção de modelos para a modelização no Ensino de Física;
- Desenvolver um instrumento de análise para investigar a apropriação de elementos do processo de modelização como um conhecimento-em-ação no interior dos esquemas construídos pelos estudantes no enfrentamento de situações propostas;
- Investigar a presença de elementos do processo de modelização entre os conhecimentos-em-ação que fazem parte dos esquemas mobilizados pelos estudantes do Ensino Médio no campo conceitual da dinâmica da partícula.

3.4. O papel da modelização no processo de Conceitualização: Aproximações e distanciamentos entre as visões de Bunge e Vergnaud sobre a apropriação do conhecimento

O problema de pesquisa enfrentado nesse estudo, conforme formulado na seção precedente, implica na busca por conhecimentos-em-ação no pensamento dos sujeitos os quais poderiam desempenhar o papel dos elementos do processo de modelização teorizado por M. Bunge. Portanto, antes de iniciar essa busca empiricamente, é preciso desenvolver uma articulação entre esses dois referenciais - epistemológico e cognitivo - que demonstre a viabilidade de se conceber os elementos da modelização como conhecimentos-em-ação.

A concepção de modelos desenvolvida por Bunge consiste em uma teorização voltada essencialmente para a filosofia da ciência, sem uma preocupação *a priori* com questões relacionadas a seu ensino e à conceitualização. Apesar disso, defendemos que ela permite o desenvolvimento de algumas considerações relevantes para essas áreas, uma vez que a visão que se tem de ciência influencia diretamente em seu ensino. Nos parágrafos que se seguem, pontuamos algumas destas considerações para, em seguida, analisar mais detidamente algumas aproximações entre as concepções de Bunge e Vergnaud sobre o processo de apropriação de conhecimento.

O primeiro aspecto a destacar com base na modelização bungeana é a relação de não-identidade entre os objetos da realidade e os conhecimentos produzidos sobre esses objetos. A ausência do estabelecimento correto dessa relação é muito frequente na prática escolar de Física e conduz a um enfraquecimento do significado atribuído pelos estudantes aos conhecimentos físicos, levando-os à percepção de que a Física não se relaciona com a realidade. O enfrentamento desse problema requer uma compreensão sobre os processos de abstração e idealização que permitem a construção de um objeto-modelo. Permanece em aberto o problema de como a ação didática pode favorecer a aprendizagem relativa a esses processos.

Também notamos que grande parte dos problemas e exemplares utilizados nas aulas de Física retratam situações esquemáticas específicas que devem ser resolvidas mediante a aplicação de uma teoria geral e, nesse sentido, podem ser comparados a um processo possível (embora não o único) de criação de modelos teóricos. Um exemplo clássico é o conjunto de problemas do estudo da Mecânica que apresentam uma determinada configuração de massas e solicitam a obtenção da aceleração do sistema. O resultado esperado fornece uma expressão para a aceleração, em geral, em função das massas e da aceleração gravitacional. A resolução do problema requer não apenas a constituição de um objeto-modelo, mas também novas abstrações e idealizações a serem feitas (ausência de atrito, fios inextensíveis e sem massa, entre outros), além do reconhecimento de vínculos do sistema (tais como cordas ligando duas massas) e outras operações de pensamento, que não estão contidas na enunciação da teoria geral. Portanto não se trata de um procedimento automatizado, mas de um processo adaptativo, comparável ao desenvolvimento de um esquema.

Seguindo-se a epistemologia de Bunge, também é possível compreender a elaboração de modelos teóricos no caminho inverso, isto é, partindo-se do domínio empírico, procurar relacionar determinadas variáveis em um situação física. Nesse caso, o modelo construído será do tipo caixa-preta e fará surgir uma variável interveniente, cuja interpretação completa dependerá da interlocução com a teoria. Para o contexto do ensino de Física, a consideração do domínio empírico se traduz, via de regra, no desenvolvimento de atividades experimentais. Uma vez que seja assumido o objetivo de estabelecer uma relação coerente entre o objeto real e o objeto-modelo, a presença do domínio empírico pode ser entendida como um requisito: "*uma boa atividade modelizadora deveria necessariamente se preocupar na passagem dos dados brutos contidos numa observação, até uma representação conceitual de um fenômeno enfocado*" (PIETROCOLA, 2002, p. 106).

O referencial teórico proporcionado pela TCC pode ser empregado com uma diversidade de enfoques na pesquisa em ensino de ciências e matemática. No caso do estudo presente, o interesse principal volta-se à questão da modelização no processo de conceitualização. De acordo com a discussão desenvolvida no capítulo precedente, a

essência da modelização pode ser identificada na relação entre a realidade e o conhecimento teórico construído na busca por representar e interpretar essa realidade. Também naquele capítulo, defendeu-se uma proposta para compreender a relação entre teoria e realidade por meio do papel mediador dos modelos teóricos e dos objetos-modelo a partir de uma perspectiva epistemológica. Mas como poderia, então, essa relação ser entendida, desde a perspectiva da TCC? Para responder a essa questão, passaremos a examinar mais detalhadamente as concepções de realidade e de conceitualização na obra de Gérard Vergnaud, cotejadas com as noções bungeanas de realidade, teoria, modelo teórico e objeto-modelo.

Evidentemente, as duas teorias são construídas em âmbitos diferentes - da epistemologia, em um caso, e da psicologia cognitiva, no outro. Também é verdade que, a rigor, são elaboradas tendo em vista objetivos distintos: enquanto Bunge elabora um modelo da relação entre o conhecimento científico e o seu referente, Vergnaud modeliza o progresso do conhecimento do sujeito ao longo do tempo, com interesse na sua aprendizagem e seu ensino. Por outro lado, ambas oferecem uma interpretação para a relação entre o pensamento e o mundo. Nessa direção, parece-nos que, se buscamos compreender o papel da modelização no processo de conceitualização dos sujeitos, um caminho poderá ser a procura de pontos de aproximações e afastamentos entre as obras desses autores.

De fato, o próprio Vergnaud posiciona a conceitualização como uma questão estreitamente ligada ao problema da relação entre o real e a sua representação (VERGNAUD, 1994). Sobre esse problema, o autor destaca sua rejeição ao triângulo epistemológico clássico que representa em seus vértices o objeto, a representação e o símbolo. Para compreender a conceitualização, segundo o autor, é preciso complexificar o triângulo, admitindo uma leitura dupla do real: ao invés de ser formado apenas pelo pólo do objeto, o real precisaria ser entendido como o conjunto de objetos somado ao conjunto de situações. Portanto, ao usar o termo “realidade”, Vergnaud refere-se ao mesmo tempo a um conjunto de situações – com diferentes níveis de complexidade – e a um conjunto de objetos – com diferentes níveis de abstração. A noção de situações empregada aqui é aquela usual do autor e já discutida anteriomente, consistindo nas

tarefas e problemas que requerem enfrentamento. No conjunto de objetos, por sua vez, Vergnaud inclui no seu entendimento de realidade não apenas os objetos concretos (fisicamente reais), mas também os objetos conceituais, que Bunge denomina de construtos. Para Vergnaud, "*... objetos podem existir em níveis de abstração muito diferentes: o espaço vetorial é um objeto para o matemático*" (VERGNAUD, 1998, p. 237).

Nesse ponto, importa relembrar que Vergnaud focaliza a referência do conhecimento matemático ao desenvolver a TCC, muito embora a teoria não se restrinja exclusivamente à conceitualização em Matemática. E a Matemática, assim como a Lógica, não é uma ciência empírica, de modo que não causa grande surpresa a associação considerada por Vergnaud dos objetos conceituais na categoria da realidade. Ou, expressando nos termos utilizados por Bunge (1979, 1983), na Matemática trata-se de uma ciência formal, não factual: ela cria seus próprios objetos, ao contrário de outras ciências como a Física, a Química ou a História, cujos objetos existem fora delas próprias. Embora na Física os referentes imediatos das teorias sejam objetos conceituais, estes são criados com a intenção de representar os referentes mediatos, que são os objetos reais. Isso, porém, não ocorre no caso da Matemática: os objetos conceituais são já os referentes dessa ciência. Portanto, é bastante consistente que Vergnaud, sendo matemático e trabalhando em uma teoria do desenvolvimento que nasce no contexto da aprendizagem matemática, tenha uma compreensão de realidade que inclua objetos abstratos, diferentemente do que ocorre com Bunge.

Com base nessas considerações, e levando em conta as diferenças de âmbito e de objetivos entre as propostas teóricas de Bunge e de Vergnaud, podemos interpretar que, embora ambos investiguem a relação entre o pensamento e o mundo, cada qual o faz do modo que melhor sirva às suas contingências: no caso da TCC de Vergnaud, no lugar de procurar essa relação na dupla realidade/teoria, esta é substituída pela dupla situações/esquemas. As situações e seus objetos fazem, assim, o papel de referente para os conhecimentos que sobre eles são produzidos, analogamente ao modo pelo qual a realidade constituiria o referente mediado dos modelos, no contexto da modelizaçao

bungeana. Essa interpretação também é reforçada pela esquematização proposta por Vergnaud para representar a representação, apresentada na Figura 6.

Ao discutir o homomorfismo entre o real e a representação, Vergnaud (1994) dá destaque ao que denominou de *seleção* como uma característica extremamente geral do pensamento. Essa característica estaria relacionada com a tomada de informação sobre o real, ou seja, a seleção do que é pertinente - em geral, uma parte pequena do real (VERGNAUD, 1994). É interessante notar que o autor apresenta essa característica justo em um trabalho que discute o homomorfismo entre o real e a representação pois, como se depreende de sua conceituação, trata-se de uma categoria de pensamento que corresponderia, ao menos de forma aproximada, àquilo que chamamos de abstração. Já que desenvolve-a no contexto de uma análise sobre a conceitualização, Vergnaud (1994) acrescenta ainda que são os invariantes operatórios - conceitos-em-ação e teoremas-em-ação - que servem para guiar essa seleção e distinguir o que é pertinente do que não é.

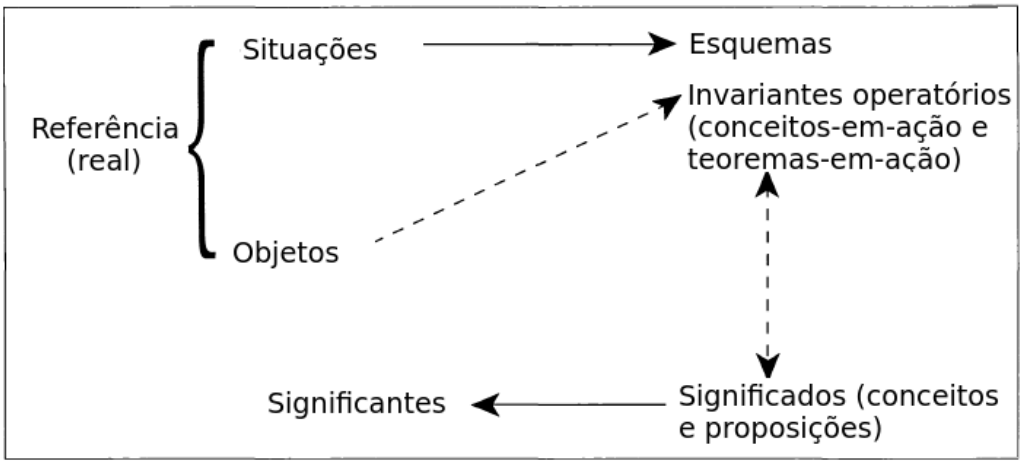


Figura 6. Uma análise alternativa da representação. Traduzido e adaptado de Vergnaud (1994), p. 34.

Assim como Bunge, Vergnaud destaca que os objetos de pensamento proporcionados pela Ciência são muitas vezes relacionados apenas de forma distante com os objetos reais conforme percebidos pelos sujeitos em seu ambiente e, portanto, são o resultado de uma construção (VERGNAUD, 2002). Ainda referindo-se ao caso

dos objetos com que lida a ciência, Vergnaud vai mais longe, ao afirmar que estes "*contradizem a leitura comumemente feita dos fenômenos*" (2002, p. 34). Mesmo sem a utilização desse termo, é possível identificar a ideia bungeana de objeto-modelo no texto citado, particulamente ao observar a declaração de que, aos cientistas, a imaginação...

> ... seria necessária para representar objetos e relações que não correspondem diretamente a nenhuma percepção: Newton não poderia perceber diretamente o conceito de força, nem Lavoisier o de oxigênio, nem Darwin o de evolução, nem Freud o de inconsciente. E Newton era muito ousado para afirmar o princípio de que se um corpo em movimento não está sujeito a nenhuma força, seu movimento é retilíneo e uniforme. (VERGNAUD, 2002, p. 33, tradução nossa).

Para o autor, um conceito, seja ele científico ou um conceito-em-ação, é sempre redutor, no sentido de negligenciar parte das características dos objetos e situações ao qual se refere. Por causa disso, toda explicação é sempre parcial. E o mesmo pode ser afirmado acerca da conceitualização, que pode ser pensada como uma espécie de explicação de nível superior. Essa redução simplificadora não é, contudo, considerada negativa: ela dá à ação e à conceitualização características de viabilidade e de economia, evitando uma busca vã pela exaustividade. Além disso, seja na ciência, seja na ação, uma representação altamente esquemática pode sempre ser refinada, se for necessário (VERGNAUD, 2002). Nessas considerações é possível notar que um papel criativo é atribuído à redução e à simplificação do real, em uma perspectiva consistente com a proposta bungeana de objeto-modelo.

Esse caráter parcial atribuído ao conhecimento - seja científico ou individual - conduz a um outro ponto de aproximação entre as propostas dos dois autores: Vergnaud parece, também, ser levado a uma posição crítica em relação ao problema da possibilidade do conhecimento. Ainda quando discute o homomorfismo entre o real e a representação, sustenta que "*... é preciso integrar uma visão do real em termos de classes de situações. Mas as situações não se deixam classificar facilmente*" (VERGNAUD, 1994, p. 34, tradução nossa). Essa interpretação é corroborada pela indicação de Vergnaud (2002) da "*resistência indefinida do real*" e do "*caráter*

incontornável da decisão em situação de incerteza" (p. 40, traduções nossas) como duas características fundamentais da atividade científica. E estas são, também, características das situações com que os sujeitos se deparam no desenvolvimento, e que impõem a necessidade da tomada de decisões cognitivas. Ao manter aberta a possibilidade de um aperfeiçoamento das representações simplificadas de acordo com as contingências da situação, Vergnaud parece admitir, como Bunge, uma forma de conhecimento por aproximação.

Apesar de não focalizar especificamente o tema dos modelos em sua obra, Vergnaud admite a existência de uma diferença entre teorias e modelos. Ele atribui aos modelos um caráter de conhecimentos mais abertos ao escrutínio e à exploração e, principalmente, mais hipotéticos, enquanto no caso das teorias tratar-se-ia de algo mais do que apenas hipóteses, pois existiria um componente mais forte de crença por parte do sujeito cognoscente. Nas palavras do autor:

> Pode-se supor que um pesquisador elabora um modelo para ver, como se diz, isto é, para explorar as possibilidades nas quais acredita moderadamente, mas um pesquisador não elabora uma teoria em que não acredita. Newton, Lavoisier, Darwin, Mendel e Freud acreditavam no que eles inventaram (VERGNAUD, 2002, p. 34).

Outro ponto importante tanto na TCC quanto na concepção epistemológica de Vergnaud é a importância atribuída à integração dos conhecimentos no sentido da formação de sistemas teóricos. Ao comparar os invariantes operatórios aos conhecimentos científicos, por exemplo, o autor destaca que os primeiros são, em geral, dotados de escopo de validade bastante local e limitado, enquanto os últimos não apenas apresentam uma abrangência mais ampla, mas organizam-se em sistemas integrados: "*a ciência é sistêmica ou não é ciência*" (VERGNAUD, 1998, p. 231). A própria ideia de campo conceitual, em sua essência, é consistente com essa visão sistêmica do conhecimento, ao fundamentar-se justamente no pressuposto de que um conceito não pode ser compreendido apenas como uma definição. Ao sustentar que um conceito não pode ser entendido com base em uma única situação, nem uma situação pode ser tratada através de apenas um conceito, a TCC pressupõe exatamente uma integração entre os

conhecimentos e aponta para a necessidade de estudar o desenvolvimento em termos de campos (VERGNAUD, 1989).

No caso do conhecimento científico, podemos dizer que uma parte importante dessa integração que culmina com a emergência de sistemas é representada pelas teorias gerais no sentido bungeano, por fornecerem um quadro teórico de análise conjugável para uma grande diversidade de situações sob seu domínio. Pode-se pensar, por exemplo, no caso da Mecânica: enquanto Galileu e seus contemporâneos desenvolvem modelos individuais para cada problema abordado, seja a queda livre, o movimento do pêndulo, o movimento de projéteis, entre outros, cada um desses modelos funciona aproximadamente como uma caixa-preta, descrevendo o comportamento de cada sistema específico separadamente. Algumas das ideias desenvolvidas nesses modelos são transpostas de uma situação para outra (por exemplo, a ideia de composição de movimento, ou a noção de inércia galileana), mas não há princípios gerais propriamente ditos que efetivamente os integrem em um sistema de pensamento orgânico. Essa integração irá se desenvolver principalmente a partir do advento da mecânica de Newton, que estabelece uma teoria geral para esse domínio do conhecimento.

Uma última consideração sobre a TCC à luz da modelização pode ser feita sob um olhar metacientífico. É possível notar que, na condição de pesquisador e sujeito do conhecimento, Vergnaud orienta seu trabalho no sentido que aponta das abordagens fenomenológicas para abordagens progressivamente mais representacionais. Para ele, a análise do processo de conceitualização deve caminhar da competência na atividade em direção aos esquemas na conceitualização, promovendo dessa forma uma "*descida para o cognitivo*" (VERGNAUD, 2012, p. 293). Essa é a ideia que busca resumir na expressão que dá título a um artigo: "*no fundo da ação, a conceitualização*" (VERGNAUD, 1996). Percebe-se que tal direcionamento da pesquisa sintoniza-se com a perspectiva da construção de caixas-pretas que vão se tornando gradualmente mais translúcidas, permitindo assim o aprofundamento do conhecimento e lançando mão de conceitos com maiores graus de abstração. No caso do processo de conceitualização como objeto de investigação, um conceito-chave dessa natureza parece ser o conceito de

representação. O trecho a seguir sintetiza a orientação do espírito do autor com relação a essa questão.

> As diferentes considerações e exemplos dados acima podem ser reunidos para teorizar sobre o conceito de representação. Behavioristas queriam se livrar desse conceito, quando eles deveriam tê-lo considerado como um conceito central da psicologia, como os conceitos de força e movimento na mecânica, ou os de evolução e célula nas ciências da vida. Eles pensaram ser impossível ter acesso à representação, mas não é essa a verdadeira situação da ciência? Newton não tinha acesso às forças atrativas, nem Darwin à sucessão de espécies, nem Mendel aos genes. Ciência é redução, e as ideias a seguir são uma redução drástica de fenômenos psicológicos. Mas, pelo menos, elas oferecem possibilidades de descrever e analisar alguns processos representacionais importantes (VERGNAUD, 2009, p. 92).

Em síntese, destacamos que os conhecimentos científicos que são objeto da análise epistemológica como a de Bunge são também, ao mesmo tempo, conhecimentos-em-ação para os cientistas. Similarmente, suas versões escolares são conhecimentos-em-ação (ou, pelo menos, podem ser) para outros sujeitos epistêmicos: os estudantes. Nessa ótica, concluímos que objetos-modelo, teorias gerais e modelos teóricos podem constituir conceitos-em-ação e teoremas-em-ação nos esquemas mobilizados por estudantes de ciências. Por um lado, a determinação de quais objetos-modelo consistirão, de fato, em conceitos-em-ação, e quais teorias gerais e modelos teóricos consistirão em teoremas-em-ação, e em quais classes de situações, são questões que requerem estudos empíricos. Por outro lado, a articulação desses dois referenciais teóricos ajudou a explicitar que a referência direta dos teoremas-em-ação são construtos - e não os objetos reais em si mesmos -, além da compreensão de que as teorias gerais, muito mais do que serem apenas equações de ampla aplicabilidade, integram e dão organicidade aos modelos teóricos, já que estes possuem em comum o mesmo Campo Conceitual, que por sua vez encerra o conjunto de situações que dão sentido aos conhecimentos.

CAPÍTULO 4. ASPECTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS DA PESQUISA

Neste capítulo, apresentamos o desenvolvimento teórico-metodológico da parte empírica dos objetivos específicos detalhados na seção 3.3. Iniciamos pela caracterização da natureza da pesquisa implementada para, em seguida, apresentar a abordagem metodológica empregada, que é a realização de entrevistas clínicas. Na sequência, descrevemos o instrumento desenvolvido, buscando deixar clara sua potencialidade em relação àqueles objetivos elencados. Por fim, apresentamos os participantes da pesquisa e explicitamos a validação da análise dos dados.

4.1 PESQUISA QUALITATIVA

O desenvolvimento metodológico da investigação proposta ocorreu de forma predominantemente qualitativa. Essa abordagem se caracteriza, entre outros aspectos, pelo contato direto do pesquisador com os procedimentos de obtenção dos dados, pela ênfase no processo mais do que no produto e pela preocupação em considerar a perspectiva dos sujeitos participantes (BOGDAN, BIKLEN, 1994; LÜDKE, ANDRÉ, 1986).

Já apresentamos, no capítulo anterior, um estudo de natureza teórica, com propósito integrador, para localizar aproximações entre a Teoria dos Campos Conceituais de G. Vergnaud e a transposição da perspectiva epistemológica de M. Bunge para a modelização no ensino de Física. Quanto aos objetivos da pesquisa que pretendem acessar a ação dos sujeitos frente às situações, realizamos um estudo empírico, envolvendo sessões individuais de discussão de situações pertencentes ao campo conceitual investigado, com estudantes voluntários na pesquisa. Nesse aspecto, a abordagem metodológica afasta-se de uma das características da pesquisa qualitativa

conforme entendida por Bogdan e Biklen (1994), para quem esse tipo de pesquisa é realizada no ambiente natural, já que as situações propostas aos sujeitos voluntários na pesquisa foram desenhadas especificamente para os objetivos desta investigação e ocorreram em local e horário também definidos especialmente para esse fim.

4.2 A ENTREVISTA CLÍNICA

A principal técnica para a coleta de dados foi a realização de entrevistas clínicas. Tal opção deveu-se ao fato de que as entrevistas possibilitam o acesso a informações de natureza complexa e de caráter individual, como é o caso dos dados necessários para o desenvolvimento dos objetivos dessa pesquisa. Além disso, por ser realizada de maneira exclusiva e com a constante presença do pesquisador, a entrevista permite que sejam feitos esclarecimentos e aprofundamentos em tempo real nas questões mais relevantes, especialmente quando são planejadas de forma mais aberta, menos estruturada.

No espectro de possibilidades de abordagem dessa técnica, identificamos em particular as entrevistas clínicas, que tem seu foco na apropriação das formas pelas quais o conhecimento se estrutura e o raciocínio se processa (CLEMENT, 2000). Segundo Posner e Gertzog (1982), o objetivo da entrevista clínica é investigar a natureza e a extensão do conhecimento de um indivíduo com relação a um certo domínio. Desenvolvida principalmente a partir dos trabalhos de Piaget, a entrevista clínica evidencia o papel ativo do pesquisador na investigação qualitativa, pois é ele quem desenha o plano da pesquisa e escolhe as questões centrais a serem apresentadas aos sujeitos, à luz do seu referencial teórico e de acordo com os objetivos da investigação. O pesquisador age, também, de acordo com os dados recebidos durante a entrevista, propondo novas questões com o fim de esclarecer ou aprofundar as respostas do entrevistado, adaptando as situações propostas.

Nessa perspectiva, a entrevista clínica consiste em um procedimento flexível, que geralmente contempla a proposição ao sujeito de uma tarefa aberta e que envolve a

mobilização dos esquemas que se pretende estudar. A partir das ações e respostas do sujeito, o pesquisador levanta novas questões, de caráter contingencial, que requerem uma considerável dose de reflexão por parte do sujeito. Para Ginsburg (1981), ainda que deva partir de um problema proposto, a entrevista clínica deve ser planejada de forma aberta de modo a permitir uma espécie de observação naturalística com resultados não previstos ou não esperados. Isso se dá especialmente pelo aspecto contingencial do sequenciamento de questões propostas pelo pesquisador ao sujeito.

Ao apresentar alguns exemplos para ilustrar as características principais das entrevistas clínicas, Ginsburg (1997) destaca que há pelo menos um aspecto de padronização nesse tipo de entrevista: a tarefa ou questão apresentada ao sujeito é decidida previamente pelo pesquisador, e proposta da mesma forma para todos os entrevistados. A preparação dessas tarefas deve ser pensada de maneira bastante detalhada, antes do início da interação entre o pesquisador e o entrevistado. Uma segunda característica é que a tarefa envolve objetos concretos com os quais os sujeitos podem operar. O exemplo apresentado por Ginsburg, bastante representativo dos testes piagetianos, objetiva investigar a conservação de número na criança. Para isso, uma possibilidade seria o pesquisador apresentar duas coleções contendo a mesma quantidade de objetos - por exemplo, uma coleção de bonecos e uma coleção de chapéus -, cuja disposição espacial permita visualizar facilmente que os elementos estão à mesma distância uns dos outros, e perguntar à criança se há a mesma quantidade de elementos em ambas. Após a resposta positiva, o investigador aumenta a distância entre os elementos de apenas um dos conjuntos e refaz a pergunta. A criança de cerca de quatro anos tipicamente responderá agora de forma negativa. O pesquisador deve preparar perguntas visando elucidar a resposta do entrevistado ("*como você sabe?*", "*como você chegou nessa conclusão?*" ou "*por que agora há mais chapéus?*", e assim por diante).

Para Ginsburg (1997), o pesquisador também necessita estar preparado para interpretar as respostas do entrevistado *in loco*. De acordo com o autor, essa interpretação deve ser realizada

> ... sem referência a um sistema de pontuação previamente decidido [...] Para interpretar o que a criança diz e faz, o entrevistador deve confiar no conhecimento específico do domínio investigado, conhecimento geral sobre crianças, o contexto, e as regras e normas sobre interação conversacional (GINSBURG, 1997, p. 33, tradução nossa).

Embora tenha adotado essa abordagem metodológica ao longo de décadas de trabalho, Piaget pouco escreveu explicitamente sobre o método clínico. Algumas considerações podem ser encontradas na introdução de "*A Representação do Mundo na Criança*", obra publicada originalmente em 1926[12]. Nela, Piaget e seus colaboradores propõe-se a abordar a formação da distinção entre o pensamento e a realidade no desenvolvimento intelectual da criança. Ao criticar a ineficácia tanto dos testes padronizados quanto da observação pura com relação aos propósitos dessa investigação, destaca que os primeiros distorcem o objeto pesquisado e não permitem o aprofundamento necessário, enquanto a segunda esbarra no egocentrismo da criança que dificulta a apropriação de seu pensamento e na dificuldade em discernir as crenças reais de simples brincadeiras.

É na tentativa de evitar essas limitações, sem abrir mão dos recursos oferecidos pelos testes e observações, que Piaget propõe o emprego do método clínico como uma terceira via. Assim, o exame clínico procura articular elementos da observação direta com a formulação de perguntas, elaboração de hipóteses e a variação nas condições do problema. Não se trata, contudo, de um procedimento fácil de aplicar. Uma das principais dificuldades apontadas por Piaget é evitar o sugestionamento, porém sem recair num passeio ao acaso:

> O bom experimentador deve com efeito reunir duas qualidades frequentemente incompatíveis: saber observar, ou seja, deixar a criança falar, não calar nada, não desviar nada; e, ao mesmo tempo, saber buscar alguma coisa precisa, ter a cada momento alguma hipótese de trabalho, alguma teoria, verdadeira ou falsa, a controlar. (PIAGET, 2005/1947, p. 15).

12 A versão em língua portuguesa é uma tradução da terceira edição da obra, publicada em 1947.

Piaget não estabelece regras ou procedimentos específicos sobre como deveria ser conduzido um bom exame clínico, atribuindo a aquisição dessa habilidade principalmente à prática prolongada. No entanto, tece algumas considerações e propõe alguns critérios para a análise dos dados, com a intenção de tornar mais inteligíveis as conclusões que apresenta posteriormente. O autor destaca dois perigos que ameaçam a validade das análises feitas por pesquisadores iniciantes: atribuir uma relevância excessiva à todas as respostas das crianças, acreditando que tudo o que que disserem tem validade para a análise, ou, no outro extremo, desacreditar e desvalorizar todas as respostas. A habilidade necessária para o bom emprego do método clínico seria portanto a capacidade de situar cada fala no seu contexto mental[13] correspondente.

Contudo, o método piagetiano sofreu transformações principalmente a partir da década de 1930, deixando de centrar-se apenas na fala e passando a focalizar a ação dos sujeitos. Esse redirecionamento, que levou a uma modificação considerável no modo de condução das pesquisas, efetua-se à medida em que Piaget passa a reconhecer que o conhecimento não pode ser identificado com a linguagem, mas é formado também na ação (FRANCO, 1997).

4.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

Tanto por causa do problema de pesquisa escolhido quanto do referencial adotado é que optou-se nesse estudo pela realização das entrevistas clínicas, abordando-se situações experimentais em que se faz uso de materiais concretos. Com relação ao referencial, acreditamos que a necessidade de trabalhar com materiais concretos é

13 Uma categorização desses possíveis contextos mentais é descrita em Piaget (2005/1947): o *não-importa-o-que-ismo*, em que a pergunta não desperta na criança nenhuma adaptação; a *fabulação*, em que a criança inventa uma resposta na qual não crê de fato; a *crença sugerida*, quando a pergunta é sugestiva e a criança confirma o viés da pergunta para agradar ao entrevistador; a *crença desencadeada,* quando a pergunta não é sugestiva mas trata de uma questão que sobre a qual a criança nunca se formulou antes; e a *crença espontânea*, quando a pergunta já foi formulada pela criança anteriomente, que pode então dar uma resposta fruto de processos de pensamento anteriores e originais (PIAGET, 2005/1947).

dupla: por um lado, temos na TCC uma visão de conceitualização na qual ação e representação são indissociáveis; por outro, temos na epistemologia bungeana uma visão de modelos como mediadores entre a teorização e a realidade. Parece-nos assim que as dimensões "ação" e "realidade" precisam estar presentes para que seja possível investigar elementos de modelização que tenham algum papel (ou que deixem de tê-lo) em situação envolvendo algum Campo Conceitual da Física.

4.3.1 O instrumento

Dado que se procura localizar o emprego dos elementos de modelização - em particular, dos objeto-modelo, modelos teóricos e teorias gerais - na estruturação dos esquemas mobilizados pelos sujeitos, optou-se por propor situações que tivessem o potencial de suscitá-los. Em função disso, incialmente foram selecionados dois conceitos pertencentes ao Campo Conceitual da dinâmica da partícula: o conceito de centro de massa e o conceito de inércia. Estes foram selecionados por satisfazerem a dois critérios: 1) serem bastante gerais nesse Campo Conceitual, isto é, ligarem-se a um número muito grande de situações; e 2) serem construtos ou propriedades baseadas em uma idealização do real. Em um caráter menos sistemático e mais complementar, outros conceitos que também podem ser ligados a abstrações e idealizações estão presentes nessas situações: tal é o caso dos conceitos de gravidade, atrito, resistência do ar e composição de forças e da propriedade do isocronismo do pêndulo, conceito que permite o surgimento do aspecto aproximativo dos modelos teóricos.

O centro de massa consiste em um objeto-modelo de importância central na mecânica newtoniana. Trata-se de uma idealização da distribuição de massa de um corpo que permite descrever o movimento de um sistema de partículas (tal como um corpo extenso) como se o sistema fosse constituído por uma única partícula, de massa igual à massa total do sistema, localizada no ponto que é chamado de "centro de massa". Usualmente, toda ou quase toda a mecânica estudada na física escolar do primeiro ano do Ensino Médio focaliza apenas o movimento translacional, aplicando-se a Mecânica

Newtoniana ao movimento de partículas ou, equivalentemente, ao centro de massa de corpos extensos. É, portanto, muito frequente a ideia de "corpos pontuais" aos quais é aplicada a Segunda Lei de Newton visando a resolução de problemas e a interpretação de situações. Dado que corpos pontuais não tem existência concreta, constituindo-se como objetos-modelo, é justamente a noção de centro de massa que permite relacionar aqueles conhecimentos ao comportamento de corpos reais. Daí a importância desse construto para o estabelecimento de relações entre o conhecimento físico escolar e a realidade.

O conceito de inércia apresenta um caso semelhante. Em sua forma típica apresentada na mecânica newtoniana, o Princípio da Inércia estabelece a tendência de um corpo a manter seu estado presente, seja ele de repouso ou de movimento retilíneo uniforme, sendo a força resultante sobre ele nula. Essa condição de um modo geral não é satisfeita, de modo que não se observa no cotidiano a continuação de um estado de movimento por tempo indefinido. Por ser uma lei fundamental do movimento, está presente em qualquer situação do Campo Conceitual da Mecânica. Também é de relevância no contexto desse trabalho pois sua utilização em situações implica em abstrair efeitos resistivos que na realidade existem, sendo de alguma forma determinantes do movimento.

Embora seja uma propriedade muito mais particular, o isocronismo do movimento foi incluído por ser um exemplo arquetípico do caráter aproximativo dos modelos teóricos. No caso do pêndulo, seu período (tempo para efetuar uma oscilação completa) pode ser considerado independente da amplitude do movimento, e assim as oscilações de diferentes amplitudes são isocrônicas. No entanto, trata-se de uma aproximação válida apenas para o caso de um pequeno deslocamento angular: de fato, o período aumenta com a amplitude. Ao mesmo tempo, um pêndulo que é posto a oscilar terá sua amplitude reduzida progressivamente, por ação de forças resistivas, como a resistência do ar. Trata-se, assim, de uma situação potencialmente frutífera para fazer surgir alguma forma de idealização e de aproximação.

Com base nessas considerações, foram elaborados três ensaios que guiam a realização das entrevistas clínicas. O primeiro, que é também o mais abrangente, longo

e aprofundado, versa sobre o pêndulo simples e suscita os três conceitos básicos escolhidos: o centro de massa, a inércia e o isocronismo. O segundo ensaio trata do equilíbrio de corpos de acordo com a sua distribuição de massa e ponto de apoio, e assim objetiva averiguar a possível presença de algum conceito-em-ação relacionado ao centro de massa em uma situação estática. O terceiro e último ensaio consiste na discussão sobre o movimento de um projétil lançado em movimento horizontal sobre uma calha e permite tratar do conceito-em-ação de inércia e também do centro de massa, nesse caso em uma situação dinâmica.

A questão da relação entre o teórico e o empírico, essência da compreensão sobre os modelos e a modelização conforme a desenvolvemos no referencial teórico, perpassou todos os ensaios. Para qualquer um deles é possível estabelecer um modelo teórico tanto pela abordagem de caixa-preta quanto pela abordagem representacional (caixas translúcidas), sendo que a última envolveria necessariamente o apelo a teorias gerais já estudadas pelos participantes no ano letivo anterior. Para investigar como os participantes vêem essas possibilidades, foram incluídas questões direcionadas a sondar o reconhecimento (ou ausência deste) das teorias como elementos que poderiam contribuir para a elaboração de modelos das situações propostas.

A organização dos protocolos é estruturada de acordo com os seguintes passos:

1) Apresentação, quando o aparato experimental é apresentado ao estudante e são feitas questões introdutórias. O objetivo é familiarizar o sujeito com os materiais, acessar suas primeiras impressões e garantir que ele saiba quais recursos pode manipular;

2) Aposta, em que uma questão é colocada e o sujeito é convidado a fazer uma previsão sobre o comportamento do sistema tratado. Pretende-se acessar suas expectativas e no que elas se baseiam, se empregam alguma forma de conceito abstrato, idealizado, mencionam algum modelo ou alguma teoria geral com a qual relacionem a questão proposta;

3) Realização da tarefa, quando o sujeito é convidado a testar a sua aposta, manipulando livremente o aparato, ao mesmo tempo em que é questionado sobre suas ações e expectativa. No caso do primeiro ensaio, esse momento pode desenrolar a

própria elaboração do modelo teórico, pelo menos numa abordagem do tipo caixa-preta. Por fim,

4) Discussão, momento em que são realizados questionamentos adicionais sobre os conceitos e sobre a tarefa em si, especialmente sobre mecanismos e conceitos que não estão "dados" nas informações empíricas coletadas, como forma de tentar acessar sinais de abstrações e idealizações desenvolvidas pelos sujeitos.

Adicionalmente, a escolha dos materiais e das tarefas propostas também procurou atender aos seguintes critérios, apontados como relevantes por Silva e Frezza (2011) ao discutirem a aplicação de entrevistas clínicas com sujeitos adultos:

> a. Há um problema claro a ser desenvolvido; b. O material permite a ocorrência de feedbacks, isto é, o sujeito pode testar hipóteses e o próprio material permite verificar a validade das proposições; c. Existem situações no uso dos materiais que podem se manifestar como conflitos ou resistências às ideias mais imediatas e simples; d. O material não permite uma solução imediata. É necessário passar por diversas etapas que explicitam os procedimentos de resolução e demandam a justificativa e a significação das ações empregadas; e. Pode-se propor variações usando o mesmo material, a fim de verificar a coerência dos procedimentos utilizados em diferentes situações (SILVA; FREZZA, 2011, p. 203).

Os protocolos das entrevistas podem ser consultados no Apêndice A.

Primeiro Ensaio - Pêndulo Simples

A motivação pela temática do pêndulo simples deu-se principalmente pela sua riqueza de idealizações, abstrações e aproximações, além de oferecer um modelo teórico relativamente simples com o qual é possível trabalhar experimentalmente no laboratório escolar. Além disso, análises históricas, científicas, filosóficas e educacionais tem testemunhado o quão frutífero é esse objeto para a compreensão do pensamento científico (MATTHEWS, 2000). No campo da psicologia ele também fez parte dos testes implementados e analisado por Piaget e Inhelder (1976), sob o ponto de vista das operações lógicas realizadas pelos sujeitos em diferentes estágios cognitivos frente ao problema de determinar as variáveis que influenciam na frequência do pêndulo.

No nível hipotético-dedutivo (cerca de onze ou doze anos), sujeitos sem formação prévia no assunto nem experiência em práticas experimentais conseguem estabelecer dependências entre variáveis de modelos simples, mesmo que sejam contra-intuitivos, segundo defendem Piaget e Garcia (2011). Os autores exemplificam citando que esses sujeitos chegam mesmo a obter, com facilidade, a dependência que o período de um pêndulo tem apenas do comprimento da haste, excluindo o peso suspenso e a amplitude do movimento oscilatório. Se assim é, indagam-se os autores, por que razão os grandes lógicos e proponentes de metodologias experimentais do século XIII não produziram um corpo de conhecimentos científicos, pela via lógica-experimental, que superasse a física aristotélica? A resposta de Piaget e Garcia a essa questão vai ao encontro das discussões sobre modelos na Ciência conforme entendida por Mario Bunge.

Em primeiro lugar, os autores destacam que foram eles próprios, enquanto pesquisadores, que propuseram os problemas. A dependência ou não de uma determinada grandeza T em relação a uma certa variável ℓ, m ou g, não é uma questão espontânea dos sujeitos, assim como não é uma questão significativa para a ciência pré-galileana. A invenção do problema e a sua colocação, tanto no desenvolvimento do sujeito quanto ao longo da História da Ciência, intervém decisivamente nos procedimentos e nos conteúdos que poderão ser desenvolvidos.

Um segundo motivo apontado pelos autores é que um tal conhecimento, produzido mais pelo raciocínio indutivo e pela manipulação de dados experimentais, não é suficiente para a busca das "razões", que para eles é o principal motor da Ciência. Essas relações de dependência são as caixas pretas de Bunge, que já destacava a insuficiência dessas abordagens por não darem conta dos mecanismos que permitiriam uma interpretação da realidade. No entanto notamos de nossa parte que mesmo as abordagens de caixa-preta não pertenciam à ciência dos século XIII, vindo a se desenvolver principalmente a partir de Galileo. Nessa passagem, Piaget e Garcia endossam a tendência da ciência moderna de fazer os modelos teóricos evoluírem na direção de abordagens mais representacionais, ou as "caixas translúcidas" na nomenclatura de Bunge.

Por fim, o terceiro motivo apresentado por Piaget e Garcia (2011) é a observação de que, mesmo quando os sujeitos concentram-se em questões de causa e elaboram modelos explicativos, tais elaborações tem geralmente um domínio restrito ao local, sem procurar construir sistemas gerais. À luz da epistemologia bungeana, é possível interpretar esse terceiro argumento como relacionado com o segundo, apresentado acima. Isto é, parte da dificuldade em permitir a "passagem de luz" através das "caixas" pode estar relacionada a uma ausência de teorias gerais nos períodos anteriores a Galileo e mesmo no trabalho deste. Para testar essa interpretação, optamos por investigar se os participantes (nesse caso, com instrução formal em mecânica, em nível de ensino médio) identificam relações da situação proposta com alguma teoria geral.

Além disso, outros aspectos do pêndulo relevantes à modelização foram abordados. O isocronismo, isto é, a independência do período do pêndulo em relação a sua amplitude de oscilação, é uma propriedade que envolve idealizações e aproximações, além de ser bastante contra-intuitiva. Por este motivo, investigamos se esta é construída a partir da articulação dos teoremas-em-ação que os participantes podem acionar nessa atividade. Em adição, notamos que o centro de massa é um objeto-modelo presente em inúmeras situações e que fundamenta todo o estudo da dinâmica da partícula: por ser relevante ao estudo do pêndulo, foi incluído nesse ensaio (e também nos outros dois), na forma de questionamentos sobre a influência da distribuição de massa no pêndulo.

Contudo, optamos por iniciar a entrevista abordando questões sobre as variáveis que influenciam (ou não) no movimento do pêndulo. Como já foi observado, o modelo do pêndulo simples é rico em idealizações, abstrações e aproximações, tornando-o quase um protótipo de modelo científico. Para que as leis do movimento de um pêndulo simples sejam válidas, considera-se que o fio seja inextensível e sem massa; que a massa do pêndulo seja localizado em um ponto; que não exista atrito nem resistência do ar; e que o movimento ocorra dentro de um plano. A discussão sobre a influência das diversas variáveis permite suscitar possíveis elementos da modelização - se é que eles ocorrem - nos esquemas apresentados pelos estudantes nesse ensaio.



Figura 7. Primeiro Ensaio - Pêndulo Simples.

Segundo Ensaio - Equilíbrio no plano inclinado

Considerando que a noção de centro de massa constitui um dos principais objetos-modelo da mecânica newtoniana, esse ensaio é centrado em investigar se ela participa como um conceito-em-ação nos esquemas desenvolvidos pelos estudantes na situação relativa ao equilíbrio de corpos em um plano inclinado. Nessa direção, procuramos observar se o objeto-modelo centro de massa constitui um conceito-em-ação considerado pelos estudantes nessa situação e, em caso positivo, que significados eles atribuem a esse conceito. Além disso, o ensaio proposto pode suscitas a elaboração de um modelo teórico para determinação da altura do plano inclinado no momento em que ocorre o tombamento de um corpo que está apoiado sobre ele, o que pode ser aprofundado na forma de uma condição de tombamento. Por fim, buscou-se investigar a partir de que elementos os participantes buscam subsidiar a sua elaboração de modelos para essa situação: apenas experimentais (como a situação os induz) ou reconhecem algum outro, de natureza teórica?

Os materiais utilizados foram: caixinhas de fósforo vazias; bloquinhos feitos com grampos para grampeador; duas réguas de acrílico de 30 cm, um alfinete comum e fita adesiva. Uma das réguas foi utilizada como plano inclinado, sobre o qual apoiou-se a caixinha que deveria ser equilibrada, sobre sua face lateral. Para evitar que a caixinha deslizasse para baixo, o alfinete foi preso à régua com fita adesiva. A segunda régua era mantida na vertical, ajudando a apoiar a primeira régua e permitindo a medida da altura do plano.



Figura 8. Segundo Ensaio - Caixinha no plano inclinado.

Os bloquinhos foram utilizados para preencher as caixinhas de fósforo, permitindo quatro opções: (1) caixinha parcialmente preenchida, com os bloquinhos na parte de baixo; (2) caixinha completamente vazia; (3) caixinha completamente cheia; (4) caixinha parcialmente preenchida, com os bloquinhos na parte de cima.

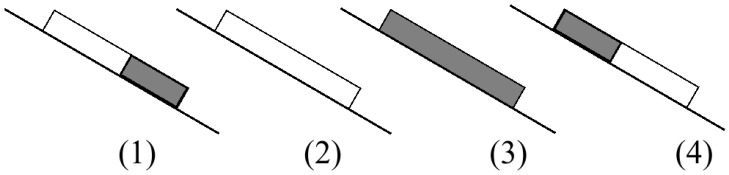


Figura 9. Distribuições de bloquinhos na caixinha.

Inicialmente, os sujeitos foram solicitados a prever a altura do plano no momento em que se atingisse o ângulo de tombamento da caixinha para cada configuração. Questionou-se por quais motivos os sujeitos esperam que a ordem será como previram. Então, eles foram convidados a testar suas hipóteses e a formular novas explicações, conforme o caso. Os participantes manipulavam livremente o aparato durante a proposição das tarefas. Desenvolveu-se a partir de então uma discussão em torno das seguintes questões: Como a posição dos bloquinhos influencia a altura de queda? O que faz a caixinha tombar? Qual é a condição para que ela tombe? É possível prever a altura de tombamento da caixinha sem fazer o experimento? Em caso positivo, como poderia ser feita essa previsão?

Terceiro Ensaio - Movimento horizontal

O terceiro e último ensaio propôs o exame do movimento de uma bolinha lançada horizontalmente sobre uma calha. Uma versão de parte desse ensaio foi investigada por Piaget e seus colaboradores, e analisada do ponto de vista das operações lógicas que caracterizam os subestádios (Piaget e Inhelder, 1976). Naquele estudo, o aspecto principal de interesse dos autores era a conservação do movimento (princípio da inércia). Como esses autores destacaram, o que distingue essa situação de outras operações de conservação que a criança manipula desde mais cedo no desenvolvimento é o fato de atuar apenas no plano do possível absoluto - ou seja, não realizável na realidade -, o que a caracteriza como própria do pensamento formal. Esse aspecto torna a situação do lançamento no plano horizontal propícia para investigar a presença de

operações essenciais à modelização, especialmente a abstração e a aproximação, no pensamento dos sujeitos.

No presente estudo, também investigamos como os participantes pensam a conservação do movimento, mas ao invés da abordagem lógica, procuramos lançar um olhar do ponto de vista dos elementos da modelização. Especialmente, procuramos investigar se os participantes identificam como relevante o objeto-modelo centro de massa ao pensar no ponto de aplicação da força que dá início ao movimento da bolinha. Por fim, completando o exame da relação entre os aspectos teórico e empírico quando os participantes são confrontados com uma situação que exige a construção de um modelo teórico, abordamos a questão da possibilidade de previsão do ponto de parada da bolinha, uma vez que tenha sido lançada para movimentar-se sobre a calha.

Como forma de familiarizar os estudantes com o sistema, as questões principais foram precedidas por um momento inicial em que os participantes podiam lançar e observar o movimento de diversas bolinhas, de tamanhos e pesos diferentes, e fazer comentários sobre quais atingiam maiores distâncias no plano, por que motivos, a relevância ou não de suas massas e volumes, entre outras questões semelhantes. Essa seção da entrevista não será analisada aqui por não se relacionar diretamente com as questões-chave da pesquisa, descritas no parágrafo acima.

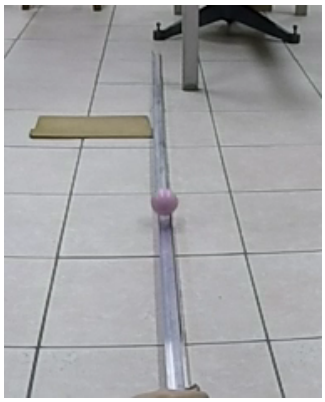


Figura 10. Terceiro Ensaio - Movimento horizontal.

A mobilização do princípio da inércia foi selecionada para fazer parte desse conjunto de testes por dois motivos. O primeiro deles é sua importância como parte da

teoria geral mais estudada pelos participantes até a época da realização dessa pesquisa, que é a mecânica newtoniana. Essa condição possibilita averiguar o reconhecimento ou não de sua relevância, por parte dos alunos, em uma situação empírica simples. O outro motivo é o caráter altamente abstrato e aproximativo do princípio, a que Piaget e Inhelder (1976) referiam-se como "possível puro ou absoluto".

4.3.2 Aplicação do instrumento e registro dos dados

O registro das entrevistas foi realizado utilizando gravação em vídeo, já que acesso à ação do entrevistado é essencial para a consecução dos objetivos dessa pesquisa. Para Clement (2000), a gravação em áudio ou em vídeo também é importante para aumentar a confiabilidade dos dados obtidos. De forma geral, os sujeitos entrevistados não pareceram apresentar qualquer desconforto ou constragimento com a presença da câmera filmadora, com exceção de um desconforto momentâneo de um dos entrevistados, que contudo dissipou-se em poucos instantes. O laboratório escolar ofereceu um espaço confortável, satisfatoriamente silencioso e livre de distrações. A maior parte dos equipamentos utilizados durante as entrevistas foi mantida nesse espaço durante todo o período de coleta de dados, contando-se com a compreensão dos demais professores que utilizavam-se do espaço em outros horários. Todos os três ensaios foram realizados em uma única sessão por participante.

Durante as sessões, o encaminhamento dado pela entrevistadora foi na direção de encorajar os esforços dos participantes em responder às questões; não corrigir ou desencorajar as linhas de pensamento traçadas pelos sujeitos; encorajar a verbalização; insistir em justificativas e evitar questões que induzam respostas.

Foram entrevistados no total dez sujeitos, todos estudantes do segundo ano do ensino Médio-Técnico de uma escola de Educação Básica, Profissional e Tecnológica. As entrevistas ocorreram no laboratório de Física da Escola, em horários do contraturno dos sujeitos, combinados previamente.

É importante notar que, em razão da natureza aberta e flexível dessa modalidade de entrevista, o protocolo exerceu uma função de orientação geral dos pontos a serem cobertos, mas não foi utilizado como um rigoroso passo-a-passo. Isso ocorreu pois, na entrevista clínica, o entrevistador deixa-se guiar na direção em que é levado pelo entrevistado, e é praticamente impossível prever quais serão as questões e os conceitos levantados por cada entrevistado em cada momento. Por esse motivo, não houve um compromisso em seguir de forma estrita a ordem das questões do protocolo, algumas questões não foram postas por ter o próprio entrevistado as levantado em algum momento, e muitas outras questões não previstas foram realizadas, de acordo com as contingências da situação e o direcionamento dado pelo entrevistado.

Durante a transcrição, as ações realizadas pelo entrevistado também foram descritas, juntamente com suas falas. Essas ações são relevantes de modo especial no momento de realização das tarefas, pois tem o potencial de fornecer uma tradução dos esquemas na prática. Elas também podem ajudar a elucidar a origem de algumas das conclusões elaboradas pelos sujeitos, além de auxiliar a compreender as formas pelas quais eles recortam os eventos. Quando considerado relevante, gestos e expressões faciais também foram descritos nas transcrições.

4.4 Sobre os participantes

Os dez participantes voluntários dessa pesquisa são estudantes oriundos dos cursos técnicos de Eletrônica e Eletrotécnica, sendo três do sexo feminino e sete do sexo masculino, com idades entre 15 anos e oito meses e 18 anos e um mês. Luna, João, Alex, Eric, Ivan e Maya são oriundos da mesma turma de Eletrônica; Davi e Caio, da mesma turma de Eletrotécnica; Theo e Sara também são da mesma turma de Eletrotécnica. Para preservar a identidade dos sujeitos participantes, todos os nomes são fictícios. Todos eram alunos do segundo ano do curso à época da realização das entrevistas, que ocorreu próximo ao final do ano letivo, entre a última semana de

outubro e a primeira semana de dezembro. A amostra foi limitada a apenas dez participantes devido à tendência da entrevista clínica em produzir interações longas, complexas e ricas, o que gera uma grande quantidade de dados e dessa forma uma demanda maior de tempo para decodificação, análise e categorização. Também não se buscou uma grande amostra em função da natureza exploratória dessa investigação, já que procuramos por traços ainda não conhecidos no pensamento dos sujeitos e não por testes de hipóteses.

Com relação aos estudos anteriores dos sujeitos, o currículo de Física do primeiro ano contempla três tempos de aula semanais e a ementa referente a ambos os cursos consta dos seguintes tópicos:

- Cinemática vetorial: Grandezas vetoriais. Movimentos Retilíneos e curvilíneos. Gráficos.
- Dinâmica:. Leis de Newton. Impulso e quantidade de movimento. Conservação da quantidade de movimento.
- Gravitação: Leis de Kepler. Lei da gravitação universal.
- Estática: Equilíbrio de uma partícula. Momento de uma força. Equilíbrio de um corpo rígido. Centro de gravidade.
- Dinâmica das Rotações: Leis de Newton aplicadas à rotação. Momento de inércia. Momento angular. Conservação do Momento angular.
- Energia: Trabalho e potência. Energia cinética, potencial gravitacional e potencial elástica. Conservação da energia mecânica.

O currículo de Física do segundo ano, também contando com três tempo semanais e sendo a mesma ementa para ambos os cursos, inclui:

- Eletrostática: Carga elétrica. Lei de Coulomb. Campo elétrico. Potencial elétrico e DDP.

- Eletrodinâmica: Corrente elétrica. Resistência elétrica e resistores. Lei de Ohm. Energia e potência elétricas. Geradores e receptores. Instrumentos de medidas elétricas.
- Magnetismo: Campo magnético. Força magnética sobre carga elétrica e sobre corrente elétrica. Campo magnético e corrente elétrica. Lei de Ampère.
- Eletromagnetismo: Lei de Faraday-Lenz. Ondas eletromagnéticas.

A Tabela 1 apresenta as respectivas idades dos participantes, à época da realização das entrevistas, além de seus respectivos cursos. As idades devem ser lidas como 17;1 representando 17 anos e 1 mês. As duas duplas que aparecem como cursos de eletrotécnica correspondem a duas diferentes turmas daquele curso.

Tabela 1. Cursos de origem dos sujeitos e idades à época da entrevista.

Participante	**Curso**	**Idade**
Luna	Eletrônica	17;1
João		17;4
Alex		16;5
Eric		16;5
Ivan		15;8
Maya		18;1
Davi	Eletrotécnica	18;1
Caio		17;9
Theo	Eletrotécnica	17;1
Sara		16;10

Os participantes eram alunos da pesquisadora na disciplina de Física à época da realização da pesquisa, com exceção de Theo e Sara. Em todos os casos, a participação foi espontânea e sem oferta de contrapartidas, com adesão voluntária de cada estudante após convite da pesquisadora às turmas. Com relação ao desempenho dos participantes na disciplina de Física, a amostra é variada, com destaque positivo para Alex e Davi,

sendo esse último monitor da disciplina de Física durante o ano letivo em que a pesquisa ocorreu. Mesmo entre os participantes com desempenho não tão positivo nas avaliações da disciplina, trata-se em geral de sujeitos automotivados, com iniciativa e que se mostram participativos e interessados nas atividades em sala de aula de Física, como também, de forma geral, em outras atividades escolares.

Todas as participações deram-se com o conhecimento e aprovação do Termo de Comprometimento Livre e Esclarecido (TCLE), que pode ser consultado no Apêndice B e que foi encaminhado anteriormente para conhecimento e aprovação dos participantes e dos pais ou responsáveis. Previamente ao início de cada sessão, os pontos do TCLE foram reiterados e os objetivos da entrevista foram explicados aos participantes em linguagem mais simples, esclarecendo-se de que tratava de uma pesquisa em que se buscava compreender melhor o pensamento dos estudantes daquela faixa etária com relação a algumas situações envolvendo Física, no intuito de beneficiar o ensino dessa disciplina e aprimorar a comunicação entre professores e alunos.

4.5 Análise dos dados

Clement (2000) aponta que existem diversos métodos de análise de dados para entrevistas clínicas, desde aqueles que adotam abordagens mais convergentes - que envolveriam uma codificação detalhada das unidades do corpus analisado, realizada por diversos pesquisadores independentes -, até abordagens mais geradoras, que permitiriam uma interpretação mais aberta de episódios como um todo, feitas por um pesquisador individual. O autor argumenta que essas não são abordagens opostas, mas aspectos complementares, ambos importantes para a análise dos dados obtidos através das entrevistas clínicas. Entendemos que as características das abordagens convergentes auxiliam a tornar mais rigoroso o processo de análise dos dados, enquanto as abordagens geradoras podem favorecer a elaboração de interpretações mais aprofundadas do fenômeno estudado.

A análise dos dados produzidos em entrevistas clínicas é considerada trabalhosa e difícil por várias razões. Uma delas é o fato de produzir dados muito variados; outro aspecto que dificulta essa análise é a inexistência de procedimentos gerais para realizá-la (DELVAL, 2002). A natureza das entrevistas clínicas acaba por impor ao menos um início da análise já desde o momento da coleta dos dados, quando podem começar a se formar algumas hipóteses.

Nesse estudo, como não possuíamos hipóteses formadas previamente, o trabalho de análise dos dados envolveu principalmente uma leitura atenta e repetida dos protocolos das entrevistas até atingir-se uma familiarização com estes. Essa leitura foi realizada mantendo-se em mente o objetivo da pesquisa, que é o de localizar elementos da modelização na conceitualização expressa pelos entrevistados. Tendo essa questão como farol, começamos a fazer uma lista de alguns tipos de respostas que pareceram revelar algumas tendências. Essas primeiras pistas ajudaram-nos a recortar excertos de explicações que permitiam comparações entre os diferentes sujeitos, e que vieram a constituir categorias de análise.

Ao fazer essa leitura investigativa, os principais aspectos que foram buscados e que serão destacados na análise dos resultados consistem justamente naqueles construtos no pensamento dos sujeitos que fossem potenciais candidatos a elementos da modelização (objetos-modelo, modelos teóricos e teorias gerais). Isso foi possível porque, em todos os três ensaios, foram suscitados conceitos-em-ação relativos a objetos-modelo sobre o papel da distribuição da massa do corpo e teoremas-em-ação que indicavam a relação (ou a falta dela) entre as teorias gerais e a construção de modelos teóricos nas situações propostas. A realização de três ensaios possibilitou a cada sujeito manifestar seu pensamento sobre esses aspectos em múltiplas situações, o que ajuda a evidenciar a constituição daqueles elementos da modelização como conhecimentos-em-ação.

Também em função da ausência de hipóteses de trabalho estabelecidas *a priori* e do caráter altamente interpretativo dos objetivos dessa pesquisa, podemos dizer que se trata de uma abordagem mais geradora do que convergente no sentido delineado por Clement (2000). Ainda assim, buscando um meio de validação das análises realizadas,

recorremos ao acordo interjuízes para avaliar a confiabilidade da análise categorial, que foi realizada somente na parte dos resultados que se refere aos conceitos-em-ação, por motivo que será explicado mais adiante nessa seção.

Para isso, inicialmente elaboramos uma lista contendo excertos das falas dos sujeitos que exemplificavam as categorias de análise por nós propostas (uma fala de cada sujeito, para cada uma das 7 situações, totalizando assim 70 unidades de análise) e convidamos um professor com formação em Física e experiência no ensino dessa disciplina, para atribuir independentemente cada unidade de análise à categoria que seria correspondente.

Esse procedimento inicial levou-nos a revisar a categorização, fazendo duas fusões: as categorias "ponto de equilíbrio" e "ponto de apoio" foram unificadas, gerando a categoria "ponto de equilíbrio ou ponto de apoio", que por sua vez captava a essência que era comum a ambas as categorias iniciais, qual seja, tratar-se de um conceito-em-ação que consistia em um ponto do sistema, ao invés de considerar o corpo como um todo ou como uma composição de partes; similarmente, as categorias "ponto que distribui a força aplicada" e "ponto que concentra a massa do objeto" foram unificadas para "ponto que distribui a força aplicada ou que concentra a massa do objeto", pelo mesmo motivo do caso anterior. Essas categorias foram unificadas porque mostraram-se dúbias na análise do juiz convidado mas, principalmente, porque correspondem a um mesmo significado, no contexto geral dessa pesquisa.

Após essas alterações, convidamos outros dois professores, esses também pesquisadores, ambos com formação em Física e experiência no ensino de Física e na pesquisa dessa área, sendo o primeiro doutor em Educação Científica e Tecnológica e o segundo mestrando em Ensino de Ciências, Matemática e Tecnologias, para realizar o estudo de validade dessa nova categorização. Ambos receberam um documento contendo: i) informações sobre o objetivo da pesquisa; ii) os procedimentos de coleta de dados; iii) as questões da entrevista clínica a cujas respostas as categorias se referem; iv) instruções sobre como deveriam proceder a análise; v) a descrição das categorias de análise por nós propostas; e vi) as falas a serem categorizadas. Esse documento pode ser consultado no Apêndice C.

Para realizar o cálculo da concordância, utilizamos um coeficiente chamado kappa de Fleiss. Trata-se de uma medida estatística que permite avaliar o grau de concordância interjuízes ao classificarem itens de acordo com categorias preestabelecidas. A vantagem do cálculo desse coeficiente, em relação ao cálculo da porcentagem simples do número de acordos, é que ele permite corrigir o efeito devido aos acordos ocorridos por acaso. O valor do kappa de Fleiss varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior é a confiabilidade da concordância (FLEISS, 1981).

Embora não exista consenso sobre a interpretação do kappa de Fleiss, Landis e Koch (1977) propuseram que o grau de concordância seja considerado de leve a moderado se o kappa varia entre 0,10 e 0,60; substancial entre 0,61 e 0,80; e quase perfeito acima de 0,81. Mais recentemente, o próprio Fleiss indicou que valores acima de 0,75 representam excelente concordância além do acaso, enquanto valores entre 0,75 e 0,40 representam moderada concordância além do acaso; abaixo de 0,40, a concordância além do acaso pode ser considerada pobre (FLEISS; LEVIN; PAIK, 2013).

No total, 9 das unidades de análise não foram categorizadas por pelo menos um dos juízes, caracterizando dados faltantes (*missing*). Para possibilitar o cálculo do índice, os casos de *missing* foram excluídas da amostra, permanecendo 61 unidades de análise categorizadas. O valor resultante encontrado para o kappa de Fleiss foi 0,81. De acordo com os parâmetros indicados, trata-se de um valor significativo, indicando que pesquisadores independentes concordaram com a classificação proposta.

No entanto, como mencionado, esse procedimento de acordo interjuízes somente foi realizado com as seções relacionadas com a busca por objetos-modelo nos conceitos-em-ação dos participantes (especificamente, àqueles relativos ao objeto-modelo centro de massa). O motivo é que, nas questões que envolviam o papel das teorias gerais na construção dos modelos teóricos, as respostas dos participantes tiveram um direcionamento quase totalmente unânime, não necessitando da proposição de categorias. Por não passarem por esse procedimento de validação, essas respostas foram transcritas para todos os participantes na sua respectiva seção nos resultados.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Cada entrevista teve uma duração total média de 1 hora e 27 minutos. Todas as entrevistas foram transcritas, resultando num total de 190 páginas no *corpus* das entrevistas. Na versão transcrita das entrevistas, todos os nomes dos sujeitos foram modificados de modo a preservar sua identidade. Ocorreu uma variação apreciável no tempo total dos participantes, entre 62,5 minutos a entrevista mais curta a 117 minutos a mais longa. Além disso, na maioria dos casos, a ordem da duração de cada ensaio é decrescente, com o primeiro ensaio apresentando uma duração consideravelmente mais longa do que os outros. De forma geral, os participantes envolveram-se nas tarefas propostas e responderam autenticamente às questões, não se podendo identificar sinais de *não-importa-o-que-ismo*. Além disso, suas respostas tenderam a ser consistentes, indicando não se tratarem provavelmente de crenças sugeridas.

Nas seções a seguir serão apresentados os resultados de cada um dos três ensaios. O formato itálico é usado para as falas dos sujeitos. Em extratos longos com falas de múltiplos sujeitos, aspas são usadas para facilitar a distinção entre falas de sujeitos diferentes.

5.1 PRIMEIRO ENSAIO: PÊNDULO SIMPLES[14]

5.1.1 Relacionando variáveis

O estabelecimento das relações de dependência do período apresentaram uma variabilidade razoável entre os sujeitos. No entanto, na maioria dos casos a massa foi a

14 Uma versão preliminar desse estudo foi apresentada no *XVII IOSTE Symposium*, realizado em Braga (Portugal), em 2016.

primeira variável mencionada como influenciando no período, seguida do comprimento do fio. A Tabela 2 apresenta as variáveis mencionadas espontaneamente (sem sugestão) pelos sujeitos, indicado também a ordem com que a variável é mencionada em cada entrevista.

Tabela 2. Variáveis que influenciariam o período do pêndulo, conforme mencionadas de forma não-sugestionada pelos sujeitos em suas previsões iniciais.

	massa	compri-mento	ampli-tude	gravi-dade	resis-tência	vento	outros
Caio	1	2				4	espessura do fio (3)
João	3	2			1		
Luna	1		2	4	3		
Alex	1	2	5	3		4	
Davi	1	3	5		4		dimen-sões, ma-terial(2)
Eric	1	2		3	4		
Maya	1					2	força ex-terna (3)
Ivan	2	1	4				força (3)
Theo	2	1	5	4	3		
Sara			1				

Em questionamentos mais abertos, do tipo "O que você espera que aconteça agora?" ou "A variável X irá influenciar de alguma forma?", os sujeitos quase sempre descrevem o que esperam que ocorra com a velocidade do pêndulo, e não com o tempo. Quando a questão é formulada de maneira mais fechada, como "O tempo de ida e volta irá mudar?", seguida de um pedido de justificativa para a resposta, tal justificativa tipicamente centra-se também na velocidade, sendo deixado quase sempre implícito pelo sujeito o comportamento da variável tempo.

> "E do que você acha que depende esse tempo? [...] *Se a corda for pequena, ia ficar assim* [indica oscilações pequenas]*, rapidinho".* (Theo); "E isso muda o tempo que ele leva pra completar uma volta? *Faz ir... peraí* [pausa]. *Acho que mais devagar, né, porque..."* (Sara); O que é o período mesmo? *O período não é o tempo, é o quão rápido*

> *ele vai"* (João); "Se eu jogar com força, ou se eu soltar, isso vai alterar o tempo como? [...] *Aí ele ganha, vamos botar assim, uma velocidade maior. Aí quando ele volta, né, apesar de não voltar com a mesma velocidade, mas ainda assim, em comparação a quando você só solta, está mais veloz.* (Maya).

Esse padrão indica que, frente à tarefa da previsão do tempo de ida e volta, os sujeitos elegem como um sub-objetivo a tarefa de determinar o que ocorre com a velocidade do objeto oscilante em cada caso. Esse sub-objetivo está claramente baseado no teorema-em-ação segundo o qual o tempo de ida e volta está relacionado com a velocidade do objeto oscilante, em uma proporção inversa: quanto maior a velocidade, menor é o tempo. Na maioria das justificativas apresentadas, os sujeitos não formulavam respostas sobre o comportamento específico da variável tempo de forma espontânea, sendo necessária alguma insistência ou a repetição da pergunta para que o fizessem. A ausência de afirmações espontâneas envolvendo o termo "tempo" parece indicar que esse teorema-em-ação permanece em grande parte implícito no pensamento dos sujeitos.

Massa

A variável massa foi citada espontaneamente por quase todos os sujeitos, com a única exceção de Sara, que contudo sustenta que essa variável interfere no período quando é questionada diretamente. Seis deles imaginaram em suas previsões iniciais (antes de realizar medidas) que a massa reduziria o período, isto é, tornaria o movimento mais rápido: Luna, Alex, Eric, Davi, Caio, Theo.

Caio, seguindo uma concepção espontânea bastante comum, acredita que o mais pesado vai mais rápido, afirma isto na sua previsão e utiliza essa ideia como um teorema-em-ação logo no início da tarefa: "*Ah, porque ele vai ficar mais pesado. Então ele vai...* [gesticula imitando a oscilação]*... mais rápido. Tem mais peso levando pra frente e voltando*" (Caio). Realizando apenas uma medição em cada teste, de apenas uma ida e volta, Caio mantém sua posição de que o aumento da massa aumenta a velocidade.

Luna prevê, como Caio, que o peso irá alterar o período, também supondo que massas maiores tornarão o movimento mais rápido, dessa forma reduzindo o período, porque "*quando você vai pular de um prédio, se você é mais pesado, você chega primeiro*". Quando realiza medições de período com o cronômetro, Luna não consegue detectar variação nos tempos quando faz variar as massas, mas reluta em excluir essa variável, manifestando frustração e nervosismo. Embora Luna obtenha valores que ela própria reconheça, sem sugestão, que indiquem a independência da massa ("*Que a massa não faz muita diferença. Que não faz diferença"),* sua expectativa de que a massa deveria fazer diferença a leva a acreditar que está fazendo errado, que não sabe fazer a atividade. Luna conclui que está fazendo o procedimento de forma errada.

Alex também faz a previsão de que a massa deverá influenciar no período: " *Quanto maior a massa, maior vai ser o impulso que ele vai ter, maior vai ser a força do movimento.*" Portanto, o aumento da massa deixaria o período menor por tornar a aceleração maior. Apenas nesse trecho de Alex é possível identificar diversos conceitos e teoremas-em-ação: 1) Existe uma força do movimento, isto é, o movimento requer força, e ele será tão mais intenso quanto for ela; 2) Objetos de maior massa terão forças do movimento mais intensas; 3) Quanto maior a força, maior é a aceleração. No caso do pêndulo, essa aceleração é a que corresponde à "força do movimento", sendo tangencial ao movimento; 4) Aceleração e tempo gasto em um movimento são inversamente proporcionais. Ao realizar o teste experimental, Alex afirma imediatamente que a massa não influencia no período, porém fica surpreso e não consegue formular uma explicação para isto. É interessante notar que, mesmo encontrando valores menores do período à medida em que reduzia a massa, Alex ainda assim descarta a mudança na massa como causa desses valores menores: "*eu acho que não, porque com 6 coisinhas deu 1,52, eu diminuí na metade e deu 1,37... variou bem pouco. Coloquei um só e deu 1,53. Provavelmente essa variação foi na distância, na altura.*"

Eric também começa considerando que o aumento da massa reduziria o período porque ele iria mais rápido. O motivo alegado é "*Força igual a massa vezes aceleração. Se você tiver uma massa maior, a força vai ser maior",* mas logo em seguida ele substitui massa por densidade, justificando que, sendo mais denso, ele irá "ignorar"

mais a resistência do ar (cita a queda livre de uma bola e uma pena). Acaba concluindo que "*tem dois fatores, que envolvem um a massa e outro a densidade. Então quanto mais denso e quanto mais maciço for um objeto, mais rápido ele vai*". Quando testa experimentalmente, não detecta alteração de período com a mudança na massa. Conclui que o que fará diferença então é apenas a densidade, e não a massa. A densidade continuaria constante com a adição de mais discos.

Assim como Eric e Alex, Theo também parece apoiar sua expectativa sobre a influência da massa em alguma forma da segunda lei de Newton: "*Tem até uma fórmula de aceleração lá, que... a aceleração fica mais rápida. E também por causa do atrito com o ar que ele não vai ter tanto. Não sei explicar* [rindo]*, só sei que é.*" (Theo). Theo não modifica esse teorema-em-ação ao testar com o aparato experimental. Para tentar aumentar o período do pêndulo, Theo gradativamente retira discos do suporte, reduzindo sua massa:

> Você tirou dois discos, é isso? *Sim.* E aí você espera que aumente o tempo de ida e volta? *Sim! Já aumentou um pouquinho!* [Enquanto faz medidas do tempo de uma oscilação]. [Tira mais um disco, realiza nova medida de tempo, em seguida retira ainda outro disco e mede o tempo novamente, sempre de apenas uma oscilação. Repete a medição diversas vezes. Em dado momento, mostra o cronômetro]. *Viu?* [...] Como você explica isso? *Da massa? a aceleração. Do... da gravidade, foi um pouco menor.* [Pausa breve]. *Quer dizer, a aceleração é a mesma, mas... não, quer dizer, a velocidade é a mesma, mas a aceleração dele foi um pouco...* [hesitante] *deixa eu tentar lembrar... a aceleração... é, a aceleração dele foi menor do que a com mais peso. Porque a gravidade foi um pouco menor* (Theo).

Inicialmente, Davi imagina que uma maior massa fornecerá maior energia para o pêndulo, que com isso se deslocaria por uma distância maior, assim como Ivan. Após um momento de reflexão, muda de ideia, pois considera que a altura do outro lado não pode superar a altura de onde ele foi solto. Ainda assim, mantém a previsão de que o aumento da massa aumentará o período, porém não consegue justificar e atribui essa expectativa à sua intuição. Convidado a testar essa hipótese, mesmo fazendo apenas uma única medida de apenas uma oscilação, Davi conclui de forma imediata pela independência da massa, de forma idêntica à Alex. Assim como este, Davi não consegue

formular uma explicação. Mas parece esperar que exista alguma espécie de compensação em jogo, ainda que não aponte exatamente qual: "*Eu imagino assim, pra ser igual, ao aumentar a massa, tem que diminuir alguma coisa. Já imagino assim. Mas... não consigo imaginar o que. Não tenho ideia.*" (Davi).

Ivan espera que a massa influencie no período, mas afirma não saber se para mais ou para menos e rapidamente começa a testar com o material. Verifica que não influencia, mas ainda explica porque esperava que influenciasse: "*quando você puxa pra trás, ele quer voltar pro lugar, então em uma força pra cá* [aponta pra posição de equilíbrio]. *E tem uma força pra cá* [aponta verticalmente para baixo]. *E... assim, como tem mais força pra baixo, por causa do peso, quando tem a massa mais elevada, a força para baixo aumenta".* Logo em seguida ele também apresenta uma explicação para que não se verifique alteração no período: a massa maior ocasionaria uma queda com maior velocidade, no entanto, por inércia, isso fará com que o arco percorrido seja também maior. Esse parece ser o mesmo teorema-em-ação formulado e em seguida abandonado por Davi.

É interessante notar que, mesmo percebendo que a mudança na massa não alterou o período ("*Não vai modificar o período. Na aparência, não...*"), Ivan continua considerando que a massa influencia, no momento de realização da tarefa de preenchimento da tabela: *A coisa mais fácil de se mexer* [retira dois discos do suporte e mede o período]. *Dois segundos ainda... Já reduziu o tempo, mas reduziu bem pouco.* Portanto ele não elimina a massa, mas nesse momento confirma a dependência experimentalmente e utiliza-a ativamente como um teorema-em-ação: "*Eu tentei tirar o máximo de peso porque o tempo é curto, então com um peso maior isso aqui [o suporte de discos] ia demorar bem mais pra voltar porque ele ia muito mais do outro lado".*

Maya, ao contrário dos demais, espera que um aumento na massa tornasse o período mais longo, relacionando esse efeito com uma certa dificuldade em se movimentar objetos pesados: "*Porque normalmente, quando a gente leva muito peso... por exemplo, a minha mochila, quando a minha mochila está um pouco mais leve, eu consigo andar mais tranquila e vou mais rápido. Agora quando a mochila está mais pesada, eu vou um pouco mais devagar. Então deve ser por causa disso.*" Durante os

testes experimentais, nota-se que Maya repete diversas vezes a mesma medida, observa o cronômetro com expressão de contrariedade antes de repetir, pausa... em alguns momentos, chega a afirmar que modificou o número de discos mas o tempo ficou igual. Após, repete a medida novamente, às vezes retirando mais discos. Ao fim, ainda mantém a crença de que o peso influi no período, mas menos do que ela esperava: "*Pelo que eu medi... eu fiz os testes com os discos e sem os discos, né. Teve uma diferença. Sem os discos, a velocidade aumentou, pouca coisa, mas aumentou. Com os discos ela diminui um pouco a velocidade.*".

O posicionamento de João é ambíguo. Inicialmente levanta a hipótese de que a massa influencie, mas imediatamente parece mudar de ideia:

> *Acho que o peso maior faria...* [olhando para o suporte com discos] *Não, peso não... Peso não influencia, não* [murmurando]. [Pausa] *Acho que o peso pode influenciar na energia do sistema, porque você pode ter mais força, mais tração sobre o fio. Mas acho que não na questão do movimento pendular. Porque se eu tacasse o peso daqui... se o peso fosse maior, eu acho que ele voltaria pro mesmo lugar e faria o mesmo movimento do peso menor.* No mesmo tempo? Não sei, daí... acho que sim.

Logo em seguida, testa com massas diferentes e confirma sua hipótese de não-variação: mesmo assim, fica insatisfeito com a constatação e declara que deveria haver uma variação, "*... porque... você aprende que força é igual a massa vezes aceleração. Se você tem uma massa maior, daí tipo, uma força maior. Eu não sei se essa discrepância... se a diferença de peso é muito pequena para ficar notável, mas parece que... isso não entra na minha cabeça, o fato de não influenciar"* (João). Além disso também cita sua intuição formada a partir da vivência cotidiana: "*Por exemplo, você taca uma bola... se você taca uma bola de papel na parede ou se você taca uma bolinha na parede, você vê que o negócio é diferente"*.

Sara, a única participante a não mencionar a influência da variável massa de forma não espontânea, quando é perguntada, responde apenas: "*Assim, acho que se está mais leve, acho que ele vai mais rápido*" (Sara). Porém ao ser questionada sobre o motivo dessa expectativa, Sara não sabe explicar. Apesar disso, ao testar experimentalmente sua hipótese, Sara não detecta nenhuma alteração do período com a

variação da massa: "E o que você acha disso? [Breve pausa] *Que não muda!* [rindo]. Você consegue imaginar um motivo para que não mude? *Não sei. Acho que não tem a ver com a massa"* (Sara).

Comprimento

Caio menciona de início uma influência do comprimento, mas fica em dúvida se ele aumenta ou diminui o período. Olha para o pêndulo por alguns instantes e diz: "*Ele vai ficar mais curto, então a trajetória dele vai ser menor* [faz um movimento de oscilação com o dedo para ilustrar seu raciocínio]. *Então ele vai e volta mais rápido"* (Caio).

Alex também reconhece que o aumento do comprimento do fio acarreta um aumento do período porque ele fará um "movimento maior". Não tem certeza, mas desconfia de início que essa relação possa ser diretamente proporcional. O mesmo teorema-em-ação é utilizado por Davi: "*Porque eu acho que é um espaço maior. Porque pra percorrer isso aqui é maior [move o pêndulo com a mão como se ele estivesse oscilando com a corda longa] do que pra percorrer isso aqui, por exemplo* [move o pêndulo como se ele estivesse oscilando com uma corda curta] (Davi); por Ivan: "*Numa corda curta, o movimento fica menor*" (Ivan) e, apoiando-se mais em linguagem gestual e menos verbal, por Theo: "O que faz com que tendo comprimento maior, o tempo aumente? *Por causa de... eu acho que... a relação do...* [desenha um semicírculo no ar, como se estivesse indicando a trajetória descrita pelo pêndulo]*, esqueci o nome do que ele faz... o ciclo que ele faz, é em relação com o comprimento do fio. Mas eu não sei porque. Sei porque, mas não sei explicar.* Ele anda mais? Uma distância maior? *Sim. Porque... ele vai mais longe* [desenha um semicírculo no ar, de raio maior, indicando uma maior distância percorrida pelo pêndulo]*"* (Theo). Assim, também coincidindo com Alex, Davi, Ivan e Theo esperam que o aumento do comprimento implique em um aumento de período.

O comprimento do fio não é mencionado espontaneamente por Luna. Ao ser consultada, explica que o fio é o raio de um semicírculo descrito pelo pêndulo e, assim,

quando este for menor, o percurso também será menor e portanto ele irá "mais rápido". Portanto, parece empregar um teorema-em-ação semelhante ao de Ivan, Davi, Alex e Caio, qual seja, de que o aumento no período resulta em uma distância maior a ser coberta pelo movimento do pêndulo, porém com uma matematização mais explícita da situação.

Eric obtém que o aumento no comprimento acarreta um aumento do período, mas usando um raciocínio de casos extremos:

> *.. uma forma de tentar entender isso é fazer um caso extremo. Por exemplo, colocar o pêndulo aqui* [próximo do eixo] *e fazer trinta graus, ele vai fazer isso aqui* [movimenta o suporte com discos ao longo da trajetória,com o fio curto]. *Agora se você colocar um fio que seja de dez mil metros de altura, se você deslocar ele trinta graus, ele vai demorar muito pra ir. Porque a distância é... não tem comparação com essa* (Eric).

O comprimento também é uma variável citada espontaneamente por João, que prediz que o período aumenta com o aumento do comprimento e tenta formular uma explicação em termos da intensidade da força que o puxa de volta.

O teorema-em-ação relacionado ao comprimento que é sustentado por Maya é único entre os sujeitos entrevistados: considera que mudanças no comprimento do pêndulo não afetarão o período, porque a distância que é percorrida pela pêndulo depende apenas da amplitude: "*Porque a distância vai continuar igual. Se ele puder correr daqui até aqui* [move o pêndulo com a mão, mostrando a trajetória] *vai dar na mesma que se fosse aqui* [move um pêndulo imaginário mais abaixo, como se o fio fosse mais longo]." Na realização dos testes experimentais, muda de ideia e afirma que o período é afetado pelo comprimento, ainda que o seja pouco: "*Agora, fazendo, acredito que sim. Porque... não, peraí.* [Põe o pêndulo para oscilar, soltando-o, e observa. Franze a testa. Repete. Olha com expressão de dúvida] *Eu acho que talvez, quando diminui a cordinha, altere um pouco. Pouca coisa, mas altera um pouco a velocidade*". Mais adiante na entrevista, descobre-se que Maya visualiza a trajetória descrita pelo pêndulo não como um arco de circunferência, mas como uma reta. Por esse motivo, não consegue explicar a detectada influência do comprimento do fio no

período do pêndulo, já que considera que a distância percorrida como ainda sendo a mesma.

Assim como Luna e Maya, Sara não menciona espontamente a influência do comprimento. Ela também considera que o período será maior com o aumento do comprimento, mas como Theo, tem dificuldade em colocá-lo em forma predicativa, apoiando-se principalmente na linguagem gestual: *"É porque quando o fio está muito grande, daí ele...* [gesticula com as mãos imitando o movimento de um pêndulo]... *faz um trabalho maior pra chegar até o outro lado"* (Sara). Essa fala de Sara levantou a hipótese de que ela acionasse, como os anteriores, o conceito-em-ação de distância percorrida. Mas, testando essa hipótese no momento, vimos que não era este o pensamento de Sara:

> Ele teria que andar menos? *Não, tipo, a distância seria a mesma. Mas a força que eu teria que fazer pra empurrar até aqui* [gesticula com as mãos imitando o movimento de um pêndulo de pequeno comprimento] *seria menor do que eu teria que fazer para empurrar até aqui* [gesticula com as mãos imitando o movimento de um pêndulo de grande comprimento]. *Vai ter uma força maior, eu acho, se tiver um fio maior* (Sara).

Amplitude inicial

No caso da dependência com a amplitude inicial, foi possível notar o emprego de um raciocínio de compensação em Caio, João e Alex. Em todos os três, o teorema-em-ação assume a mesma forma: ao soltar-se o pêndulo de uma altura maior, a velocidade adquirida será maior, mas a distância a ser percorrida também será maior, e os dois efeitos anulam-se mutuamente, mantendo constante o tempo gasto.

Dos três sujeitos, apenas Caio apresenta o raciocínio de compensação para o problema de amplitude antes de experimentar com o pêndulo. Incialmente, ele afirma que a amplitude influenciaria, pois

> *... É como um skate numa ladeira. Se você soltar ele lá de baixo, ele vai mais devagar, se você soltar lá de cima, ele vai mais rápido.* [Em seguida, hesita e, sem realizar nenhuma medida, muda de ideia]: *Mas não... eu acho que não influencia no tempo. Porque, por exemplo,*

> *aqui* [altura mais elevada] *tem mais velocidade, só que a trajetória é maior. Então ele demoraria o mesmo tempo. Eu acho.* [Pausa] *Se eu soltar ele daqui* [posição mais elevada]*, ele vai ter que fazer isso aqui* [indica a trajetória a ser percorrida] *só que ele vai ganhar uma velocidade maior. Se eu soltar ele daqui* [posição menos elevada]*, a velocidade é menor, só que a trajetória é menor* (Caio).

Quando questionado se um fator compensa o outro, afirma que isso é o que ocorre em alguns casos, mas não em todos: não ocorreria caso a amplitude inicial fosse muito pequena, pois nesse caso o pêndulo "chegaria primeiro".

É interessante notar que, apesar de ter declarado que a amplitude inicial não influenciaria no tempo (ao menos em alguns casos), Caio não adota essa independência como teorema-em-ação ao realizar a tarefa de preenchimento da tabela. Ao procurar obter os valores de período pré-estabelecidos através da modificação da massa do pêndulo, Caio toma o cuidado de manter constante a distância entre o ponto de onde solta o pêndulo até a posição de equilíbrio, inclusive verificando-a, a cada medição feita, com o auxílio de uma trena. Em seguida, ainda buscando o valor definido para o período, Caio solta o pêndulo a uma amplitude inicial menor (medindo metade da distância entre o ponto de soltura e o ponto de equilíbrio, com a trena), enquanto declara: "*Eu espero que o tempo... seja menor. Porque está mais perto"*. E, após realizar a medição, Caio confirma essa hipótese, afirmando que a redução da amplitude provocou uma diminuição no período, porque a trajetória se torna menor. Mais uma vez, essa confirmação se dá pela realização de uma única medição do tempo de uma ida e volta. Questionado outra vez mais tarde, Caio impõe a seguinte condição de validade da independência da amplitude: "*Quanto maior a altura, maior a trajetória. Mas quanto maior a altura, maior também a velocidade. Se essa trajetória for muito alta, a velocidade... se essa trajetória for muito alta, mesmo tendo mais velocidade, o tempo vai ser menor... vai ser maior*". Caio modifica mais de uma variável na tarefa e não parece buscar relacioná-las, de forma isolada, ao período.

Ao ser perguntado sobre a possível dependência com a amplitude inicial, João experimenta com o pêndulo, medindo o tempo de várias oscilações, e conclui pela independência. Afirma que esperava esse resultado, e justifica também por um

raciocínio de compensação: "*se você joga de um ponto mais alto, em tese ele vai mais rápido, mas ele chega a uma distância maior e tem que voltar uma distância maior do que se eu jogar ele de um ponto mais baixo. Só que ele vai mais devagar. Então ele faz tipo um movimento menor, mas ele leva mais ou menos o mesmo tempo.* " (João). Essa sequência de afirmações aponta que João utiliza velocidade e tempo como conceitos-em-ação e os coordena em função da distância.

Theo parte dos mesmos teoremas-em-ação iniciais de João, mas produz uma inferência diferente. Ainda que considere que a amplitude inicial maior implica em (1) velocidade maior e (2) distância maior, Theo imagina que o segundo efeito não compensará o primeiro, mas será mais intenso do que ele:

> E você marcou também o ângulo, isso é importante? *Se fosse daqui* [amplitude inicial maior], *ele iria demorar mais, um pouco. A velocidade ia aumentar, mas ia demorar.* [...] Por que demora mais, quando você solta de um ângulo maior? *É, tipo, não sei explicar* [rindo], *é que a aceleração dele vai aumentar até chegar aqui* [ponto mais baixo da trajetória], *mas quando chegar aqui* [no outro lado], *também vai subir mais, o que vai aumentar no tempo. Já quando diminuir* [a amplitude], *o ciclo dele já é menor, aí vai e volta mais rápido.* [...] É por isso que ele vai demora mais, é isso? *Sim. Mesmo a velocidade sendo maior.* [...] *porque a aceleração vai ser maior, mas aí a aceleração que ele vai vai subir mais e vai perder mais tempo* (Theo).

A amplitude inicial é a única variável mencionada espontamente por Sara. Ao se indagar o que ocorre com o período ao se liberar o pêndulo de uma amplitude inicial mais elevada, Sara diz:

> *Eu acho que... [olhando o pêndulo oscilando]... ele demora mais pra ir e pra voltar... [ainda quanto observa-o] mas é mais rápido! [rindo]. Acho que ele vai mais rápido.* Então como fica o tempo de ir e voltar? *[Silêncio de seis segundos] Vai ficar menor.* [...] *Acho que se ele vai indo mais devagar, o tempo vai ser mais.. rápido... Se a distância [amplitude] for menor, o tempo vai ser maior... não é? Acho que a distância se ele vai daqui até aqui [amplitude grande] vai ser... demorar mais do que se ele vier daqui até aqui [amplitude pequena]"* (Sara).

Quando convidado a testar a dependência com a amplitude, mesmo fazendo apenas uma medida de duas amplitudes diferentes, Alex imediatamente conclui pela

independência da amplitude. Em sua explicação, Alex também emprega a compensação, na mesma forma que Caio e João: "*Mesmo a trajetória dele sendo maior, um caminho maior, ele acaba sendo mais rápido, indo com uma velocidade maior*".

Luna não utiliza a compensação na dependência com a amplitude inicial e considera apenas a alteração que essa variável produz na distância percorrida. Assim, não toma a velocidade como um conceito-em-ação nesse problema. Apesar da questão apresentada versar sobre o tempo, Luna responde também, implicitamente, em função da velocidade, ao dizer que no caso de amplitude menor ele "não precisa fazer tanta coisa" e com isso "vai mais rápido que o outro". Ao testar a dependência com a amplitude, Luna não consegue detectar nenhuma: "*Professora, eu cheguei à conclusão de que nada faz diferença. Que deus está de sacanagem com a nossa cara.*" Ela chega mesmo a formular uma condição de validade dessa independência: "*Quando estava muito longe, fez diferença. Quando estava aqui* [posiciona o pêndulo em um ponto mais alto. Faz a medida de tempo]. *Aí ficou um vírgula três. Mas quando está pertinho, não fez diferença".*

Assim como Luna, Maya considera apenas o aumento no percurso que é ocasionado por um aumento na amplitude, concluindo igualmente que amplitudes maiores levam a períodos mais longos. Essa expectativa é corroborada por ela experimentalmente: "*Quando eu soltei daqui foi quatro e setenta e dois* [menor altura] *e quando eu soltei daqui foi quatro e setenta e oito* [altura maior]. *Teve uma diferença, mínima, mas teve".*

Davi também não emprega a compensação na relação da amplitude com o período. Esperando que a amplitude interfira no período, é convidado a testar e, ao fazê-lo, confirma sua hipótese. O teste realizado por Davi consiste em apenas uma medição, comparando duas amplitudes. A maior, porém, é tão grande que, no momento em que o pêndulo é solto, o fio está quase paralelo ao chão. Com isso, obtém um valor razoavelmente maior do período.

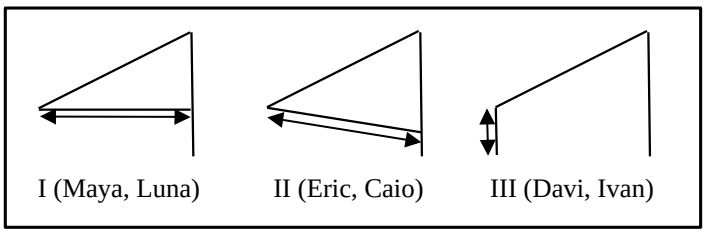
Eric também não elimina a dependência com a amplitude, mesmo considerando que, com amplitude menor, tanto a velocidade inicial quanto o percurso serão menores. Mantém que o tempo de ida e volta será, mesmo assim, menor. Mas tem dificuldade em

visualizar separadamente amplitude e comprimento, pois considera que um influencia no outro: "*É estranho, porque se você tivesse um fio muito grande, você imagina que o pêndulo ia se mover muito rápido.. muito rápido, mesmo. Se tivesse um pêndulo de vinte metros, inclinasse ele a oitenta graus e você lançasse esse pêndulo, ele ia ter uma aceleração muito grande.* " Depois, faz uma observação do movimento do pêndulo e se surpreende por não perceber essa influência: "*Aqui* [pequeno ângulo] *o tempo é pequeno. Aqui* [grande ângulo] *o tempo é grande* [Neste, conta ritmadamente o tempo]... *um, dois, um, dois, um, dois...* [em seguida, solta novamente com pequeno ângulo e repete a contagem] *um, dois, um... nossa, parece o mesmo. Estranho*". Ainda continua mantendo a expectativa de dependência com a amplitude, "*Porque a distância percorrida do ciclo é maior*".

Já Ivan, também esperando um aumento do período com a amplitude, utiliza a energia como um conceito-em-ação nesse problema, declarando que uma amplitude maior significa mais energia, o que por sua vez implicaria em um período maior. Testando, confirma essa hipótese: "*... a amplitude foi menor, então demorou menos tempo pra ir e voltar. Porque é menos distância.* "

Ainda com relação à dependência com a amplitude, foi possível perceber uma variedade de formas pelas quais os participantes as mediam. Embora quatro deles (João, Alex, Theo e Sara) não pareceram sentir necessidade de medi-la de fato e chegam a suas conclusões apenas por observar oscilações produzidas com amplitudes diferentes, os demais optaram por utilizar a trena para controlar essa variável. Maya e Luna fizeram isso medindo a distância horizontal entre o suporte com discos e a haste metálica; Eric e Caio usaram a posição de equilíbrio como referência, enquanto Davi e Ivan mediram a distância vertical entre o suporte com pesos e a superfície da bancada. Essas diferentes condutas estão esquematizadas na Figura 11.

Figura 11. Diferentes modos de medição da amplitude inicial de oscilação.



5.1.2 Centro de massa

No ensaio sobre o pêndulo simples, a primeira situação envolvendo a massa foi abordada no contexto da determinação das variáveis que influenciariam no período do movimento. A variável massa foi citada espontaneamente por quase todos os sujeitos, com a única exceção de Sara, que contudo sustenta que essa variável interfere no período quando é questionada diretamente. Seis deles imaginaram em suas previsões iniciais (antes de realizar medidas) que a massa reduziria o período, isto é, tornaria o movimento mais rápido: Luna, Alex, Eric, Davi, Caio, Theo.

Caio, Theo e Maya não modificaram sua opinião após testarem com o aparato experimental: pelo contrário, as confirmaram. Embora os procedimentos experimentais utilizados por eles tenham sido pouco rigorosos, realizando a medição do período com apenas uma oscilação e sem o cuidado de tomar pequenas amplitudes, esses descuidos não podem ser o único motivo para esse resultado, pois o mesmo poderia ser dito sobre os demais participantes. Isso mostra que, na ausência de um direcionamento externo mais específico, os teoremas-em-ação nem sempre são modificados pela experimentação desenhada para fazê-lo, às vezes nem mesmo momentaneamente.

Metade dos participantes empregaram para isso um teorema-em-ação que parece "mal-inspirado" na Segunda Lei de Newton:

> "*Porque... você aprende que força é igual a massa vezes aceleração. Se você tem uma massa maior, daí tipo, uma força maior"* (João); *"Quanto maior a massa, maior vai ser o impulso que ele vai ter, maior vai ser a força do movimento"* (Alex); *"Força igual a massa vezes aceleração. Se você tiver uma massa maior, a força vai ser maior"* (Eric);

Essas afirmações parecem indicar um conceito-em-ação de massa como algo que produz ou aumenta força (ou que produz ou aumenta aceleração). Em adição, essas falas ilustram o papel do aspecto gerador dos esquemas, conforme denotado por Vergnaud: durante o controle das informações, a força é tomada pelos sujeitos como algo que o corpo massivo aplica, e não algo que é sobre ele aplicado. Isso ajuda a entender porque Vergnaud considera o aspecto gerador como a tradução dos teoremas-em-ação na prática: ainda que esse teorema-em-ação trazido como justificativa pelos sujeitos configure alguma forma da Segunda Lei, as regras de ação aplicadas pelos sujeitos ao traduzi-lo na situação do pêndulo simples os levam a produzir inferências diferentes daquelas aceitas cientificamente. Essa categoria foi nomeada como "Produtora de força" e se refere a explicações que, com base no teorema-em-ação "força é igual a massa vezes aceleração" concebem a massa como uma entidade cujo aumento provoca um aumento de força.

Os demais participantes não explicitaram uma relação da massa com aceleração, força ou impulso. Caio, Luna, Davi e Sara acreditavam que o aumento da massa diminuiria o período do pêndulo, enquanto Maya esperava que aumente. Esses cinco participantes levaram em conta apenas a massa total por si mesma, sem considerações de como esta se distribui espacialmente ou como produz efeitos por meio de alguma relação com outra variável que não a própria massa ou peso, é categorizada no Quadro 3 como "Massa total". Essa categoria de conceito-em-ação ocorre em ambos ensaios e em quase todas as situações.

> "*Ah, porque ele vai ficar mais pesado. Então ele vai...* [gesticula imitando a oscilação]*... mais rápido. Tem mais peso levando pra frente e voltando*" (Caio); "*Tipo, quando você vai pular de um prédio, se você é mais pesado, você chega primeiro*". (Luna); "*Eu vou na intuição. Eu não sei explicar*" (Davi); "*Assim, acho que se está mais leve, acho que ele vai mais rápido.* Por que você acha isso? *Não sei*". (Sara).

Essas categorias, bem como as demais categorias encontradas nas outras duas situações envolvidas no ensaio sobre o pêndulo simples, podem ser visualizadas no Quadro 3. Adicionalmente, o quadro indica a natureza das justificativas apresentadas em cada caso. O termo "intraobjetal" é usado aqui em referência a explicações que

recorrem a uma propriedade do objeto em si (PIAGET; GARCIA, 2011). Nesse caso, geralmente é a propriedade de ser pesado ou de ser leve, sem consideração de relações entre ele e demais objetos, de seu contexto ou de sua estrutura interna.

Quadro 3. Conceitos-em-ação para a distribuição da massa nas situações relativas ao movimento do pêndulo simples.

	Situação	Conceito-em-ação	Justificativas	Sujeitos
Primeiro Ensaio - pêndulo simples	Determinação dependência do período com a massa	Produtora de força	Relação entre força e massa	João, Alex, Eric, Theo, Ivan
		Massa total	Intraobjetal/ Analogia/ Não sabe	Caio, Luna, Davi, Maya, Sara
	Determinação dos efeitos da mudança de posição do peso	Distribuição discreta	Reversibili-dade	Todos
	Determinação dos efeitos da substituição da corda	Massa total	Teoremas-em-ação anteriores, intraobjetal	João, Luna, Ivan, Maya, Theo, Alex, Eric, Sara
		Distribuição discreta	Analogia	Caio
		Centro de massa	Equivalência	Davi

Quando se começou a discutir as questões sobre a distribuição da massa, os sujeitos manipularam a reversibilidade de forma confiante e espontânea no problema da mudança de posição do peso (segunda situação do quadro 3), quando todos reconheceram a elevação deste até metade do comprimento do fio como equivalente ao encurtamento do fio. Ao propor-se a questão "E se nós amarrásemos o peso no meio do fio, isso mudaria o tempo de ir e voltar?" obtivemos proposições como as seguintes:

> "*Porque agora a tração é aqui [aponta no meio do fio]. Então vai aumentar a velocidade. Aumentando a velocidade, diminui o tempo. O fio que sobrar não vai mudar muita coisa.* " (Caio); "*... é como se a corda que estivesse abaixo do peso não servisse para nada.* " (João); "*Se colocar aqui, não vai ser a mesma coisa que, tipo... puxar ele pra*

> *cima?*" (Luna); "*Outro tempo, porque seria a mesma coisa que você diminuir o fio!"* (Theo).

Parecia existir em alguns casos também uma forma simples de aproximação ao desconsiderarem o fio restante abaixo do peso, como na fala de Caio: "*O fio que sobrar não vai mudar muita coisa*" (Caio).

Nesses casos, assim como será visto em outros nas próximas situações, os participantes oferecem explicações que levam em consideração a distribuição discreta de massa ou peso entre diferentes lados diferentes ou partes diferentes do corpo em questão, ou ainda, consideram que forças atuam de forma diferente nos diferentes lados ou partes do corpo em questão. Por isso, essa categoria é denominada "Distribuição discreta".

Enquanto esse reconhecimento foi unânime e bastante imediato, a situação mais complicada da substituição do fio por uma corda mais grossa e massiva (terceira situação do Quadro 3) revelou que o objeto-modelo centro de massa não é um conceito-em-ação mobilizado pela maioria dos sujeitos nessa situação. Isso ficou claro, por exemplo, nas afirmações de Luna, João, Alex e Ivan: tendo eliminado experimentalmente a dependência do período com a massa, eles empregaram esse teorema-em-ação construído na ação experimental e, traduzindo o problema apresentado como um aumento de massa, inferiram que essa substituição deverá igualmente manter o período inalterado.

> " *Eu achava que tipo... o peso ia fazer diferença, mas não faz. Então eu acho que seria igual.* " (Luna);
> "*Eu acho que não, porque, pelo que eu testei, a massa do peso não modifica o período. Mesmo aumentando a massa do conjunto inteiro, acabaria sendo igual.* " (Alex).
> "*Não ia influenciar não.* Por que? *Porque eu vi que... pelo que testei do peso,a diferença é muito pouca, então... Tipo [sorrindo], eu ainda estou na dúvida se o peso influencia ou não, entendeu? Mas eu acho que não, porque quando eu tirei os pesos ele manteve mais ou menos o tempo igual.* " (João).
> "*Se você botasse um objeto maior, mas com a mesma massa desse aqui* [aponta o suporte com discos]*, não iria modificar o movimento*" (Ivan).

Esses participantes demonstraram assim tomarem como conceito-em-ação a massa do pêndulo como um todo, não considerando-a como algo que pode ser distribuído no espaço de modo a produzir diferentes efeitos, retornando à noção intraobjetal que caracteriza a categoria "Massa total". Apesar disso, quando mais adiante Luna foi perguntada diretamente sobre o que é o centro de massa, ela o conceituou como um "meio-termo de tudo, onde a força está dividida" e afirmou que se trata de um ponto localizado no meio da caixa, o que reforça a dependência dos conceitos-em-ação com a particular situação sendo enfrentada pelo sujeito.

Ainda no caso da situação referente à substituição da corda, a tendência descrita acima também foi observada entre aqueles participantes de não excluíram a dependência do período com a massa: Maya havia concluído que o aumento da massa provocaria um aumento do período, ao contrário da conclusão de Theo. Ambos deram respostas consistentes com essas teoremas-em-ação, isto é, para ela a substituição da corda aumentaria o período, enquanto para ele, diminuiria: "*A velocidade iria diminuir. [...] porque aí é mais peso pra se balançar."* (Maya); "*Porque ia ser a mesma coisa que se eu botasse mais peso aqui* [no suporte com discos]. *Só que ia ser pro fio todo*" (Theo).

Caio parecia estar em um meio-termo: ele considerou, de certa forma, que a maneira como a massa se distribui é relevante - ao afirmar que o fio deve ser leve e o objeto na extremidade deve ser pesado - mas não chegou a identificar na corda pesada uma equivalência com a redução do comprimento:

> *Ah, o tempo ia aumentar muito. Porque o que faz ele ir mais rápido, esse peso aqui* [o suporte com discos], *é esse peso. Quanto maior esse peso, e menor a massa do fio, mais rápido ele vai. Então ele consegue fazer esse movimento melhor* [gesticulando imitando o movimento do pêndulo]. *Agora, se você botar um cordão, com esse pesinho aqui, a diferença de peso deles vai ficar muito menor. Aí ele não vai conseguir fazer isso aqui* [movimento de oscilação do pêndulo] Por que? *Porque o peso... tá aqui* [segurando o suporte com discos. *Tem que ser maior isso aqui* [suporte com discos], *menor isso aqui* [fio], *mais rápido ele vai*". (Caio).

Ele parecia assim trabalhar com uma distribuição discreta da massa - uma parte no fio e outra parte no pesinho -, pelo que categorizamos sua resposta como "Distribuição discreta".

O único entrevistado a empregar o objeto-modelo centro de massa como um conceito-em-ação à situação da substituição da corda foi Davi. Além disso, Davi também empregou a reversibilidade ao reconhecer que esse procedimento seria equivalente a produzir uma diminuição no comprimento do fio e ainda justificou que a diminuição do fio produzia uma redução do período, pelando aos testes anteriores:

> *... acho que o centro de massa por exemplo se alteraria. Seria meio equivalente como se pegasse todo esse peso e colocasse alterando a altura dele. Como a gente já viu, se alterar aqui* [movimento o suporte com discos verticalmente, mostrando diferentes alturas de pêndulo]*, altera o período dele* " (Davi).

Explicações que consideram que a mudança da distribuição espacial **contínua** de massa no sistema altera a posição do centro de massa, empregando a noção de centro de massa, foram categorizadas como "Centro de massa" na análise dos conceitos-em-ação para o objeto-modelo centro de massa. Nesse primeiro ensaio, apenas Davi teve sua resposta incluída nessa categoria.

5.1.3 O isocronismo

Caio afirmou que o pêndulo abandonado por algum tempo, sob ação da resistência do ar, teria seu período aumentado com o passar do tempo, porque a velocidade seria reduzida por efeito da resistência do ar: "E sem vento, mas com ar parado. Esse ar vai mudar o tempo de ida e volta? *O tempo dele aumenta. Porque é uma resistência... não importa, se opõe.* " (Caio). Embora ele considerasse que a amplitude iria diminuir, ele não utilizou a diminuição da amplitude para formular um raciocínio de compensação neste caso, apesar de tê-lo feito na tarefa da tabela. Mais do que isso, ele parecia aqui contradizer sua expectativa da relação entre amplitude e tempo, pois anteriormente havia afirmado que, quando a amplitude inicial fosse menor, esperaria um

período menor também. Nesse ponto, Caio parecia implicitamente não admitir que o comportamento do pêndulo quando deixado oscilando "espontaneamente" obedecesse às mesmas regras que no momento em que era posto para oscilar. Isso indica que o teorema-em-ação da compensação é fortemente dependente do contexto em que o problema é colocado. O teorema-em-ação que parecia ter sido utilizado por Caio nesse momento era: o tempo gasto é inversamente proporcional à velocidade do móvel, que seria aplicável para o caso em que a distância percorrida se mantivesse constante. Como reconheceu que a distância percorrida, nessa situação, não se manteve constante, o que parece ter ocorrido foi a desconsideração dessa condição para a aplicabilidade daquele teorema-em-ação.

O teorema-em-ação usado por Caio também foi manifestado por Theo: "*Tem resistências, tem... vai tirando um pouco da aceleração que está ali. Então, acho que não. [...]* O que essa resistência vai fazer? *Diminuir a velocidade do pêndulo, fazendo com que demore mais um pouco até chegar"* (Theo). Theo experimentou com o pêndulo confirmando o teorema-em-ação de que o período aumenta com o passar do tempo.

Logo no início da entrevista, João afirmou que a amplitude decrescia por causa da perda de energia, mas ficou em dúvida sobre o que ocorreria com o período: "*talvez ele leve o mesmo tempo porque ele vai diminuin... ou talvez ele leve menos tempo... [pausa] porque ele pára, a distância que ele chega do outro lado também é menor.*" Mais adiante, após a finalização da tarefa de preenchimento da tabela, foi perguntado a respeito do que ocorre com o período com o passar do tempo e afirmou inicialmente que ele não se manteria constante, "*...porque tipo.. ele começa a não conseguir chegar mais no ponto. Da primeira vez que eu solto, ele chega até o mesmo ponto, mas se eu deixar ele assim, daqui a pouco ele não chega mais até esse ponto.*". Por sua própria iniciativa, realizou medições do tempo de várias oscilações com amplitude inicial grande e pequena, e concluiu pelo isocronismo com base na compensação:

> *... eu acho que varia a velocidade, não o tempo. Tipo, ele ganha velocidade, mas o espaço que estou percorrendo também é maior, então acho que segue uma proporção. Aqui* [pequena amplitude] *a velocidade é menor, mas o espaço que ele percorre também é menor. Aqui* [grande amplitude] *A velocidade é maior, mas o espaço que ele percorre também é maior* (João).

Luna foi a única que utilizou a independência do período com a amplitude, que ela obteve experimentalmente, para concluir que o pêndulo é isocrônico: "*Eu acho que é o mesmo tempo! Porque eu fiz isso, não fiz? Eu fui puxando de vários lugares diferentes e deu o mesmo tempo!*". Nesse momento, buscando formular uma explicação para isso, ela empregou o raciocínio de compensação: "*Eu acho que a velocidade e o quanto ele vai ter andar meio que compensa um ao outro e aí fica igual*" (Luna).

Assim como João e Luna, Alex também utilizou a compensação empregada na independência do período para concluir pelo isocronismo do pêndulo: "*Porque conforme ele é jogado de uma altura* [...] *ele acaba ganhando a mesma velocidade e apesar de a trajetória dele ser menor, a velocidade também é menor.* " (Alex).

De forma consistente com o seu teorema-em-ação de que o período é dependendente da amplitude, Davi afirmou que o período do pêndulo iria reduzir-se à medida que o tempo passava, já que o atrito tornaria a amplitude cada vez menor. A mesma conclusão foi obtida por Eric, que igualmente considerou de início que a redução da amplitude acarretaria diminuição do período, e também por Maya, que afirmou que a distância iria diminuir, então o tempo ficaria menor. Essa posição pode ser resumida na frase de Ivan: "... *vai reduzir a amplitude, vai reduzindo o tempo que ele vai e volta. Aí vai chegar um tempo que vai ficar assim* [faz pequeníssimas oscilações com o pêndulo]".

Nessa questão, Sara respondeu imediatamente que esperava que o período do pêndulo se mantivesse constante com o passar do tempo. Mas, ao se indagar suas motivações, Sara respondeu apenas: "[Breve pausa enquanto observa o pêndulo oscilando] *Não sei, acho que, se a gente marca o tempo com ele, ele deve seguir um tempo*" (Sara).

5.1.4 Relação teórico-empírico

As relações estabelecidas no momento de realização da tarefa referente ao pêndulo simples induzem à elaboração de alguma forma de modelo teórico superficial sobre o comportamento desse objeto. Ao se questionar a possibilidade de obter a caracterização pedida na tabela, isto é, a definição das caraterísticas que o pêndulo deve obedecer para que sejam obtidos determinados valores de período, sem realizar experimentação, a maioria dos sujeitos imediatamente respondeu afirmativamente, alguns acrescentando que seria preciso ter a "fórmula".

> "*Sem experimentação? Acho difícil [...] Mas eu acredito que a primeira pessoa que chegou nesta fórmula foi com experimentação. Não acho que veio de outra fórmula.* Mas você acha que isso é possível? *Acho que é*" (Eric); "*Eu acho que sim... acho que sim.*" (Maya); "*Deve ter, eu só não sei. Deve ter alguma fórmula para fazer. Só que eu não sei. Eu acho que eu já estudei, já... mas... esqueci.* (Theo); "*Acho que se souber o comprimento, o peso... Acho que ele consegue prever, sim. [...] Não sei, acho que... fazer uma comparação com as forças, que é do peso... e... sei lá, acho que é um movimento retilíneo, ou um movimento uniforme, sei lá... aí ele pode jogar em uma dessas fórmulas.* " (Sara); "*Teria sim, como fazer.* " (Davi); *"Acho que sim, usando matemática."* (João); "*Acho que sim, mas você nunca vai saber se está realmente certo sem tentar, né?* " (Luna); "*Talvez pela fórmula de força centrípeta*" (Alex); "*Ah, se eu já tivesse uma formulinha pra isso... [em tom afirmativo, sorrindo].*" (Caio).

Mesmo entre aqueles que não utilizaram essa expressão, é possível notar que relacionaram essa questão com a necessidade de ter-se uma equação relacionando as variáveis do sistema. E como a "fórmula" poderia ser obtida?

> "*Experimento. Por exemplo, eu vi aqui que o peso influencia na velocidade. Então eu faria, sei lá, p, v, igual a não sei o quê... [...] Você pega as variáveis, o que é muda nele, veria... joga um pra um lado, outro pro outro..."* (Caio); "*Talvez pela fórmula de força centrípeta... você poderia descobrir a força e usaria pra descobrir a velocidade. Sabendo o comprimento dele, vai.. do pêndulo [...] você precisa ter o comprimento do fio, que é basicamente o raio da trajetória máxima que ele pode percorrer... E, é... a altura que ele está do chão... e... acho que só*" (Alex); " *... eu tenho um conhecimento, se eu tiver as dimensões, por exemplo a massa disso aqui, considerando o atrito, se me desse todos os dados, eu conseguiria fazer os cálculos normalmente, se me desse a gravidade, essas coisas [...] Eu já sei, eu já tenho umas ideias de comportamento equacionadas. Eu aplicaria nessas equações."* (Davi); "*Sim, com certeza, mas eu não sei a fórmula. Com certeza tem uma fórmula para isso. [...]um jeito pode ser experimentação, por exemplo, você coloca com trinta graus e sessenta graus, e você vê a variação do tempo."* (Eric). "*Os caras foram... devem ter feito o experimento num lugar com vácuo, com o fio sem... não sei se é possível. E foram tentar...*

> *medir o tempo, não sei.*" (Theo) "*Acho que ele teria que observar o comportamento do pêndulo [...] Acho que ele pode ter auxílios, né, de Matemática... mas acho que ele pode fazer observando.*" (Sara)

Mas será que existiria algum modo de chegar a esta "fórmula" sem fazer o experimento?

> "*Acho que não. Porque como você ia saber que o fio... por exemplo, a altura. Você diminuindo a altura, dependendo da trajetória, se ia aumentar ou diminuir a velocidade. Como você vai saber se... tipo, da altura não dá pra saber... sem o experimento, se ela influencia ou não* (Caio)."
> "*De outras fórmulas antigas, que já foram descobertas. Que, no caso* [sorrindo] *também é a partir do experimento. Basicamente... sem experimento, eu acho que não tem como*" (Alex)
> "*Acho que pra você equacionar alguma coisa, você teria que analisar vários dados, várias possibilidades, várias situações, aí teria que fazer o experimento, sim*" (Davi)
> "*Acho que talvez sim. Talvez... é* [...] *Eu acho que as forças que estão agindo sobre o peso e a força do nosso impulso.* [pausa] *não sei* [...] *Nisso que eu estou pensando... Eu acho que talvez não*" (Maya)

Entre aqueles que responderam positivamente, foi freqüente o apelo à Matemática:

> "*Sim*. [...] *Tudo gira em torno da Matemática na Física*. [Pausa] *A Matemática em si só não tem função nenhuma. Mas eu acho que é mais uma ferramenta para você tentar demonstrar os fenômenos que você vê, as leis, tipo... tentar colocar uma lei de como as coisas funcionam* (João).
> "*Acho que sim, se você lembrasse da matéria... se eu soubesse a matéria, eu iria melhor*." (Luna).
> "*Acho difícil alguém chegar a uma fórmula dessa sem experimentação. Ou talvez envolva outro campo. Talvez força centrípeta.*" (Eric)
> "*Até tem. Matemática vive fazendo uns cálculos assim, sem fazer o experimento antes* [...] *Talvez o tamanho do fio, o peso do objeto, resistência, aceleração da gravidade...* E se soubesse essas coisas, o que teria que fazer com elas? *Espere aí, deixa eu ver...* [breve pausa] *multiplicar o peso pela gravidade... diminuir a aceleração, aí entra a resistência... e esqueci como faz pra a relação com o tempo.*" (Theo).
> "*Acho que... é, se ele pensar... se ele não tiver e ele pensar em alguma coisa assim* [gesticula imitando o movimento do pêndulo] *que tiver determinado peso, determinado comprimento, ele consegue*" (Sara).

Ivan chegou a ensaiar uma matematização do problema do pêndulo:

> *Talvez, se você fosse pensar num campo mais de geometria, vetor, essas coisas. Porque, assim, se você pensar geometricamente, quando ele tá aqui e eu puxar* [afasta o suporte com discos da posição de equilíbrio], *ele tem um triângulo. Esqueci o nome... um triângulo retângulo. Então, se você conseguisse inventar uma jogada de pensar, isso aqui tá pro outro lado, e é a mesma distância, aí você sabendo a gravidade e tal, o peso, a massa do objeto, você talvez consiga ali, fazendo, como eu gosto de dizer, as 'macumbas' da física, você conseguiria chegar ali.* (Ivan).

Além disso, Ivan também acrescentou que seria possível obter essa relação sem necessariamente fazer experimento, mas utilizando matemática e "fórmulazinhas", e citou como exemplo a equação de Torricelli: "*Geometria. Matemática... fórmulazinha básica de movimento, essas coisas assim. [...] Tipo.. sei lá, Torricelli... essas fórmulas mais, de movimento mesmo*" (Ivan). Inquirindo-se sobre como tais "formulazinhas" poderiam ser obtidas, manteve sua posição de que isso poderia ser feito sem experimento, usando-se Matemática: "*Eu acho que a maioria delas nem foi experimentalmente, foi por... foi... tipo, o cara viu alguma coisa dessa acontecer. Aí foi tipo, por que isso acontece, aí tenta passar pro papel. Aí se for o caso, ele passa já pra Matemática, ao invés de tentar várias vezes. Mas durante essa Matemática, ele provavelmente tentou várias vezes a mesma coisa* " (Ivan).

Sob maior insistência para que identificassem algo da Física que poderia ser necessário à resolução do problema sem apelo ao experimento, continuou sendo inexistente a menção a teorias gerais. Essa ausência se manteve mesmo quando os sujeitos citavam conceitos teóricos. Por exemplo, João afirmou que seriam necessários "conhecimentos" e "conceitos", acrescentando que há inobserváveis:

> *Você sabe que tem tração no fio, a altura do negócio, isso entra. Que existem forças externas atuando sobre isso... então, eu acho que você ter esse conhecimento da Física, os conceitos físicos, eu acho que isso faz muita diferença. Você sabe que tem uma corda e um peso balançando ali, mas por que é que eles balançam? O que está atuando sobre eles? Até porque é importante porque a gente não vê.* (João).

Com insistência adicional para exemplificar elementos teóricos da Física que seriam necessários, citou conceitos como gravidade, tração e "força potencial", mas nenhuma teoria geral. De maneira semelhante, Luna indicou que seria necessário ter

estudado "*aceleração, gravidade, atrito... o que mais... não lembro de outras coisas.. velocidade, peso, massa"* (Luna); Eric afirmou que pode haver uma forma, utilizando-se "força centrípeta"; Maya falou que é necessário conhecer forças, massa e aceleração inicial.

5.2 SEGUNDO ENSAIO: CAIXINHA NO PLANO INCLINADO[15]

5.2.1 Centro de Massa

Nesse ensaio, assim como nos demais, os termos "centro de massa" ou centro de gravidade" não foram citados pela entrevistadora antes de serem mencionados espontaneamente pelo entrevistado, o que ocorreu nos casos de Alex, Davi, Eric, João, Luna e Theo. Mesmo nesses casos, os significados atribuídos ao termo foram múltiplos e diferentes entre os sujeitos, ainda que apresentassem algumas convergências.

O papel da distribuição da massa foi suscitado durante diversos momentos desse segundo ensaio. Além de aparecer nas explicações dos sujeitos sobre a previsão da ordem de tombamento, também emergiu quando se discutiu a condição para o tombamento da caixinha e, ainda, no momento em que se questionou sobre a comparação entre as alturas de queda da caixinha cheia e da caixinha vazia. Assim, apresentamos a análise desse ensaio dividida nessas três situações.

Nesse segundo ensaio foi possível perceber novamente a ocorrência de respostas que se enquadram nas categorias "Massa total" e "Distribuição discreta", no mesmo sentido descrito na análise do ensaio anterior. Essas duas categorias aparecem em todos os três ensaios. Não ocorreram respostas que pudessem ser enquadradas nas demais categorias do ensaio anterior. Por outro lado, foi possível identificar a necessidade de incluir uma nova categoria, que permitisse representar os esquemas que manifestavam explicações enfatizando algum ponto específico do sistema formado pelo plano inclinado e pela caixinha de fósforos, preenchida ou não. Essa nova categoria foi denominada "Ponto de equilíbrio ou ponto de apoio", e sua descrição detalhada, junto com exemplares de respostas, é explicitada a seguir. Como já foi explicado na seção de análise de resultados, essa categoria inicialmente estava dividida em duas "ponto de equilíbrio" e "ponto de apoio", mas essa divisão mostrou-se algo ambígua, e optou-se por destacar o que havia de comum nas duas - ou seja, a demonstração de que o sujeito

15 Uma versão preliminar desse estudo foi apresentada no *X Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias*, realizado em Sevilla (Espanha) em 2017 e publicada em número especial da revista *Enseñanza de las Ciencias* (MACHADO; BRAGA, 2017).

imagina algum ponto do sistema o qual utiliza como conceito-em-ação - para caracterizar essa categoria final.

O Quadro 4, apresentado a seguir, sintetiza as categorias encontradas em cada uma das três situações referentes a esse ensaio. Nas linhas que seguem, discutimos a análise que levou a essa categorização, bem como apresentamos algumas falas dos participantes que exemplificam essas categorias.

Quadro 4. Conceitos-em-ação para a distribuição da massa na situação da determinação das condições de equilíbrio de uma caixinha em um plano inclinado.

	Situação	Conceito-em-ação	Justificativa	Participantes
Segundo Ensaio - Equilíbrio no plano inclinado	Previsão da ordem de tombamento	Massa total	Intraobjetal Analogia	Sara, Luna, Caio
		Distribuição discreta	Reversibilidade, intraobjetal	Eric, Maya, Theo, João, Ivan
		Ponto de equilíbrio ou ponto de apoio	Posições relativas entre pontos/forças	Alex, Davi
	Determinação da condição de tombamento	Massa total	Intraobjetal	Luna, Maya, Alex, Eric
		Distribuição discreta	Relações entre forças	Sara, João, Caio
		Ponto de equilíbrio ou ponto de apoio	Posições relativas entre pontos e/ou forças	Ivan, Theo, Davi
	Comparação entre caixinhas cheia e vazia	Massa total	Intraobjetal, compensação	Sara, Caio, Davi, Maya, Luna
		Distribuição discreta	Compensação, reversibilidade	Alex, Eric, Ivan, João
		Ponto de equilíbrio ou ponto de apoio	Equivalência	Theo

Situação 1: Previsão da ordem de tombamento

Após a apresentação das quatro possibilidades mostradas na Figura 9, os participantes foram solicitados a prever a ordem das alturas de tombamento, medidas na régua colocada em posição vertical, com o zero da escala no contato da régua com a bancada. Portanto, quanto maior a altura de tombamento, maior seria o ângulo de inclinação do plano no momento em que o participante imaginava que a caixinha fosse tombar.

No momento de previsão da ordem de tombamento, cinco participantes imaginaram que a caixinha cairia a uma altura menor caso estivesse parcialmente cheia, com os bloquinhos posicionados no lado inferior (Alex, Davi, Eric, Maya e Théo). João, Ivan e Sara apostaram que a altura mais baixa para tombamento seria obtida com a caixinha vazia. Apenas dois participantes (Caio e Luna) esperavam que a caixinha fosse tombar a uma altura menor quando a massa estivesse concentrada na parte superior.

A Tabela 3, apresentada a seguir, expõe as previsões dos sujeitos. Os números referem-se às posições representadas na Figura 9. Os números marcados com um asterisco representam previsões de tombamento na mesma altura para configurações diferentes. Logo após enunciarem suas previsões, os participantes foram questionados sobre suas justificativas, ocasião que suscitou a manifestação de seus conceitos-em-ação.

Tabela 3. Previsões de ordem das alturas de tombamento.

Participante	**Primeira**	**Segunda**	**Terceira**	**Última**
Alex	1	4	2*	3*
Luna	4	3	2	1
João	2*	3*	4	1
Davi	1	2	3	4
Eric	1	2*	3*	4
Ivan	2*	3*	4	1
Maya	1	4	2	3

Caio	4	3	2	1
Théo	1	2	3	4
Sara	2	4	1	3

Com relação às justificativas apresentadas, alguns dos participantes consideraram a propriedade intraobjetal da caixinha em ser mais leve ou pesada em cada caso como determinante para a ordem do tombamento. Por exemplo, Sara afirmou simplesmente que a caixinha vazia tombará primeiro "*porque ela é mais leve*". O teorema-em-ação empregado por Sara foi o de que o tombamento ocorreria mais facilmente quanto mais leve for a caixinha; esse teorema-em-ação foi usado de forma consistente por Sara ao prever que a caixinha toda cheia será a última a tombar, *"... porque ele vai estar mais pesado."* E por que estar mais pesado faz demorar mais a tombar? "*Porque eu acho que ele vai ficar mais preso aqui no alfinete* [quando a caixinha está totalmente cheia] [...] *eu acho que ela ia ficar mais presinha aqui*". O peso teria, assim, um papel de prender a caixinha no lugar e por isso é que dificultaria o tombamento. Além disso, notava-se que Sara desenvolveu seu raciocínio considerando apenas o peso da caixinha como um todo, sem que alguma consideração sobre a distribuição aparecesse como conceito-em-ação nessa situação, configurando a categoria "massa total" no Quadro 4, apresentado na seção a seguir. De forma similar, para Luna, "*Eu acho que como ele estava mais pesado desse lado* [longe do alfinete]*, **ele ficou mais presinho na régua***".

Em um segunda categoria de pensamento adotada com relação à distribuição da massa na caixa, os participantes imaginaram a "distribuição discreta" dessa massa ao longo do espaço contido na caixinha, mas sem imaginar pontos representativos do sistema. Nessa segunda categoria também não ocorreram comparações entre pontos da caixinha e o ponto de apoio, mas apenas considerava-se que um de seus lados é o que seria responsável pelo movimento de tombamento. Por exemplo, Maya justificou sua aposta explicando que "... o *peso já está desse lado* [aponta o lado da caixinha mais próximo do alfinete]*, quando a gente levantar meio que só vai fazer com que...*

[gesticula imitando o movimento de tombamento da caixinha] *virar.*"; para Eric, "*como esse é o lado que tem mais massa, esse é o lado que quer cair mais*".

Por fim, pode ser identificado um terceiro grupo, cujos participantes justificaram suas expectativas apresentando algum esquema que tivesse, como conceito-em-ação, algum **ponto** da caixa, seja ele o ponto de apoio ou um hipotético "ponto de equilíbrio". De forma geral, essa categoria reflete a existência de explicações em que os sujeitos imaginam algum ponto do objeto como sendo o ponto que determina se o objeto permanece ou não em equilíbrio em alguma condição, ou explicações em que consideram a condição de equilíbrio do corpo como determinada por uma relação entre o ponto de apoio e a distribuição de massa do corpo. Nomeamos essa categoria como "ponto de equilíbrio ou ponto de apoio" no Quadro 4.

Especificamente nessa situação, apenas Alex e Davi apresentaram respostas nesta categoria. Surpreendentemente, Alex, antes de experimentar com a caixinha vazia, previu que esta deveria cair apenas quando o plano estivesse a noventa graus com a superfície da banca, "*... porque enquanto você tivesse uma inclinação menor do que noventa graus, a caixinha ainda teria o alfinete como apoio.*" Durante a atividade, ao verificar que tal não ocorre, Alex parecia desenvolver uma noção de distribuição da massa que não estava presente naquela afirmação. Embora não falasse em um "centro", afirmou que *"... isso aqui* [apontando para o ponto da caixinha em contato com o alfinete] *é como se fosse um eixo também, que segurasse a caixa enquanto ela faz essa trajetória* [de tombamento]. *E como o alfinete pega só um pedaço da caixa, e eles* [os bloquinhos] *estão distribuídos nessa reta, fica um pouco mais de peso para fora do alfinete do que no alfinete"* (Alex).

A formulação de Davi foi semelhante à de Alex, mas este já mencionou o centro de massa e o ponto de apoio: "*A partir do momento em que ele virar esse carrinho, se o centro de massa ele estiver... um pouquinho aqui do apoio, um pouquinho adiante do apoio, ele não cai. Mas se ele passar, aí ele cai, entendeu?*". Contudo, essa formulação não parece ter sido desenvolvida na situação, mas um teorema-em-ação adquirido anteriormente, pois Davi mencionou outra situação que teria estudado (o equilíbrio de

um carrinho) e cuja semelhança com a situação proposta reconheceu de imediato, ou seja, reconheceu-a como pertencente à mesma classe de situações.

Situação 2: Condição de tombamento

A respeito da condição de tombamento, as explicações produzidas pelos participantes também dividiram-se em um espectro de explicações de caráter mais intraobjetal, isto é, com tendência a considerar propriedades inerentes aos objetos, e outras de caráter mais relacional ou interobjetal, ou seja, buscando relacionar posições ou orientações de forças com a condição de tombamento. No primeiro caso, destacaram-se algumas afirmações como "a caixinha quer tombar", "a caixinha não aguenta mais" ou ela "não vai querer ficar inclinada", tipificando a categoria "massa total".

> *" ... eu acho que ele chegou no ângulo máximo que ele aguentava. Do centro de gravidade. Aí ele virou* [faz a caixinha tombar algumas vezes, sorrindo]. [...] *Eu acho... acho que chega uma hora em que* ***ela não aguenta mais ficar tipo retinha****".* (Luna)
> "*Porque se existe alguma inclinação, mesmo que seja pequena, esse peso,* ***ele não vai querer ficar inclinado****"* (Eric).
> "[o peso dentro da caixinha] *fica solto,* ***querendo tombar****"* (Alex).

Em outras falas, foi possível identificar alguma forma de consideração do fato de que existe uma distribuição do peso no interior da caixinha e que essa propriedade estaria ligada à condição de tombamento. Nessas explicações que enfatizavam comparações entre lados da caixinha ou direções das forças, foi possível identificar teoremas-em-ação um pouco mais estruturados, ainda que não apresentassem exatamente uma condição do tipo "se... então". Por se pautarem sobre comparação entre lados ou partes da caixinha ou direções de forças, essas explicações giravam em torno de uma noção de distribuição da massa que não era mais apenas da massa total, e que categorizamos no Quadro 4 como "distribuição discreta":

> "***Acho que é porque um lado fica mais pesado do que o outro***. Então o peso dela muda quando eu mexo na régua? *O peso dela não, mas acho que... o peso dentro da caixa"* (Sara).

> *"Eu acho que é tipo a forma com que a força atua no corpo da caixa. Depende da gravidade. Acho que conforme você vai subindo, a gravidade vai atuando de forma diferente. Por exemplo... faz a divisão das forças entre o cosseno e o seno"* (João).
> "[as forças] *começam assim, o peso e a normal se anulando* [gesticula mostrando que essas forças tem a mesma direção e sentidos opostos], *aí quando ela vai fazendo isso aqui* [gesticula mostrando a mudança de direção da força normal à medida que a régua é inclinada], *aí... aí a tendência é de a caixinha cair* " (Caio).

Foi possível notar, nessas falas, uma mescla de considerações interobjetais (o tombamento da caixinha depende de uma relação entre forças que agem sobre ela) com outras de orientação intraobjetal. A rigor, essa divisão não se referia necessariamente aos sujeitos, mas sim às explicações: o mesmo sujeito poderia apresentar respostas que se aproximariam de ambas as tendências. Foi o que se observou, por exemplo, na afirmação de Caio citada acima. Embora iniciasse descrevendo uma mudança de direção de uma força que atua sobre a caixinha, ao concluir invocou certa tendência do objeto.

Uma terceira tendência ocorreu em explicações que deram origem aos teoremas-em-ação mais estruturados em termos de estabelecerem uma condição do tipo "se... então". Por exemplo, Davi, nessa situação, distinguiu com clareza o centro de massa, ponto de apoio e a relação entre ambos para que se desse o tombamento da caixinha. O que percebeu-se nesses casos foi uma tendência a desenvolver um esquema que tivesse como conceito-em-ação algum ponto do corpo, por vezes chamado explicitamente de centro de massa ou de centro de gravidade. Essa tendência é que foi o critério para relacionar essas explicações com a categoria "ponto de equilíbrio ou ponto de apoio" no Quadro 4.

> *O centro de massa dele é, sei lá, aqui, mais ou menos* [aponta aproximadamente o centro do carrinho desenhado]. *A partir do momento em que ele virar esse carrinho, se o centro de massa ele estiver... um pouquinho aqui do apoio, um pouquinho adiante do apoio, ele não cai. Mas se ele passar, aí ele cai, entendeu?* (Davi).

Ficou bastante claro nessa fala que não se tratava de um teorema-em-ação espontâneo nem desencadeado (construído durante a entrevista), mas fruto de um processo de ensino, no qual Davi reconheceu essa situação como equivalente àquela

ensinada (carrinho de golfe) e transferiu, portanto, o esquema lá aprendido para a situação apresentada naquele momento. Em outras palavras, Davi reconheceu ambas como pertencendo à mesma classe de situações. Com isso, Davi utilizou o centro de massa e o ponto de apoio como conceitos-em-ação no teorema-em-ação: quando o centro de massa do objeto passasse a se localizar mais adiante do ponto de apoio, o objeto tombaria.

De forma semelhante, para Ivan:

> *Como vai se aproximando, e como esse peso está do lado oposto ao alfinete, a força da gravidade é maior desse lado [onde estão os bloquinhos], então é* ***mais longe*** [ênfase]. *Então você tem que tipo assim, como está se modificando o seno, a força que está na direção da rampa vai se aproximando desse eixo* [vertical]. *E, por consequência, ela vai ficando maior.* [...] *Porque é aquele negócio de você conseguir espelhar um vetor num eixo. Então quanto mais você conseguir aproximar esse vetor desse eixo* [vertical], *maior vai ser o espelhamento dele aqui, desse lado. Porque é o seno, que quando vai aumentando, vai se aproximando. Então no momento em que eles ficarem paralelos, essa força é igual à essa* [a força ao longo da rampa é igual à força vertical para baixo]. *E como a força é aqui, mais para cá* [onde estão os bloquinhos], *fica mais longe... demora mais pra esse espelhamento chegar num momento em que passa. Mas quando ele está do outro lado* [bloquinhos próximos ao alfinete], *o lado contrário, ela... demora menos.* [Faz a experiência com os bloquinhos próximos ao alfinete, para demonstrar] (Ivan).

Essa fala de Ivan, assim como a de Davi, revelou uma influência clara do ensino escolar de Física, com o tradicional problema da decomposição das forças ("*espelhar um vetor num eixo*") que atuam sobre um corpo em um plano inclinado. Ivan relacionou corretamente a componente da força peso ao longo do plano inclinado com o seno do ângulo de inclinação do plano, além de reconhecer que o aumento da inclinação do plano acarreta um aumento na intensidade dessa componente, numa interessante demonstração de habilidade em usar seu conhecimento matemático para estruturar seu pensamento físico. Embora não tenha explicitado a palavra "ponto" ou "centro", ao mencionar que uma força "passa" ou "está mais longe", Ivan faz referência a um ponto do objeto.

Situação 3 - Comparação entre as caixinhas cheia e vazia

Nessa situação, também foi possível identificar respostas de caráter intraobjetal, em que a definição de qual caixinha cairia primeiro repousa sobre a característica inerente da própria caixinha, como um todo, ser mais leve ou mais pesada.

> "*... quanto mais pesadinha ela for, mas ela vai ficar... eu acho que mais ela aguenta* [...] *Ela fica mais presinha aqui* [na régua]" (Luna); "*Não, porque a minha explicação era que... com o peso, a caixinha preenchida com o peso, né, o peso fazia com que ela ficasse parada por mais tempo, aguentasse um pouco mais do que a caixinha vazia"* (Maya); "*"Vai aumentar o peso... quanto maior massa, maior o peso, aí mais tendência pra ir pra baixo ele tem"* (Caio).

O que se pôde notar em comum nas falas de Caio, Luna e Maya, especificamente nessa situação comparativa, foi que empregavam como conceito-em-ação o peso ou massa total da caixinha, sem considerações sobre as mudanças na distribuição interna dos bloquinhos: essa tendência foi o que parecia impedi-los de reconhecer a equivalência dos dois casos.

É interessante notar o caso de Davi, o único entrevistado que havia relacionado as posições do centro de massa e do ponto de apoio para determinadar a altura de tombamento. Ele também esperava que a caixinha cheia tombasse a uma altura maior do que vazia; "***Por esse aqui ser mais pesado****, essa setinha aqui* [em um desenho feito anteriormente, representado o vetor da força peso]*, seria maior. Seria mais difícil de ultrapassar o alfinete aqui.*" Davi pareceu assim utilizar o mesmo teorema-em-ação empregado por Maya e Luna, ainda que o enunciasse mais implicitamente. Quando convidado a testar sua hipótese, Davi mudou de ideia e passou a afirmar que a caixinha cheia tombaria a uma altura menor do que a caixinha vazia, mesmo tendo percebido uma diferença de apenas meio centímetro. Solicitado a explicar sua previsão, mencionou outra vez o centro de massa: *"É, eu imagino... a única explicação que eu tenho seria nessa questão de centro de massa. No caso, como aumentou...* [repete o experimento, testando a altura de queda da caixinha vazia e da cheia, observando as caixinhas e não fazendo medidas com a régua vertical. Após, toma as duas caixinhas nas mãos e as observa em silêncio por alguns instantes]. *É... não sei dizer".* Mais adiante, ao reafirmar que a caixinha cheia cairá primeiro, Davi explicou que "*É porque o peso dele*

se concentra na... ultrapassa esse alfinete primeiro". Quando questionado sobre o porquê de ultrapassar primeiro, afirmou: "*Isso é uma boa pergunta. Isso eu não sei responder agora. Esse conceito, essa resposta, se eu não tivesse essa resposta eu não teria uma ideia formulada.*" (Davi).

Esse caso é interessante porque, apesar de ter enunciado a condição de tombamento da forma mais próxima à explicação escolar típica para essa situação, isto é, como uma relação entre as posições do centro de massa e do ponto de apoio, Davi não reconheceu como pertinentes esses conceitos-em-ação em uma situação ligeiramente diferente, que é a comparação entre os tombamentos da caixinha cheia e da vazia. Isso é ainda mais surpreendente considerando que, no primeiro ensaio, Davi relacionou, sem sugestionamento da entrevistadora, que a mudança na distribuição de massa ao longo do pêndulo estaria ligada a uma alteração do seu centro de massa. A propriedade dessa distribuição de ser equivalente na caixinha cheia e na vazia é o que parecia não ser reconhecido por Davi, demonstrando assim como certas propriedades dos conceitos-em-ação são reveladas (ou deixam de sê-lo) de acordo com as diferentes situações que o sujeito enfrenta.

Por outro lado, Alex, Eric, Ivan, João levaram em conta alguma consideração da distribuição da massa entre diferentes lados da caixinha, seguindo a tendência da categoria "distribuição discreta". Essa consideração pareceu conduzi-los a um raciocínio de compensação que os levou a prever que as alturas de tombamento são iguais:

> " *A distribuição mais parecida seria a da caixinha vazia, porque ela tem o peso nela inteira.* " (Alex); "***Acho que o que faz diferença é a diferença entre um lado e outro, e não a massa total da caixinha***." (Eric); " *Eu acho que vai tipo,* ***compensar*** *o que um teve no outro.* [...] ***é como se****, entre algumas aspas* [faz sinais de aspas com as mãos]*,* ***estivesse vazio***" (Ivan); "*Porque ela vai ficar totalmente preenchida,* ***você não vai ter tipo... diferença de peso*** *de um lado e de outro*" (João).

É possível notar nessas afirmações a presença da distribuição da massa como um conceito-em-ação: os sujeitos têm conta não o peso total, mas a maneira como esse peso se distribui no interior da caixinha. Consideraram que essa distribuição é o que determinaria a sua altura de tombamento. Além disso, utilizaram um raciocínio de

compensação para concluir que as distribuições são equivalentes e, portanto, assim devem ser também as alturas.

Theo, além de utilizar um raciocínio de compensação de forma semelhante ao grupo acima, ainda acrescentou a esse conceito a existência de um ponto na caixinha que determinaria o equilíbrio de acordo com a distribuição da massa em seu interior. Questionado sobre o que é o centro de gravidade:

> ***É o ponto do objeto que estabelece o equilíbrio, em que ele não cai.*** [...] Se eu encher toda a caixinha, onde estará o centro de gravidade? *No mesmo lugar da caixinha vazia, pra mim. Depende, se for bem cheia sim, no mesmo lugar da caixinha vazia. Mas... sempre tem um arzinho que fica, um lado fica mais pesado que o outro... acaba mudando* (Theo).

Há, nessa fala de Theo, pelo menos dois significados para o seu conceito-em-ação de centro de massa: o primeiro, como ponto que determina o equilíbrio, enquanto um segundo significado invoca a distribuição da massa no interior da caixinha, inclusive mencionando a pequena diferença que existiria entre os centro de massa da caixinha cheia e da vazia devido ao preenchimento com bloquinhos não ser perfeito.

5.2.2 Relação teórico-empírico

Outro aspecto de interesse central nessa pesquisa é a investigação de como os sujeitos relacionam a situação concreta proposta através dos materiais disponíveis e do problema apresentado com alguma forma possível de teorização, tanto através dos modelos teóricos como das teorias gerais. Esse questionamento foi apresentado aos participantes, na maioria das entrevistas, ao final, quando já haviam tido a oportunidade de manipular o material e refletir sobre as demais perguntas do protocolo, inclusive sobre a condição de tombamento e as diferentes alturas de tombamento para diferentes distribuições de massa. Tomando-se como exemplo uma distribuição qualquer, a

questão posta a cada participante foi: "*Você acha que seria possível prever essa altura de tombamento sem fazer o experimento*?"

Apesar de surgirem respostas positivas e negativas, as explicações mostraram uma tendência bastante homogênea: pensar a obtenção dessa previsão como possível através da experimentação. Assim, por exemplo, Alex, Luna, Maya, Caio e João consideraram que a previsão da altura de tombamento seria possível, desde que fosse feita de forma experimental ou usando informações de experimentações anteriores.

> "***Relacionado*** *peso, mais ou menos o ponto onde a caixinha está presa, tipo a área de contato com esse ponto* [área de contato entre a caixinha e o alfinete]. Como podemos conseguir essa relação? *Aí que eu acho que é complicado sem fazer experimento.* [...] *Eu acho que não dá mesmo* (Alex);
> "*Acho que já é né, porque já fizeram o experimento, eles acharam a fórmula lá.* ***Você faz a fórmula e acha****. Tipo mágica.* [....] "*Acho que precisou de experimento. Os cálculos físicos que a gente faz hoje em dia, eles são mais tipo... o cara observou o que acontecia e foi ver qual era... a frequência que acontecia,* ***e ele achou tipo uma fórmula****.* [...]E será que esse cara poderia achar a "fórmula" sem fazer experimento? [Franzindo a testa] *Acho que não*" (Luna);
> "*Eu acredito que esse experimento... só quando faz.* [Depois, no final do ensaio, é perguntada novamente] *Acho que assim... sabendo o peso da caixinha e... eu acho que o ângulo.* E o que eu teria que ter além desses dados? ***A relação entre eles****.* Como é possível chegar nessa relação? [Silêncio de oito segundos enquanto observa o sistema] [...] *Fora imaginar... ele já teria que então, de alguma forma, prever quando ia tombar.* [...] E dá para prever isso sem fazer o experimento? [Pausa] *Eu acho que não*" (Maya);
> "*É como se um engenheiro que só fez a teoria, aí vai e tenta construir uma casa como se fosse um pedreiro. Ele iria sentir muita dificuldade. Sabe? Nunca tocou num martelo. só sabe a teoria. Aí ele ia ficar assim... não ia saber o que fazer.* Já que você usou essa palavra, tem alguma teoria que eu pudesse usar para prever isso? ***Ter, tem. Só que eu não sei.*** *Daria.* ***Porque fizeram uma experiência antes****...*" (Caio);
> "*Não.* ***Porque eu não consigo relacionar o peso com a altura mínima****.* [...] ***A base que eu usei para fazer isso foi o experimento.*** [...] *Porque eu não sei nada sobre a caixinha, não sei qua a influência do peso sobre a altura...* ***eu não tenho como relacionar uma coisa à outra****, uma variável com a outra, o peso com a altura. Acho que o experimento nesse caso é essencial.* Mas será que alguém conseguiria? *Acho que sim* [...] *Talvez os conhecimentos físicos, como no caso do pêndulo.* Qual? *Plano inclinado!* E da pra ter esse conhecimento sem fazer esse experimento? *Não.* ***Pra você ter o conhecimento sem fazer o experimento, alguém tem que fazer antes***

> ***de você.*** *Porque as pessoas não nascem com esse conhecimento.* Mas tem que ser esse experimento específico? *Não, acho que você pode fazer um experimento pra caixinha e tentar passar isso pro plano inclinado. Tipo, se ela se comporta desse jeito, em um tal plano, então ela pode se comportar desse jeito em um plano inclinado. Você pode tentar adaptar um conhecimento pra outras circunstâncias*" (João).

Todas essas falas permitem perceber o aspecto intencional dos esquemas postos a funcionar frente a essa questão: para prever o evento em pauta, os participantes indicavam um sub-objetivo, que é o de determinar uma relação ou fórmula envolvendo as variáveis consideradas relevantes. É a posse dessa relação que identificaram como necessária para possibilitar a previsão. Essa tendência também foi percebida nas respostas dos demais participantes. Contudo, Ivan, Eric, Davi, Sara e Theo não excluíram a possibilidade de obter a relação desejada de outros meios que não a experimentação, ainda que os três primeiros não apontassem nenhuma outra fonte que pudesse contribuir a essa obtenção.

> "*Olha, deve ter.* ***Eu devo ter por experiência própria que teve pelo menos setenta exercícios de rampa na minha vida*** *e quase nenhum deles eu acertei* [rindo]" (Ivan); "*Precisaria primeiro da angulação, claro, e a diferença de massa entre um lado e outro, que é o que fez a diferença, no experimento. Ainda você precisaria saber a distância entre a massa grande e a massa pequena...* E o que faria com esses dados? [Fica em silêncio com expressão pensativa por dez segundos] *Não sei...* [pausa] *o que faria com esses dados...* [pausa] *Bom, eu já tenho uma noção da proporção, mas como você colocaria eles juntos...* ***alguma fórmula...*** E tem como eu conseguir esta fórmula sem fazer o experimento? [Fica em silêncio com expressão pensativa durante trezes segundos, olhando para o sistema]. *Isso tem cheiro de que tem seno em algum lugar aí...* [pausa] *seno de theta.* Ok, mas seja como for esta fórmula, ela pode ser conseguida de maneira não-experimental? *Eu acho que pode* A partir de que? *Bom, a partir dessas três variáveis, a questão é como é que você vai colocar essas três variáveis*" (Eric);
> "*Acho que sim.* Do que eu iria precisar pra isso? *Acho que do tamanho da caixinha, altura do alfinete... aí ia descobrir essa altura.* Eu teria que usar o que? *Acho que trigonometria!* Você consegue imaginar alguma coisa que eu teria que usar além da trigonometria? *Sem fazer o experimento?* Isso. *Acho que não*" (Sara);

> "***Como prever, eu acho que não teria, não.*** *Mas eu imagino o porquê ocorra. Por que é que vai virar ou tombar* [A partir daí, explica a condição de tombamento]" (Davi);
> "*Eu acho que sim, também. Mas eu não me lembro. É que eu não aprendi... Tipo, eu aprendi no ano passado sobre relógio de pêndulo, mas... sim, eu acho que sim, deve ter. Descobriram a aceleração da gravidade assim, então, acho que tem.* E do que eu precisaria pra fazer essa previsão? *O peso da caixinha, a relação entre o atrito dela e o solo, a altura... a altura que ele vai estar e a angulação. Que pode ser também só a altura disso aqui* [régua de medição] *e o comprimento disso aqui* [régua do plano inclinado]. E se eu tiver todos esses dados, como eu faço pra prever a altura de tombamento da caixinha? *Ah, precisa também da gravidade. Bom... deixa eu pensar um pouco agora* [...] ***Só que eu não sei a fórmula!*** Não precisa saber a fórmula. Só quero saber assim, de maneira geral, o que eu precisaria saber. Tem alguma coisa de física que eu precisaria saber? *O... formato do objeto. O peso do objeto... e... ah, a resistência do ar, que pode atrapalhar também. Acho que só essas variáveis.* Precisaria então dos valores das variáveis e usar trigonometria? Com isso sairia a previsão? *Acho que sim"* (Theo).

Em resumo, frente à convicção dos sujeitos na existência de uma relação ou "fórmula" que permitiria fazer a predição do comportamento do objeto estudado, inquirimos sobre como cada sujeito considerava que tal relação possa ser obtida. Em particular, queríamos avaliar se os sujeitos reconheceriam alguma conexão com alguma teoria geral, considerando que já haviam estudado a mecânica newtoniana no ano letivo anterior. Nesse ponto, foi possível identificar três categorias de respostas: a exclusividade da experimentação como forma de obter a relação desejada (Alex, Luna, Caio, Maya e João); a não-exclusividade da experimentação, mas sem indicação de alternativa (Ivan, Eric e Davi); a não-exclusividade da experimentação, com indicação do uso da trigonometria como alternativa (Theo e Sara).

O que se destaca desses resultados é que nenhum dos entrevistados mencionou a existência de alguma teoria geral física a partir da qual a relação desejada pudesse ser obtida. Além da menção a algumas das variáveis que os participantes supunham tomar parte na relação/fórmula, tais como a gravidade, o ângulo de inclinação do plano e o peso da caixinha, apenas João mencionou espontamente que seriam necessários "conhecimentos físicos". Frente ao pedido de uma especificação desses conhecimentos, João citou o plano inclinado, sistema exemplar no estudo da dinâmica básica e objeto de

numerosos problemas tradicionais no ensino escolar de física (como diz Ivan, "*Eu devo ter por experiência própria que teve pelo menos setenta exercícios de rampa na minha vida...*"). Não há, contudo, menção a qualquer lei geral da mecânica em nenhum dos respondentes.

Notamos assim na maioria dessas falas uma tendência geral a abordar o problema da previsão sobre o comportamento do sistema que aproxima-se de uma visão deste como uma uma caixa-preta. Nessa tendência, a experimentação é vista como uma forma segura e confiável de produzir as previsões desejadas, e ela pode sê-lo porque forneceria a relação entre as variáveis do sistema. Em alguns casos, os participantes parecem até mesmo querer "adivinhar" uma expressão matemática correspondente ao modelo teórico do problema. Mas exceto pela alusão solta a algumas variáveis e por alguns trechos nas falas de João e na fala de Davi sobre a condição de tombamento, além de alguns comentários de Ivan sobre as forças atuantes sobre a caixinha, via de regra os sujeitos não lançaram mão de conhecimentos físicos nem os mencionaram como correlacionados ao problema em questão. Portanto, o modelo teórico correspondente a essa situação parece assim não ser visto como parte de uma estrutura teórica mais ampla mas como algo à parte, que precisaria ser modelado empiricamente, como é típico das abordagens de caixa-preta.

5.3 TERCEIRO ENSAIO: LANÇAMENTO HORIZONTAL

5.3.1 O Atrito e a inércia

Questionamos inicialmente até onde o sujeito esperava que a bolinha deslizasse caso fosse eliminado o atrito. As respostas tiveram uma direção unânime:

> *"Iria continuar andando. Até que alguma coisa parasse ela.* E se nada parasse? *Aí iria para sempre"* (João);
> "*Até o infinito. Acho que ela não pararia*" (Davi);
> "*Ela não iria parar. Se você desconsiderasse a resistência do ar, não iria parar nunca.* [...] *Se ela não tivesse nenhum atrito, ela iria ficar andando infinitamente. Da mesma forma que se você lançar essa bolinha no vácuo, ela vai viajar infinitamente também*" (Eric)
> "*Ao infinito e além. Não tem atrito, inércia, vai..*" (Ivan);
> "*Acho que aí não iria parar, não.* [...] *porque teoricamente não iria ter nada para fazer ela parar*" (Maya);
> "*Ah, não sei. Acho que se não tivesse atrito nenhum, só ia depender delas, das bolinhas. Aí eu acho que...* [pausa]. [...] *Para sempre!* [...] *É, se não tivesse atrito nenhum, acho que não pára, né!"* (Luna);
> "[Fala espontaneamente, antes de ser perguntado] *Do elástico vem a força inicial, e se não tivesse atrito, ela continuaria indo com velocidade... eternamente"* (Alex);
> "Depois você falou que num caminho infinito, ela não iria parar nunca. *É. Sem atrito* (Caio);
> *"Depende. Se não tivesse resistência, ela não iria parar.* [...] *Até... sempre! Vai indo... se não tivesse nenhuma resistência, né"* (Theo);
> "*Acho que ela continuar em movimento...* Até quando? *Até quando ela encontrasse alguma coisa!* [...] *Se não tivesse atrito, acho que não iria parar...* [após um breve silêncio] *acho que sim, acho que ela iria parar.* Mesmo sem atrito, ela iria parar? *Sim. Acho que ela ia parando com a resistência do ar.* E se não tivesse ar? Ela ainda ia parar? *Acho que aí não. Ela iria continuar"* (Sara).

A consistência e homogeneidade dessas respostas indica que há um princípio de continuidade do movimento sendo usado como um teorema-em-ação, mobilizado de maneira imediata pelos sujeitos nessa situação específica. Isso não significa necessariamente que os sujeitos estejam considerando exatamente a inércia newtoniana:

é possível que imaginem a existência de alguma forma de "força impressa" que somente se extinguiria na presença de forças contrárias ao movimento.

Até aí, porém, mostrou-se apenas a enunciação do teorema-em-ação, o que informa que os sujeitos o reconhecem como verdadeiro para a situação posta. Na tentativa de evidenciar que operações de pensamento sustentam esse reconhecimento, passamos a inquirir sobre (1) o motivo pelo qual pensam ser assim, e (2) a possibilidade de realização desse teorema na prática. Com relação ao ponto (1), de forma geral perguntou-se como o participante sabia ser assim.

Alex, João, Davi, Eric, Ivan, Luna, Theo e Sara justificaram essa consideração apelando, primeiro, ao processo de ensino escolar:

> *"Do primeiro ano"* (Alex);
> "*Porque tipo...* [sorrindo] *é o que foi dito pra gente. No colégio.*" (João);
> "*Primeira lei de Newton.* [...] *É, porque me disseram...* [risos] *eu tento responder meio que intuitivamente, sem... querer aplicar... é que tem alguns conhecimentos, eu sei que sem atrito vai até aplicar uma força, aquela coisa toda. Mas... não tem como responder sem citar esses conhecimentos prévios que eu já tinha. Mas... é, sem o atrito, ela continuaria indo*" (Davi);
> " *... no laboratório de física do ano passado, a gente usou aquilo ali* [trilho de ar]. *Para tirar o atrito. E eu lembro que o carrinho que o professor botou lá ficou uns trezentos anos viajando ali.*" (Eric);
> "*Tem um cara chamado Newton....* [risos] *Mas eu acho que tipo, eu acho que eu sei isso muito mais porque eu aprendi. Eu acredito nos meus professores, eu acredito que eles são bons, e eles me falaram, oh, tem um cara chamado Newton que falou que, se você não tiver atrito, não tiver nada e você mandar ele numa direção, ele vai. E mantém velocidade constante. Então a gente meio que acredita.* " (Ivan);
> "*Os professores de física sempre falam isso.* Isso faz sentido para você? Essa ideia? *Não!* [sorrindo]. *Nenhum! Mas tipo... ah! É esquisito pensar que tem uma coisa que você nunca viu. É difícil de acreditar. Mas o professor fala, você escuta, né. Também, cai na prova..."* (Luna);
> "*Ah, o professor, a televisão... '"* (Theo);
> "*Não sei, eu não lembro. Eu estudei alguma coisa disso. Mas eu não lembro direito. Eu sou ruim em física"* (Sara).

Por outro lado, João, Maya, Caio, Eric, Theo e Alex ofereceram justificativas que não se apoiavam apenas na autoridade do professor, ainda que certamente tenham

sido desencadeadas por situações escolares. Esse grupo de sujeitos apresentou, para isso, um esquema baseado na reversibilidade: se o atrito é o responsável pela parada da bolinha, como afirmado unanimemente em um momento anterior da entrevista, a sua ausência deve implicar em um movimento perpétuo:

> "*... e também...* [pausa] *como é que eu vou explicar... você tem... você tem que ter alguma coisa que faça a bolinha parar. Então é aquela questão da lógica inversa. Se você não tem nada pra fazer a bolinha parar, então essa bola não pára.* " (João);
> "*Porque quanto mais atrito, antes ela pára. Se não tiver atrito, ela deveria continuar sempre.*" (Maya);
> "Porque não teria nada para ela parar, você falou, não é? *Isso.* (Caio);
> *"Então, se não tem nenhuma outra perda, você chega à conclusão de que se não tivesse atrito nenhum, ela nunca iria parar"* (Eric);
> *"É a mesma coisa que se jogasse a bolinha no espaço, não vai parar. Não tem resistência, o sistema está equilibrado, vai embora. O que faz parar é a própria resistência. Não vai parar. Até encontrar alguma outra coisa"* (Theo);
> "*E também... no gelo... se você empurrar alguma coisa no gelo e empurrar no asfalto, com a mesma força, você vai ver que ela vai mais longe no gelo, ela continua por mais tempo, e no asfalto não. Porque o asfalto é mais áspero.* [...] *Ah, aula de física. Conservação de energia. Com o conceito de conservação de energia dá para chegar nisso, porque sem perda nenhuma de energia, ela iria continuar o movimento"* (Alex).

Além da reversibilidade, Eric e Alex empregaram a técnica de abstração baseada em caso-limite, que nesse caso significava comparar superfícies com maior e menor atrito para verificar a redução da desaceleração da bolinha com a diminuição da intensidade do atrito. Dessa consideração eles assumiram que o limite, para o caso irrealizável de ausência de atrito completa, tende a ser o anulamento da desaceleração. Veremos a seguir que tanto Eric quanto Alex de fato consideram esse limite inatingível na realidade.

O ponto (2), referente à possibilidade de realização dessa situação-limite, de certa forma complementa essa discussão. A questão posta, de forma geral, foi: "*Dá para provar isso experimentalmente*?" O objetivo desse questionamento foi justamente identificar se o caráter aproximativo e idealizado do princípio da inércia era reconhecido pelos participantes. Uma verificação completa desse princípio, na forma

dos teoremas-em-ação enunciados por todos os participantes em um momento anterior da entrevista, implicaria em dispor de um espaço e um tempo infinitos, além da supressão total de forças externas sobre o móvel, o que a rigor não é possível. Aqui existe, porém, uma diferença sutil entre a prova e o convencimento: alguns participantes consideraram determinadas observações como suficientes para que se convençam da validade do princípio, casos em que insistimos no questionamento. Durante esse diálogo, não foram alegadas quaisquer considerações aproximativas nas falas de João, Davi, Sara, Theo e Ivan.

> "*Sim, em um lugar que não tenha atrito... Não sei se no espaço tem atrito ou não. Até li que no espaço eles soltam as naves e elas vão... tipo, se existe atrito, o atrito é muito pequeno. E aí a nave vai pra sempre.* Mas eu não teria que olhar pra sempre, pra ver se ela vai mesmo? *Sim* [sorrindo] [...] *Se você pensar assim, você nunca conclui nada. Você teria que olhar tudo para sempre. Qualquer divergência que você tiver... anula qualquer tipo de lei, qualquer tipo de regra. Eu acho que tem um limite. Tem um limite de tempo que... tipo, você tem que olhar um determinado número de repetições, um limite de espaço... pra ver se aquilo ali vai se comportar daquele jeito naquelas condições* [...] *Porque senão, nada funcionaria. Você diz que o Sol nasce todo dia. Então você teria que olhar todos os dias para ver se o Sol está lá. Seria complicado. Então você tem que colocar um limite*" (João);
>
> "[Falando baixinho] *Pode pular a parte do experimento?* [Risos] *Dá... pior que dá. É, porque o sistema mais sem atrito, mais próximo de sem atrito que eu imagino seria justamente o espaço. Sem atrito, sem outros corpos, sem influência da gravidade e tal, ele continuaria indo.* A gente observa algo no espaço que se move infinitamente em linha reta assim? *É difícil. Tem tantos corpos no espaço que é difícil você não ter atração, interação com alguns. Mas... deve ter. Ah, já vi tanta coisa. Deve ter. Mas... mas enfim, se não tiver atrito acho que ela vai infinitamente.* [...] *Mas... sem atrito, todos vão até onde puder. Mas com velocidades diferentes. Isso vai depender da massa. Considerando o ângulo zero grau e a energia que eu dei sendo a mesma*" (Davi).

Theo, Ivan e Sara invocaram situações distintas em que consideravamm existir ausência de forças de resistência ou forças externas como indício da possibilidade de prova experimental. Esses dois casos demonstram um ponto interessante sob a ótica da Teoria dos Campos Conceituais: além do reconhecimento de diferentes situações como pertencentes à mesma classe, o progresso da conceitualização envolve também a

exclusão de situações que podem ser, inicialmente, percebidas como parte de uma classe. Esses três sujeitos classificam, de modo espontâneo, situações que envolvem a presença de forças externas (gravitacionais) junto à classe daquelas em que é aplicável o princípio da inércia, ilustrando dessa forma a existência de uma sobregeneralização das situações.

> *"Onde eu vi, eles provaram.* [...] *Não sei se provaram ou não, isso ainda não vi. O que eu vi que provaram é que se não tiver resistência, uma bola de boliche cai com a mesma velocidade que uma pena. Pegaram um negócio lá gigante, tiraram todo o ar, soltaram uma pena e uma bola de boliche, e elas caíram ao mesmo tempo"* (Theo);
> *"Não experimentalmente tipo experimento físico, tipo jogar uma bolinha e ela ir eternamente para frente. Mas acho que daria se você* [pausa]*, pegasse assim, a ideia do... se você pensasse assim, se o movimento não fosse infinito,* [pausa]*, já sabiam que a Terra girava em torno do Sol. Se o movimento não fosse infinito, uma hora a Terra pararia de se movimentar. Então, como ela nunca parou até hoje, eu pensaria assim: pô, então o movimento, se não tiver nenhuma ação de fora, e ele está em equilíbrio, vai se manter eternamente. Então eu pensaria de uma maneira análoga por exemplo a... tipo, rotação do planeta em torno da Terra. Enquanto manter essa situação de o Sol puxando a gente, a gente fazendo aquela força centrípeta para fora, a gente vai continuar rodando. Até que alguma coisa externa aconteça ou sei lá, o Sol exploda. Então, acho que é isso.* Então um planeta girando em volta de alguma coisa é análogo a eu jogar a bolinha e ela ir...? *É, só que ao invés de o movimento ser reto, ele é circular. Ela não pára. Ela continua se mexendo, mexendo, mexendo. Por isso que a gente tem um monte de satélite lá fora rodando, e não caem na Terra"* (Ivan);
> *"Acho que dá.* De que maneira? *Tipo... não sei se tem a ver, mas tem aquele experimento da pedra e a pena. Aí eles tiram o ar. Aí elas caem juntas. Vai caindo bem mais devagar, você consegue ver. Acho que isso deve provar"* (Sara).

É peculiar o caso de Caio, o único que reconheceu explicitamente a dificuldade colocada pela impossibilidade de obter espaço infinito. Face a essa impossibilidade, Caio pensou inicialmente que não havia como provar o princípio experimentalmnte, mas logo em seguida propôs uma saída engenhosa, baseada num raciocínio indutivo:

> *... tecnicamente, não, porque não tem como a gente fazer uma... um negócio infinito. Mas tem, por exemplo, se alguém botasse sem atrito, sem resistência do ar, se quisesse fazer essa experimentação, a gente veria que ela aqui, e ela aqui, e ela lá embaixo* [aponta diferentes

> pontos da calha], *ia ter a mesma velocidade e a mesma força, a mesma coisa. Ela aqui, ali e lá. Aí daria para provar"* (Caio);

Considerações explícitas do aspecto aproximativo do princípio são apresentadas apenas por Alex, Maya, Luna e Eric. Tais considerações foram grifadas nas falas dos sujeitos a seguir:

> "*O gelo chega bem próximo.* [...] *Só se fosse... completamente... talvez... na água.* Na água? *Afundaria se não fosse com velocidade suficiente.* Na água, um objeto com bastante velocidade iria continuar em movimento eternamente? [Pausa por alguns instantes] *Depende. Só se na superfície da água não tivesse nenhuma ação externa.* Se não tivesse ação externa, ele poderia continuar eternamente? *Se ele não afundasse, eu acho que sim.* [...] *Poderia chegar próximo se o trilho fosse de gelo. Você conseguiria uma perda bem baixa, dependendo da força que você aplicasse, e a bolinha iria continuar por um bom tempo.* ***Você poderia aproximar essa coisa dizendo que ela continuou infinitamente***. Mas eu poderia de fato fazer ela ir infinitamente? *Não"* (Alex);
> *"Eu acho que não* [balança a cabeça negativamente]. [..] *Acho que experimentando com atritos diferentes... ver que com menos atrito, demora mais pra parar.* ***Mas mesmo com o mínimo de atrito possível, uma hora pára"*** (Maya);
> "*Não sei. Se mandar pro espaço uma bolinha e uma calha dessa...*[...] *Mas eu não sei. Eu não lembro de muita coisa que eu estudei em física...* [...] *Eu acho que sem atrito as duas iriam iguais.* A leve e a pesada? *Sim.* Se eu levasse essa bolinha pro espaço e batesse nela lá, eu ia vê-la andando pra sempre? *Não****, você ia ver por bastante tempo, mas pra sempre, não***. Por que? [Sorrindo] *Sei lá... a gente não tem muito como comprovar essas coisas como verdade, verdade. Quem sabe não ia fazer diferença pela falta de gravidade? Não sei..."* (Luna);
> "*... no laboratório de física do ano passado, a gente usou aquilo ali* [trilho de ar]. *Para tirar o atrito. E eu lembro que o carrinho que o professor botou lá ficou uns trezentos anos viajando ali. Então, eu acho que dá.* [...] ***Não iria infinitamente, mas seria algo bem próximo,*** *eu fiquei bem convencido! O carrinho ficou uns quinze minutos andando, com a mesma velocidade, ficava indo e voltando, indo e voltando... foi muito estranho, cara, foi muito estranho* [risos]*"* (Eric).

5.3.2 Centro de massa

Para completar a investigação da presença do objeto-modelo de centro de massa como conceito-em-ação acionado pelos sujeitos nessas diferentes situações, propusemos uma questão que teria o potencial de trazer à tona esse construto: Ao iniciar o movimento da bolinha na calha aplicando-lhe um golpe, faria diferença em que ponto da bolinha este seria aplicado? Um primeiro resultado que pode ser observado é que nenhum dos participantes mencionou o termo "centro de massa" nessa situação, nem mesmo aqueles que mencionaram espontamente esse conceito em algum dos ensaios anteriores. Aqui, como nas situações anteriores, também ocorreu a consideração intraobjetal da massa total do corpo, sem menção a partes, lados ou pontos:

> "*Acho que não.* " Se for um pouco mais pra baixo, mais para cima, ou mais para o meio... você acha que isso faz diferença? [Silêncio de treze segundos, enquanto olha para a bolinha com expressão pensativa] *Não."* (Maya).

Quadro 5. Conceitos-em-ação para a distribuição da massa na situação da determinação dos efeitos do ponto de aplicação da força sobre uma bolinha posta em movimento sobre um plano horizontal.

	Situação	Conceito-em-ação	Justificativas	Sujeitos
Terceiro Ensaio - Movimento horizontal	Determinação dos efeitos do ponto de aplicação da força	Massa total	Intraobjetal	Maya, João
		Ponto que distribui a força aplicada ou que concentra a massa do objeto	Compensação, simetria	Luna, Davi, Caio, Alex, Ivan, Theo, Eric, Sara

Porém, a maioria dos participantes indicou uma preferência pela aplicação da força no centro da bolinha. Alguns fizeram issoimaginando uma decomposição da força (ou uma divisão da energia) aplicada à bolinha e teorizando que aquelas componentes fora do alinhamento central são "desperdiçadas", não contribuem para o movimento desejado, podendo ter outros efeitos. Esse teorema-em-ação levou alguns a explicitar a ideia de que o centro da bolinha era o ponto que iria resultar na melhor *distribuição* da força.

> *"*Sim, p*orque eu tenho a ideia de que* ***a energia vai se distribuir mais facilmente para todo o corpo****. Aqui em cima ele vai dar aquela escorregadinha* [...] *Mas acho que para obter maior velocidade seria bem no meio, bem no centro* [...] ***eu imagino que aqui é onde vai ser melhor distribuído*** [no centro] " (Davi);
> "*Sim. É melhor no centro.* [...] ***Porque distribui melhor a força.*** *E também... o vetor da força vai ser reto, né? Se você bater reto, ele vai...* ***Se você bater embaixo, uma parte da força vai reto e uma parte vai pra cima. Você vai perder essa parte que vai para cima***. (Alex);
> "*Faz. Se der aqui embaixo, ela sobe e vai mais devagar. Se der aqui, tipo, um lado vai pra cima, ela vai mais devagar. Se der bem no meio, ela mais forte , mais rápido. Porque... é como se a força fosse bem dividida, porque aqui ela ia pegar de raspão...* ***é como se a força fosse mais bem dividida"*** (Caio);

Outros também mencionaram "perdas" de força ou energia para batidas aplicadas fora do centro da bolinha, mas deram um passo além ao abstrair toda a massa da bolinha como se estivesse concentrada em um ponto que se localizaria em seu centro, como indicado nas falas que seguem. Dessa forma podemos dizer que a noção de centro de massa, no sentido de um objeto-modelo, ocorreu de fato como um conceito-em-ação nos esquemas desses três sujeitos nessa situação, mesmo que o termo não tivesse sido por eles verbalizado. Em outras palavras, esse conteúdo de conhecimento foi mobilizado em sua forma operatória, mas não em sua forma predicativa.

> "*Seria no centro da bola. Exatamente no centro.* Por que? ***Porque aí ia aplicar a força na bola toda***. *Se fosse aqui* [pontos fora do centro] *iria perder bastante a... não sei se pode falar em perder força, mas ia perder bastante a energia que eu apliquei nela, pra ela girar. Mas se for aqui* [no centro] *já ia distribuir mais pra ela e ela iria mais rápido"* (Theo);
> "*Acho que faz. Acho que se você tipo... bater no centro... acho que ela vai... mais longe. Do que se bater em alguma outra parte.* ***Porque no centro é onde concentra a massa dela***. *Aí se você bate aqui [no centro], eu acho que ela movimenta a bolinha por mais... tempo.* Tem algum motivo pra você achar que a massa se concentra no centro? *Não sei"* (Sara);
> "*Com certeza. Quanto mais embaixo, mais longe vai.* [...] *Acho que aqui* [no centro da bolinha] *você está aplicando uma força que está...* ***meio que atingindo a massa inteira da bola.*** *Aqui* [na parte de cima] *você só está atingindo... está atingindo mais a parte de cima.* ***Se você***

> ***bate no meio, você está... empurrando a bola como um todo*** [...] (Eric).

O que há de comum entre esses dois últimos grupos, como é possível perceber, é o fato de produzirem explicações em que imaginam um ponto do corpo (no caso dessa situação, esse ponto é o centro da bolinha), para daí então elaborar teoremas-em-ação acerca da questão proposta, ao invés de simplesmente considerar a bolinha como um todo, tal como ela se apresenta. Enquanto em parte desses casos a propriedade atribuída a esse ponto é o de ser aquele que melhor distribui a força que nele é aplicada, em outros, trata-se do ponto do corpo que atuaria como se toda a massa do corpo estivesse concentrada naquele ponto. Trata-se assim de uma diferença qualitativa que demonstra um certo grau de idealização no conceito-em-ação mobilizado, aproximando-o de um autêntico objeto-modelo.

5.3.3 Relação teórico-empírico

Assim como foi realizado nos dois ensaios anteriores, neste também finalizou-se questionando o participante sobre a possibilidade de previsão da resposta do problema anteriormente ou na ausência de experimentação, isto é, da resolução do problema por outros meios que não o teste experimental. A quase totalidade das respostas nesse momento foi consistente com as concepções já externadas pelos sujeitos nos outros dois ensaios, apesar de nenhum dos participantes negar totalmente essa possibilidade quando perguntado.

Por exemplo, João, Maya, Davi e Theo, apesar de responderem positivamente à pergunta inicial, durante o desenvolvimento de suas falas acabaram revelando a perspectiva de que, qualquer que fosse o caminho tomado para elaborar a previsão pedida, em última análise a experimentação anterior é imprescindível. A posição desse grupo era a de que, de forma geral, é possível produzir essa previsão sem que o sujeito

em questão faça o experimento por si mesmo. Mas, para isso, era necessário que ele se apoiasse no resultado de experimentos feitos por outros no passado. Portanto, a rigor esses participantes não reconheceram uma possibilidade de elaborar o modelo teórico pertinente a essa situação por uma via teórica.

> "***Depende, se já tiver feito uma experimentação, sim***. *Saber sobre a bolinha, o trilho, ter uma informação qualquer. Do nada não tem como você tirar isso. Por pura teoria achar que vai acontecer e chutar um número qualquer. Não dá.* O que você precisaria saber, por exemplo? *Talvez... não sei... acho que varia de material para material, de massa para massa, de cada bolinha... o trilho, se vai mudar, a distância do trilho, a força que vou estar aplicando à bolinha...* [...] Mas será que além desses dados isso seria suficiente ou precisaria de algo mais? *Precisaria de uma experimentação.* [...] *Pra saber como ela se comporta. Se fizesse com esse aqui seria mais fácil porque é o ambiente que você já está, que você quer aprender*. [...] *Porque mesmo que você fizer isso sem experimentação, todos os dados que a gente tem e* ***as fórmulas que a gente usa já são fruto de experimentação passada***. " (João);
>
> "*Sim, acredito que sim, porque... vai ter... as forças que exercem sobre a bolinha, não é? Vai ter também o local, se é plano, se é sem atrito ou com atrito, né. E também vai ter a força que vai fazer ela estar em determinada situação. Ou se eu soltar ela de algum lugar* [solta a bolinha a certa altura do chão] *ou, se simplesmente...* [lança a bolinha horizontalmente sobre o chão]... *empurrar ela, não?* [...] *As forças que exercem sobre elas, algumas, até mesmo através de vetores, a gente consegue ver que algumas se anulam. Então, quando eu tenho os valores delas, das que não se anulam, assim, eu já tenho mais ou menos uma ideia de onde ela vai parar. Sabendo também se o local tem atrito ou não, e sabendo qual a força que vai agir sobre ele, nesse caso, que vai empurrar ela, acho que dá para fazer... Ah, e também o material que é feita pela bolinha. Varia de acordo com a bolinha. Acho que dá para saber onde é que ela vai parar.* Então o que eu preciso é saber as forças? *Basicamente. A relação delas, porque todas tem algum tipo de relação. O peso, ou a gravidade, ou simplesmente onde eu empurro ela...* [empurra uma bolinha horizontalmente sobre o chão enquanto fala]. *Sabendo disso, eu tenho que ver, se tem grav... se tem atrito no local, ou não.* [...] *Acho que vai depender também... ãhm...* ***acho que é um caminho que a gente já partiu, de já ter feito essa experiência antes***. *Quando a gente pensa até para explicar, a gente começa a entender que existem algumas coisas que afetam o objeto sendo estudado naquela situação.* Mas você acha que é possível fazer isso sem experiência? *Acho que sim* [...] *... estudando todo o conhecimento que já teve antes, sobre... o objeto, ou o que já tem mais ou menos uma... por exemplo, se ela acha que existe uma força que exerce sobre a bolinha, ela deve estudar esse princípio de*

forças, acho que deve partir daí. E depois sobre o objeto estudado, a bolinha, ***se alguém já criou algum experimento sobre isso que eu estou pensando? Acho que deve começar por aí.*** *Talvez até pesquisar experimentos parecidos, ou até um pouco diferentes, podem ter algum tipo de relação com o que ela está pensando, com a teoria que ela já tem em mente.* ***Acho que ela deveria começar por aí. Do que já tem, algo, um pressuposto que já existe.*** E você consegue imaginar alguma teoria que me permitisse fazer essa previsão do ponto de parada da bolinha? ***Acho que não. Não que eu me lembre. Da bolinha, não*** " (Maya);

"*É... tendo conhecimentos de...* [...] *... as condições pra isso?* [...] *Ah, é possível, óbvio que é possível fazer isso. Mas pra fazer isso teria que ter outros conhecimentos, de... em relação ao material da bolinha, de movimento...* [...] *... o material... a resistência do ar, se pode ser desprezada. Mas eu... em suma, seria isso. Mas se eu tivesse os dados e tivesse o conhecimento prévio de como ela se comporta nessas condições, eu poderia prever. Com toda certeza.* E do que eu precisaria, além dos dados? Se é que precisaria de mais alguma coisa. *De conhecimento de como uma bolinha se comporta em determinadas situações. E com isso eu posso prever como ela se comporta em uma rampa, por exemplo. Eu imagino... sabendo como ela se comporta em queda livre* [larga a bolinha para demonstrar]*, eu posso deduzir o comportamento dela no ar. A diferença é que... por exemplo, como ela se move aqui, no caso, devido à atração gravitacional* [na queda livre] *e aqui seria devido a uma força aplicada* [no trilho]*, teria que analisar os dados. Mas... aí é possível prever, eu acho que sim.* Por *exemplo, se eu largasse ela aqui, desse ponto até esse ponto* [simulando uma queda livre]. *Como é que ela ia iria? Ela no caso foi em linha reta, então já percebi que ela tem uma tendência a ir em linha reta. Eu poderia aproximar a aqui, por exemplo* [aponta para o trilho horizontal]. *Considerando que ela é sempre atraída nessa direção* [vertical para baixo]*, ela poderia... deixa eu pensar. É, fazer como se fosse uma equivalência, desse movimento que ela faz* [vertical para baixo]*, para esse movimento aqui que ela pode fazer* [indica o plano horizontal do trilho]. *É maneiro, eu gosto de ficar pensando nessas coisas. Mas... o que seria necessário. Mas...* ***tudo pra você prever, você tem que fazer antes***. Então eu poderia não ter feito esse experimento, mas teria que ter feito outros experimentos com essa bolinha? *É, equivalentes, no caso. Ah, eu teria que saber a força elástica também, a elasticidade. Mas eu teria que ter feito experimentos relacionados a essa situação. Por exemplo, não adiantaria muito que eu fizesse um experimento para saber a temperatura máxima que ela aguenta. Esquentar essa bolinha, saber que ela aguenta até tal ponto, que ela se dilata tal, volume tal, faz tal coisa quando é elevada a uma temperatura x. Isso aqui não serviria muito. Mas relacionadas ao movimento, tendo os dados certos eu conseguiria fazer isso aqui*" (Davi);

> *"Ah, tendo a velocidade dela... e tendo o atrito, o atrito vai interferir com a velocidade da bolinha, porque a bolinha não desliza, ela rola. Então... a velocidade, o peso da bolinha, a resistência do ar, claro... e a gravidade, só. Acho que é só isso. Acho.* [Mais tarde, repetindo-se a pergunta] *Peso da bola, força aplicada... o atrito do ar... que dependendo do peso, seria insignificante... acho que só. Ah, e o solo, como ele é.* O que teria de fazer com esses dados? *Bom, eu faria a fórmula da força aplicada, sabendo a força que eu bati e a força que ele tomou. Transformar essa força pra aceleração... e ver qual seria a constante dessa aceleração. E... depois pegar e diminuir da resistência, até ela diminuir, até zerar o movimento, que é o "x".* E como seria essa fórmula da força aplicada? *Eu já vi, mas não consigo lembrar...* Você está imaginando alguma formula que você estudou em Física? *Sim.* Como você imagina que essa fórmula foi obtida? *Essa fórmula... acho que foi com experimento.* Experimentalmente? *Essa, sim.* ***Sem o experimento, não vai"*** (Theo).

Em outro direcionamento, Eric, Luna, Alex, Caio e Sara admitiram a possibilidade de obter a previsão desejada sem recorrer ao teste experimental, embora não soubessem determinar exatamente como. De forma semelhante aos demais, esses participantes enumeraram diversas variáveis que deveriam conhecer para fazer isso. Nas respostas dos três primeiros, é visível a tentativa de esboçar uma "fórmula" para isso, o que sugere que eles acreditavam existir e consideravam relevante um modelo teórico de caixa-preta para enfrentar essa situação. Ao contrário dos anteriores, contudo, supuseram que esse modelo era possível de ser alçancado por alguma via que não a experimentação direta. No entanto, nenhum dos cinco mencionou qualquer teoria geral como possível caminho para isso.

> "*Acho que se você tiver o atrito, a resistência do ar, a massa e o volume, você consegue saber exatamente onde vai parar* [...] *se você tiver... também a força. A força aplicada.* [...] *Eu acho que as informações são só essas. O problema é organizar as informações. O que precisa é o atrito, a força aplicada, a massa e o volume do corpo.* Mas o que eu faria com essas informações? [Silêncio de doze segundos] *Não sei... Bom, você saberia que as coisas que iriam fazer você perder são os atritos. Então ia ser a força... a força que você colocou... relacionado com a massa e o volume, não sei se é multiplicado. Menos os atritos.* Você está tentando montar uma fórmula? *Mais ou menos!* [Risos] *É, estou tentando montar uma fórmula.* Então eu vou mudar um pouquinho só a pergunta. De onde eu poderia tirar essa fórmula, que não da experiência? Tem algum jeito de fazer isso? ***Tem. Ter, tem. Tem sim.*** [...] *A partir do fato que*

você sabe que a massa e o volume aumentam a distância, e que os atrito vão diminuir. Então você já sabe que os atritos vão diminuir a distância, isso é uma coisa que você já sabe. Outra coisa que você sabe é que a massa e o volume são diretamente proporcionais à distância. [...] *Tipo, se eu não soubesse que essa bolinha vai mais rápido que essa... quer dizer, vai mais longe que essa.* [Silêncio de dezoito segundos, enquanto olha para o sistema com expressão pensativa]. Então, você está me dando relações entre as variáveis, entre as grandezas... *É, mas eu não consigo organizar elas.* **Mas existe uma organização que não venha da experiência? "*Eu acredito que sim.* *[*...] *Acho que vem da lei do atrito. Só que de onde vem a lei do atrito?* [...] *Não lembro também, isso foi no primeiro bimestre do ano passado...*" (Eric);

"*Eu acho que é difícil de fazer, mas não impossível. É difícil calcular a quantidade de força que você vai jogar, tipo...*[...] *Humn... eu acho que você não vai poder ignorar o atrito, que nem nas aulas de Física... você vai ter que considerar o atrito, a força que você vai ter na bolinha... o ar...*[...] *A força da bolinha... que você vai jogar a bolinha. Deve ter mais alguma coisa, mas eu não sei. O peso dela.* Ok, digamos que a gente tenha todos esses dados que você falou: atrito, peso da bolinha... como a gente usa esses dados para prever onde ela vai parar? ***Acho que vai ter uma fórmula lá, que você vai jogar os dados e vai sair, tipo, a distância***. ***Como chegar na fórmula é o que eu não sei*** [rindo]. Você não precisa me dizer a fórmula... mas você consegue imaginar algum jeito, em linhas gerais, pra se chegar a essa fórmula? *Eu imagino tipo, desenhar a linhazinha da... botar a bolinha, fazer aquele desenho das forças...* [...] *aí somar e subtrair, somar e subtrair... depois, não sei. Eu sei que até onde ela vai chegar deve sair da aceleração.* [...] *Acho que você teria que ir tipo, meio que experimentando. Conhecer todas as variáveis e ver qual que seria a distância de cada um. Aí você ia ter tipo, um monte de resultados loucos. E aí você teria que achar um padrão nesse resultado louco.* E sem fazer experimento, será que existe um jeito? *Eu não sei* [rindo]. *Sei lá, deve ter.* ***Acho que sim. Não consigo pensar em um jeito, mas acho que deve ter.*** [...] *Não pode ter só um jeito, né? Tem sempre vários jeitos de fazer uma coisa"* (Luna);

"*Sim. Sabendo o coeficiente de atrito do material, a força que você aplicou na bolinha, e acho que a massa da bolinha.* Se tivéssemos esses dados, como faríamos essa previsão? *Com a massa da bolinha e a força que você aplicou você poderia descobrir a velocidade da bolinha e com o coeficiente de atrito você conseguiria descobrir a força que o atrito faz na bolinha oposta ao movimento, e aí você conseguiria descobrir a desaceleração.* Com a força e com a massa da bolinha eu poderia descobrir a velocidade da bolinha? *Sim.* De que maneira eu poderia descobrir isso? ***Relacionando as duas. Não sei muito bem***. Eu precisaria de mais alguma coisa além desses três dados? *Acredito que não*" (Alex);

"*Acho. Considerando o atrito e coisas assim.* [...] *É...* [pausa breve] *calcular a força que eu apliquei à bola, o atrito que ela está sofrendo, a resistência do ar... e aí eu saberia o ponto onde ela iria parar.* E se você tivesse todos esses dados, como os usaria para prever o ponto de parada da bolinha? *Ah, iria saber qual a veloc... como ela está... como ela está perdendo velocidade. Aí sabendo a velocidade, em certo momento, iria saber onde ela iria parar.* [...] *Se eu levar em conta o atrito, e a resistência do ar... ela vai perder velocidade. Aí sabendo isso, quão rápido ela perde velocidade, aí você consegue.* Sabendo o atrito, como eu vou saber qual vai ser a diminuição da velocidade dela? *Por exemplo, se eu tiver uma força de dez newtons, e se tiver um atrito pra cá* [sentido oposto] *de, sei lá, três... aí, com o tempo, ela vai perdendo três, três, três, aí daqui a pouco ela vai parar, aí eu vou saber.* Como você sabe disso que você me falou? *Ah, já estudei... sei lá, estudei um pouco de... de... mecânica, e foi meio intuição.* O que você precisaria saber de mecânica, para chegar a esta conclusão? *Que existe uma força... sobre ela.* [...] *Ah, que ela tem uma velocidade... que ela vai parar em algum momento. Tem que saber disso. Se não tivesse, ela iria direto.* Isso é tudo ou tem algo mais? *Eh... a gravidade e a normal não precisa, vão se anular. É, só isso que influencia.* Então sabendo essas coisas eu já poderia prever algo do tipo "olha, quando andar cinco metros, ela vai parar"? *É.* E como eu vou usar a força e o atrito para chegar na distância de parada? Na sua opinião? De maneira geral... *Ah, sabendo a velocidade, com a força..* Mas como eu vou juntar essas coisas para chegar a uma conclusão? ***Ah... aí não sei responder*** [rindo]. Só queria sua opinião mesmo! De forma bem geral, nada específico. *Saber a velocidade... é, a velocidade. Aí com atrito eu vou saber qual velocidade ela está perdendo... está desacelerando. Aí vou saber a distância que ela vai parar. Só esses três" (*Caio);

"[Silêncio de dezesseis segundos] *Eu acho que dá.* Como você imagina que daria pra fazer isso? *Acho que se eu tivesse o tempo e a velocidade, eu conseguiria. Se eu tivesse a distância, por exemplo, que eu quisesse, supondo que sejam dois, eu acho o tempo, aí eu posso ir tentando... em relação ao tempo e à velocidade.* Se eu jogar essa bolinha agora, eu poderia prever o ponto em que ela vai parar antes de jogá-la? Do que eu precisaria? *Acho que...* [pausa] *a massa da bolinha... Acho que a força dela. A força que jogou a bolinha.* [...] E se eu tiver medido a massa e a força, como eu poderia usar esses dados pra prever o ponto de parada? [Silêncio de quinze segundos] *Não sei.* Mas pode falar genericamente, o tipo de coisa que eu teria que usar. Não precisa falar especificamente. [Silêncio].Você acha que é possível alguém fazer isso? *Acho.* Consegue imaginar alguma coisa que essa pessoa poderia usar pra isso? [Após 17 segundos] *Não sei"* (Sara).

Nesse último ensaio, porém, houve uma importante exceção à tendência geral. Seguindo inicialmente a mesma tendência apresentada pela maioria dos demais participantes, Ivan começou a explicar como a previsão seria feita mencionando algumas das variáveis que seriam necessárias para isso, que poderiam ser vistas como conceitos-em-ação nesse contexto. Ao contrário dos outros, contudo, ao ser questionado sobre como utilizaria esses valores para obter a previsão pedida, Ivan evocou a segunda lei de Newton e também explicitou como organizaria as variáveis por ele mencionadas para incorporá-las a essa teoria geral, que nesse momento adquiriu o papel de um teorema-em-ação no esquema esboçado por Ivan:

> *Você teria que ver quanto... como que seria a força de atrito, no caso. Porque aí você teria a força dela indo pra frente, que é a sua, o peso e a força de atrito. Faria ela ir reduzindo a velocidade dela com o tempo. Teoricamente, em algum momento ela iria parar. Mas como...* [murmúrio incompreensível]. [...] *E o peso. E a velocidade que ela vai, a força que você colocou no início...* Se eu tiver todos esses dados, o que eu faria com eles para prever o ponto de parada? [Após um breve silêncio] *É que assim, você teria a força inicial, menos a força de atrito. Seria como uma aceleração negativa pra um lado. A força vai diminuindo. Aí como a aceleração está ao contrário, iria reduzindo a velocidade. Então... você poderia pegar a velocidade,* ***usar F=ma...*** *sendo que você tem que saber qual a força de atrito, para saber qual a aceleração que está reduzindo a velocidade dela, quanto de velocidade que ela perde por segundo. Aí você vai fazendo isso e depois usa, sei lá, "v" igual a "delta s" sobre "delta t"? Você descobriria a aceleração e aí você descobriria qual a distância que ela percorreria* [...] E aí o que eu chegaria no final das contas? *Primeiro você descobriria a força que o atrito faz enquanto está se mexendo, depois usando esse F=ma você descobriria a aceleração, tipo assim, a redução de velocidade que ela estaria tendo, durante o percurso. E com a aceleração você descobriria o quanto a velocidade dela cai. E depois você usaria... nem é "delta s" sobre "delta t"...* ***você usaria aquele lá, de... Torricelli****. "V" final é zero, "v" ao quadrado, você teria a aceleração, que você descobriu através da força, e, eu acho que... você não tem tempo... ah, justamente, aí você ia ter a distância. Aí você poderia prever, fazendo isso.* O que te fez pensar em usar F=ma? *Pelo fato de... eu já saber que o atrito gera uma força, puxando para trás. E essa força pode ser calculada. Isso que me fez ligar as ideias. Porque se o atrito gera uma força para trás, isso gera uma aceleração, está "reduzindo" pro outro lado* [fazendo o sinal de aspas com as mãos] (Ivan).

Dois aspectos podem ser notados no esquema descrito por Ivan. Em primeiro lugar notamos que ele reconhece o uso da segunda lei de Newton como possibilitador de produzir uma resposta independente do método experimental, mostrando assim empregá-la na forma de um teorema-em-ação para desenvolver um modelo teórico. Trata-se da única ocasião em que isso pode ser percebido dentro de todo o *corpus* produzido pelos dez participantes nos três ensaios dessa pesquisa: nem teoria geral, nem modelos teóricos, foram sequer mencionados - tanto menos tiveram sua aplicação explicada - em nenhum dos demais ensaios. Isso sugere que a implementação de teorias gerais e modelos teóricos como teoremas-em-ação nos esquemas dos estudantes é possível, mas é raro: o reconhecimento destes elementos como fontes de possibilidades para construir modelos que respondam a situações quase não ocorre.

O outro aspecto que precisa ser observado é que, mesmo com a menção à segunda lei de Newton, não podemos apenas por isso afirmar que Ivan a concebia como uma estrutura de pensamento ampla e sistêmica, potencialmente aplicável a todo um campo conceitual, no sentido em que se entende as teorias gerais. É também possível que ela pareça-lhe apenas uma fórmula que pode ser aplicada neste como em alguns outros problemas canônicos de física. Isto é, não podemos apenas com base nesses dados fazer inferências sobre significados mais profundos que Ivan atribuía às leis físicas. Podemos apenas afirmar que ele reconheceu o papel desta como fonte possível para modelar a situação proposta nesse ensaio, usando-a como teorema-em-ação no esquema que propôs.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

De forma geral, utilizar abstrações ou idealizações em seus esquemas perante as situações propostas mostrou ser um grande desafio para os participantes, especialmente quando tal envolvia conflitos com suas ideias prévias. Isso evidenciou-se principalmente nas situações que envolveriam utilizar o objeto modelo centro de massa como conceito-em-ação, como será discutido adiante. Por outro lado, foi possível explicitar a existência de processos de pensamento consistentes por trás das respostas dos participantes. Mesmo quando suas previsões e explicações não coincidiam com as científicas, em sua maioria eram baseadas em teoremas-em-ação consistentes e com razoável justificativa, isto é, lógicos e bem articulados entre si. Após tantas horas de entrevistas e muitas mais de leituras e análises dos resultados, temos de registrar a impressão de que baixas pontuações em testes padronizados provavelmente tendam a retratar os estudantes como menos inteligentes do que eles são de fato.

Nas páginas que seguem, discutimos as principais conclusões obtidas nesse estudo. Inicialmente, respondemos ao problema de pesquisa assumido, que é caracterização do papel dos elementos do processo de modelização na conceitualização dos estudantes do Ensino Médio relativamente ao enfrentamento de situações no campo conceitual da dinâmica da partícula. Para maior clareza, dividimos essa discussão entre o elemento "objeto-modelo" e os elementos "modelo teórico e teoria geral". Em seguida, discutimos algumas das implicações dessas conclusões, tanto para a prática de ensino de Física quanto para a pesquisa nessa área.

6.1 Sobre os elementos do processo de modelização na conceitualização dos estudantes

6.1.1 Objetos-modelo: massa e sua distribuição

O objeto-modelo centro de massa se destaca por sua ubiquidade, estando presente nos três ensaios realizados. Na busca por compreender como os participantes o conceitualizam, as situações propostas foram planejadas na tentativa de suscitar a mobilização deste objeto-modelo como conceito-em-ação nos esquemas com elas desenvolvidos.

Nas versões de objetos-modelo usados pelos sujeitos com referência ao papel da distribuição de massa, a principal conclusão desse estudo é a tendência demonstrada pelos participantes em basear-se numa abordagem de natureza intraobjetal. Tal perspectiva foi categorizada nos Quadros do capítulo 5 como "Massa total". Essa categoria de conceito-em-ação ocorreu em todos os três ensaios e em quase todas as situações. Bons exemplos podem ser encontrados nas conceitualizações de Luna, João, Alex e Ivan na situação referente à substituição da corda do pêndulo: após terem eliminado experimentalmente a dependência do período com a massa, eles aplicaram esse teorema-em-ação construído na ação para inferir que essa substituição deveria igualmente manter o período inalterado. Portanto, o conceito-em-ação que mobilizaram para representar a corda foi simplesmente como um objeto que pode ser mais ou menos massivo, sem consideração pelo papel da distribuição espacial dessa massa. Adicionalmente, esse mesmo conceito-em-ação foi observado entre aqueles participantes de não excluíram a dependência do período com a massa: Maya havia concluído que o aumento da massa provocaria um aumento do período, ao contrário da conclusão de Theo. Ambos deram respostas consistentes com seus respectivos teoremas-em-ação e com a visão intraobjetal do objeto-modelo, isto é, para ela a substituição da corda aumentaria o período, enquanto para ele, diminuiria: "*Porque ia*

ser a mesma coisa que se eu botasse mais peso aqui [no suporte com discos]. *Só que ia ser pro fio todo*" (Theo). O único entrevistado a empregar o objeto-modelo centro de massa como um conceito-em-ação à situação da substituição da corda foi Davi. Mas é possível, em princípio, que a experiência de Davi como monitor de Física tenha tido influência em seus processos de conceitualização relativos ao que foi abordado na entrevista.

O quadro geral foi semelhante no segundo ensaio. Enquanto na situação referente à determinação da condição de tombamento os termos centro de massa ou gravidade foram tidos como relevantes por vários sujeitos, isso praticamente não ocorreu na situação de comparação entre as alturas de queda para a caixinha cheia e a caixinha vazia. Nesta última situação, embora em muitos casos a equivalência entre as duas caixinhas fosse notada pelos sujeitos através de uma compensação ("*Acho que talvez elas caíssem iguais, porque tanto vazia quanto cheia, iria estar compensando, aqui e aqui"; "Eu acho que vai tipo, compensar o que um teve no outro"*), dois sujeitos que haviam reconhecido o centro de massa em outros momentos (Luna e Davi) não empregaram esse objeto-modelo como conceito-em-ação, mas voltaram a explicações intraobjetais, tomando como conceito-em-ação o peso da caixinha como um todo.

Assim, ainda que estas situações do segundo ensaio acabem "forçando" a pensar na distribuição da massa, na situação de determinação da condição de tombamento da caixinha no plano inclinado foi possível notar uma tendência a explicações de natureza intraobjetal, por vezes mescladas com outras de caráter interobjetal, com poucos participantes chegando a formular de fato uma condição. Essa condição pode ser vista tanto como um teorema-em-ação quanto como um modelo teórico da situação enfocada.

Já no terceiro ensaio, pudemos ver conceitos-em-ação mais interobjetais do que intraobjetais, com apenas uma participante respondendo nessa última categoria. Os sujeitos tenderam a considerar de alguma forma a estrutura interna da esfera posta em movimento sobre a calha, imaginando por compensação ou simetria que a aplicação da força no ponto central produziria uma distribuição desta em todas as partes do móvel. Essa situação foi também a que mostrou o maior índice de respondentes considerando, como conceito-em-ação, o ponto central da esfera como um ponto que concentraria toda

sua massa. Nesse sentido, pode-se pensar nesse conceito-em-ação como um objeto-modelo, com uma idealização razoavelmente explícita que conduz esses participantes a representar o objeto tridimensional como um ponto.

Observando as categorias no conjunto das sete situações distribuídas nos três ensaios, é possível notar uma gradatividade nos conceitos-em-ação mobilizados pelos participantes em termos de níveis de idealização. Por um lado, a categoria "massa total" reflete conceitos-em-ação quase desprovidos de idealizações, em que os sujeitos pareceram considerar apenas o objeto como um todo, tal como se apresenta aos sentidos; por outro lado, as categorias "centro de massa", "ponto de equilíbrio ou ponto de apoio" e "ponto que distribui a força aplicada ou que concentra a massa do objeto" indicaram a utilização de conceitos-em-ação que envolvem, de um modo ou de outro, uma forma de ver o objeto bem mais idealizada, abstraindo a sua imagem e materialidade a uma versão pontual. Mesmo que esses conceitos-em-ação não sejam necessariamente idênticos ao conceito científico de massa pontual, essa característica de idealização que acaba por impor certo afastamento em relação à coisa real pode ser vista como uma forma de utilização de um objeto-modelo.

Entre esses dois extremos de maior e menor idealização, ocorreram explicações em que nem se considerava simplesmente o todo, nem se reduzia o objeto a um ponto, mas pensava-se em termos de uma distribuição discreta, isto é, dividia-se o objeto em "partes" ou "lados" que, em algumas das explicações, podiam ser eles próprios vistos como diferentes pontos do objeto que tinham suas próprias características intraobjetais (de serem mais pesados ou mais leves). Nesse sentido, a categoria "distribuição discreta" poderia ser interpretada como uma intermediária entre as visões mais e menos idealizadas, já que de alguma forma conjugava elementos de ambas.

Em adição, os resultados dessa pesquisa mostram que os objetos-modelo no sentido bungeano podem ou não constituir-se como conceitos-em-ação nos esquemas dos sujeitos e isso não varia apenas de um sujeito para outro, mas principalmente de uma situação para outra. Isso significa dizer que, para o mesmo sujeito, existe alta variabilidade da conceitualização de um certo objeto-modelo de acordo com a situação. Os dados levantados nesse estudo permitem assim demonstrar o quão relevantes são as

situações para a construção de sentidos dos conceitos físicos, reforçando a centralidade que Vergnaud havia-lhes atribuído na Teoria dos Campos Conceituais. À luz de nosso referencial teórico, poderíamos afirmar com base nesses resultados que a conceitualização dos objetos-modelo como elementos que ajudem a construir modelos teóricos parece depender fortemente das situações.

A existência de diferentes níveis de idealização do conceito-em-ação enfocado mostra a presença de diversos esquemas que os estudantes mobilizam para essas situações, mas é preciso lembrar que os esquemas são entidades dinâmicas: o mesmo sujeito que emprega um conceito-em-ação de "massa total" em determinada situação pode elaborar graus relativamente altos de idealização em outra situação, assim como pode enfrentar a mesma situação com diferentes categorias de conceitos-em-ação ao longo do tempo. Mas, enquanto o estudo desenvolvido aqui demonstra a variedade, como indicado no parágrafo anterior, investigar a história das situações implicaria realizar estudos longitudinais.

Em termos da perspectiva da RR de Karmiloff-Smith, também foi possível notar ao longo das entrevistas certa dificuldade de uma parcela dos participantes em trazer seus conhecimentos-em-ação para um nível explícito E3 (verbalizável). A tendência em considerar a preferência pelo centro da esfera como ponto de aplicação da força externa, por exemplo, em alguns casos não pôde ser verbalmente justificada pelo sujeito. Aqueles que puderem enunciar, por si mesmos, justificativas para essa preferência, são os que demonstraram alguma abstração do objeto físico que manipulavam: por exemplo, Theo, Eric e Sara, que tomam como conceito-em-ação o objeto-modelo centro de massa. Esse dado vai ao encontro da observação de Karmiloff-Smith de que a passagem de um nível para outro, mais explícito, seja ela própria uma forma de abstração.

Outro resultado que se destaca dos quadros do Capítulo 5 e dos resultados descritos é a baixa flexibilidade cognitiva do objeto-modelo centro de massa na condição de um conceito-em-ação. Mesmo os participantes que reconheceram a possibilidade de vislumbrar a esfera posta em movimento no terceiro ensaio imaginando o centro desta como o "ponto que concentra a massa", o uso desse conceito-em-ação

não ocorre no primeiro ensaio, com exceção de Davi. Ou seja, a baixa flexibilidade cognitiva traduz-se como um não-reconhecimento de certa situação como pertencente à mesma classe de outra, mais conhecida. Essa baixa flexibilidade faz com que o objeto-modelo em questão seja difícil de transportar para outros contextos, perdendo assim parte importante do seu caráter produtivo. Somada ao baixo uso de representações idealizadas e abstratas nos conceitos-em-ação referentes à distribuição da massa, esses resultados indicam que a integração de objetos-modelo aos esquemas dos estudantes exige a ocorrência de uma redescrição representacional (RR) dos objetos sensíveis com os quais os estudantes lidam na situação experimental, que muito frequentemente parece não estar ocorrendo nos casos analisados.

6.1.2 Modelos teóricos e teorias gerais

Nas situações propostas ao longo dos três ensaios, as respostas dependeriam basicamente da elaboração de teoremas-em-ação por parte dos sujeitos que pudessem servir como modelos teóricos daquelas situações. A análise desses teoremas-em-ação também mostrou a baixa flexibilidade cognitiva dos conceitos-em-ação porque, servindo estes últimos como "tijolos" com os quais os teoremas-em-ação são construídos, a sua não-utilização sinaliza, mesmo que implicitamente, o fato de não serem reconhecidos como pertinentes pelos sujeitos em situações nas quais poderiam sê-lo. Assim, por exemplo, no caso de Davi, os conceitos-em-ação "centro de massa" e "ponto de apoio" foram tidos como pertinentes na situação de determinação da condição de tombamento da caixinha, mas não o foram para a situação de comparação entre caixinhas com distribuições diferentes.

Quanto aos tipos de modelos téoricos desenvolvidos pelos participantes, notamos de forma bastante generalizada a convicção dos sujeitos na existência de uma relação ou "fórmula" que permitiria fazer a predição do comportamento do objeto estudado. A necessidade de tal fórmula ou relação é mencionada quase de forma

unânime pelos sujeitos quando se coloca a situação da possibilidade de previsão do comportamento do sistema anteriormente ou na ausência da experimentação. Essa observação indica uma conceitualização destacada de modelos teóricos como versão simplificadas de caixas-pretas: entidades que darão variáveis de saída em função das variáveis de entrada. O exemplo mais extremo nessa direção é oferecido por Alex, que ao enfrentar a situação da determinação das variáveis que influenciam o período do pêndulo, espontaneamente tomou a iniciativa de tentar encontrar a "fórmula" com seus dados experimentais e calculadora.

Além da opacidade dos modelos elaborados pelos participantes, também notamos que o emprego de objetos-modelo nas caixas-pretas que eles desenvolvem é raro e incipiente, dadas as dificuldades encontradas por eles para operar com abstrações e idealizações. Essa versão de caixas-pretas produzidas pelos participantes parece assim adquirir um caráter bem mais instrumentalista do que representacional, não podendo ser totalmente identificada nesse sentido com a proposição de "caixa-preta" como entendida no referencial bungeano. Essas abordagens ao modelo teórico desenvolvidas pelos sujeitos na ação consistem em uma espécie simplificada de caixas-pretas, reduzidas à sua função operacional.

Notamos também que, em uma parcela dos casos, o modelo teórico usado como teorema-em-ação é construído como resultado da produção de uma inferência a partir de outros teoremas-em-ação. Por exemplo, no segundo ensaio, alguns dos participantes apoiaram-se em teoremas-em-ação como a ideia de que o aumento da inclinação do plano altera a posição relativa entre o ponto de apoio e o centro de massa, entre outros teoremas-em-ação. Os conceitos-em-ação empregados nesse processo também variam entre os sujeitos: Davi empregou integralmente o centro de massa como conceito-em-ação nessa situação. Ivan não se referiu a algum ponto da caixinha como centro de massa ou centro de gravidade, mas apontou que a gravidade atua mais no lado da caixinha onde estão os bloquinhos e produziu uma inferência para a condição de tombamento baseada na componente da força peso ao longo do plano como conceito-em-ação. Theo utilizou o termo centro de gravidade, mas parecia pensar neste mais como um vetor do que como um ponto. De uma forma geral, foi possível notar uma

multiplicidade de caminhos que são diferentes desde o início, mesmo quando os participantes chegam a uma mesma resposta final. Essas observações reforçam a característica de complexidade e de não-linearidade do processo de modelização propostas por Gilbert e Justi (2016).

Por outro lado, o posicionamento mais homogêneo que foi demonstrado pelos participantes, em todos os ensaios, ocorreu na dimensão do reconhecimento de teorias gerais relacionadas às situações propostas. Todas essas situações poderiam, a princípio, ser modelizadas via elaboração de caixas-pretas como também pelo uso de teorias gerais já estudadas anteriormente pelos estudantes, aplicáveis ao campo conceitual considerado. Questionou-se então sobre a possibilidade de previsão do resultado acerca de cada situação, anteriormente ou independentemente da experimentação.

Um aspecto que se destaca nessas respostas é que, mesmo entre os que respondem afirmativamente, praticamente não houve menção nenhuma a teorias gerais como as Leis de Newton ou o Princípio de Conservação da Energia. Isso é particularmente significativo considerando-se que grande parte da prática de ensino de Física no primeiro ano escolar (série cursada pelos alunos no ano anterior ao da pesquisa) centra-se justamente na resolução de problemas similares, de forma teórica, com base nessas leis, especialmente na Segunda Lei de Newton. Tal é o caso de uma vasta gama de problemas como a queda livre, movimento no plano inclinado, movimento circular, o cálculo da aceleração de determinadas configurações de corpos, entre diversas outras variações. Em um grande número de casos, a resolução do problema consiste justamente na obtenção de um modelo teórico, em geral relacionado à aceleração do sistema a variáveis como massas, atrito e ângulos, que é derivado da Segunda Lei. Esse procedimento é, na verdade, muito mais comum nas práticas escolares do que a obtenção experimental de relações entre as variáveis de uma situação física.

Apesar disso, os sujeitos entrevistados nesse estudo parecem simplesmente não reconhecer qualquer lei geral a partir da qual seria possível obter o modelo desejado nesse caso. É preciso notar que uma das situações posta aqui é nova para os estudantes, apesar de já terem sido introduzidos a esse Campo Conceitual: o estudo do movimento

oscilatório não é abordado no primeiro ano do Ensino Médio. Esse resultado, no entanto, foi quase idêntico ao de outra situação conhecida e até clássica do primeiro ano do Ensino Médio, que é o movimento horizontal. Embora não se esperasse, de fato, uma explicação teórica detalhada, é significativo que nenhuma forma de lei do movimento ou condição de equilíbrio tenha sequer sido mencionada como relacionada às situações. A única exceção foi dada por Ivan, e ainda assim apenas no terceiro ensaio. Mesmo Ivan, no segundo ensaio, não fez nenhuma menção desse tipo, ainda que se lembrasse de haver resolvido um grande número de problemas envolvendo planos inclinados.

Não é o caso de que eles não conheçam versão escolar da Segunda Lei de Newton. O que nos parece uma interpretação mais plausível é que o *status* atribuído a essa equação não é o de uma estrutura teórica geral, potencialmente aplicável a qualquer parte da realidade a que se refere, mas apenas uma equação como qualquer outra. Isso significa dizer que é justamente o papel das teorias como "guias heurísticos" para a construção de modelos (CUSTÓDIO; PIETROCOLA, 2004) que estaria largamente ausente no esquema mobilizado pelos estudantes frente a essa questão, ou seja, o caráter de teorias gerais que esse tipo de conhecimento possui. Essa também parece-nos uma forma de redução da flexibilidade cognitiva, já que a teoria geral parece não se conectar com os conhecimentos-em-ação dos participantes acerca das situações estudadas, ao menos não na condição de possibilidade para a construção de modelos teóricos.

6.2 Contribuições para o ensino de Física e para a pesquisa em Ensino

Nas linhas que seguem, discutimos algumas das implicações desse estudo ao ensino de Física e à pesquisa na área. Algumas das conclusões e observações desenvolvidas podem derivar contribuições para ambos os campos, motivo pelo qual optamos por apresentá-las conjuntamente.

Uma contribuição do referencial bungeano de modelos transposto para o ensino é sua potencialidade em harmonizar diversos aspectos da modelização que tem sido destacados, por vezes isoladamente uns dos outros, na literatura sobre o tema. Nesse referencial, as relações analógicas como entendidas, por exemplo, na proposta *teaching-with-analogies* ou do modelo didático-analógico (METSALA; GLYNN, 1996; ADÚRIZ-BRAVO; MORALES, 2013), poderiam fazer parte da elaboração de objetos-modelo de objetos reais (mesmo não sendo a única fonte destes). Ao mesmo tempo, os modelos matemáticos (HESTENES, 1987; UHDEN et al, 2012) constituiriam uma componente importante do conhecimento que construímos sobre aqueles objetos, isto é, dos modelo teóricos que são feitos sobre os objetos-modelo. Ainda, ao teorizar sobre a possibilidade de modelizar pela via das caixas translúcidas, esse referencial evidencia o papel dos modelos científicos como mediadores entre a realidade e o conhecimento teórico (CARTWRIGHT, 1983; MORGAN; MORRISON, 1999). Evidentemente, não se pretende com isso sugerir que essa visão de modelos possa substituir as demais - que possuem várias outras características, nuances, objetivos e ênfases -, mas destacar a possibilidade de uma concepção que ajude a integrar diversos aspectos dos modelos que são relevantes ao ensino.

Embora a transposição das ideias de Mario Bunge tenha sido usada nesse estudo para orientar a busca por elementos da modelização na conceitualização dos estudantes, o referencial que foi desenvolvido aqui também é aplicável à proposição de atividades de ensino voltadas para a modelização em sala de aula. O caso do pêndulo simples, por exemplo, pode ser objeto de uma modelização com abordagem inicial de caixa-preta, com a obtenção das relações entre variáveis e das regularidades do pêndulo

(obviamente, mediante o direcionamento do professor) e, posteriormente, tornar-se mais translúcidas com a articulação com a teoria geral correspondente e a discussão conceitual do objeto-modelo criado. Esse poderia ser um caminho para a construção de modelos *de novo* (GILBERT; JUSTI, 2016). O objeto-modelo e a teoria geral aí empregados poderiam ser explicitados em outras situações, de modo a contribuir para a formação de novos modelos teóricos que os utilizem. O ponto a destacar é justamente a portabilidade dos elementos da modelização, porque ela poderá ajudar a desenvolver a flexibilidade cognitiva desses conhecimentos-em-ação. Isso é possível porque essa portabilidade significa que elementos como objetos-modelo e teorias gerais podem ser articulados de diversas maneiras de modo a construir um grande número de modelos teóricos dentro de um mesmo campo conceitual. Em adição, muitos outros campos conceituais, além da dinâmica de partículas, poderiam ensejar modelizações com esse direcionamento.

Passemos agora a discutir possíveis contribuições desse estudo do ponto de vista do desenvolvimento. Piaget e Garcia (2011) propõem uma interpretação da evolução da Ciência em termos das transições entre estádios ou etapas que se sucedem no decurso da história. O interesse principal nessa interpretação se encontra na busca por mecanismos que atuariam nos processos de passagem de uma etapa à seguinte. Ao analisarem, por exemplo, o desenvolvimento da mecânica desde os gregos até o século XVII, os autores identificam três formas assumidas por esses mecanismos que ajudam a evidenciar as transições ocorridas: a gradual eliminação das pseudonecessidades e pseudoimpossibilidades; a passagem dos atributos às relações; e a passagem das "causas últimas" para as dependências funcionais e sistemas de transformações. São esses mecanismos de passagem, mais do que os conteúdos das teorias aceitas historicamente, que constituem o objeto das comparações e paralelismos que os autores se propõem a identificar entre a psicogênese e a história das ciências.

Ao desenvolver uma interlocução entre essas considerações no contexto histórico com os estudos piagetianos sobre a psicogênese do conhecimento, os autores enfatizam que o mecanismo mais importante que essas duas instâncias guardam em comum está no segundo aspecto mencionado, isto é, na passagem dos predicados às

relações e depois aos sistemas de transformações. Esse mecanismo de passagem consiste em um processo geral que conduz do *intraobjetal* - a análise dos objetos - ao *interobjetal* - análise das relações entre os objetos - até o *transobjetal*, que se refere à construção de estruturas que permitiriam a integração daquelas relações.

Nesse contexto, foi inesperadamente significativa a tendência exibida pelos participantes desse estudo a desenvolver esquemas baseando-se em noções intraobjetais dos objetos-modelo envolvidos. Essa tendência parece revelar uma dificuldade em produzir abstrações e versões idealizadas dos objetos concretos, ou seja, objetos-modelo. Tais resultados indicam que aqueles mecanismos de passagem propostos por Piaget e Garcia (2011) ainda impõem desafios a adolescentes mesmo a partir dos 15-16 anos, período em que já se estabeleceria o pensamento formal que, segundo Piaget (1976) possibilita que objetos reais sejam substituídos por enunciados verbais, além de produzir uma inversão de sentido entre o real e o possível (PIAGET, 1976). Se nossas interpretações desses resultados estiverem corretas, a passagem do intra para o interobjetal parece constituir um desafio aos estudantes maior do que considerado usualmente nas práticas de ensino de Física, e mesmo do que as pesquisas piagetianas pareciam apontar. Isso é relevante porque, de forma geral, as considerações feitas nesse estudo conduziram-nos a destacar justamente a importância da conceitualização de objetos-modelo no desenvolvimento de uma modelização do real. Objetos-modelo são, por natureza, ideias; são inobserváveis e, portanto, não estão "dados". Contudo, estão presentes até mesmo em modelos mais próximos a caixas-pretas.

Essa dificuldade na elaboração de objetos-modelo por parte dos estudantes ajuda a compreender a problemática exposta no início dessa tese, isto é, a tendência destes a perceber o conhecimento científico como cópia da realidade, ou pelo menos como uma descrição direta desta (GEBERT, 1969; TABER, 2012). Afinal, na ausência de uma representação tal como um objeto-modelo, nada mais natural do que supor que os modelos teóricos ensinados pelos professor refiram-se aos objetos tais como são na realidade. Possivelmente, práticas de ensino mais tradicionais que enfatizem a apresentação direta de modelos teóricos, sem um cuidado maior com a construção dos objetos conceituais aos quais esses modelos se referem - que são objetos modelo -

negligenciem esse aspecto do desenvolvimento das habilidades de modelização dos estudantes.

Outro aspecto que se destacou nos resultados é a dependência entre os conceitos-em-ação e as situações em que eles são mobilizados pelos estudantes: enquanto algumas situações tendiam a suscitar na ação conceitos de natureza mais intraobjetal, outras pareciam promover noções mais interobjetais e até versões abstraídas do objeto-modelo pertinente. Isso mostra que essas situações, embora lancem mão do mesmo objeto-modelo principal e tenham em comum a mesma teoria geral, não são vistas pelos sujeitos como pertencentes a uma mesma classe, ou mesmo como simplesmente tendo essas características em comum. Tais observações indicam que a promoção da conceitualização dos estudantes envolve não só uma multiplicidade de situações para tratar de um mesmo conceito, mas também a explicitação dos objetos-modelo que podem servir de conceitos-em-ação a determinados conjuntos de situações. Ao contrário do que se espera que aconteça com o professor, esse reconhecimento não parece ser automático para os estudantes.

Piaget e Garcia (2011), ao desenvolverem sua análise epistemológica e psicogenética da história da ciência, optam por enfocar a obra de Newton para examinar os mecanismos de passagem (ao invés de Galileo), justificando que "*... a mecânica newtoniana é o* ***sistema*** *que vai substituir o* ***sistema*** *de Aristóteles na descrição e interpretação das leis do movimento...*" (PIAGET; GARCIA, 2011, p. 256, grifo dos autores). Ao menos de forma aproximada, o que Piaget e Garcia (2011) chamam de estruturas do nível transobjetal pode ser pensado como as teorias gerais no sentido bungeano e o destaque dado pelos autores a essas estruturas, enquanto grandes sistemas gerais de pensamento, permite perceber a relevância dessas entidades na integração dos conhecimentos, quer sejam escolares ou científicos. Trata-se de outro aspecto da modelização que mostrou-se surpreendentemente desafiador aos participantes, como já discutimos na seção anterior.

Contudo, os dados de que dispomos não permitem determinar se a origem desse não-reconhecimento das teorias gerais está nas restrições cognitivas dos estudantes ou nos próprios métodos de ensino. É possível, em princípio, que as teorias gerais

ensinadas no ano letivo anterior não tenham sido apresentadas como estruturas gerais de pensamento, em seu aspecto sistêmico. Em qualquer caso, esses resultados indicam a possibilidade de futuras pesquisas que busquem investigar a potencialidade de estratégias de ensino focadas na abordagem explícita de aspectos sistêmicos e heurísticos das teorias gerais.

Outro ponto que pudemos perceber e ilustrar ao longo da apresentação dos resultados é que a questão que os sujeitos escolhem atacar ao enfrentar uma dada situação não é necessariamente a mesma que foi proposta pela entrevistadora. Os sujeitos não apenas usaram seus conhecimentos-em-ação para agir e para responder, mas também para reformular as próprias questões que lhes eram apresentadas. Essa observação tem implicações para o ensino e para a pesquisa. Em primeiro lugar, não podemos ver nenhum motivo para que os estudantes não façam o mesmo nas situações regulares de ensino e aprendizagem, de fato acreditamos que eles certamente o façam. Essa é uma questão relevante pois, em situações desse tipo, os professores não tem condições de acessar seus processos de pensamento na profundidade com que fizemos aqui. Com relação à pesquisa, essa observação remete a pensar nos estudos que empregam questionários e entrevistas estruturadas para identificar as concepções dos estudantes e que as contrastam diretamente com as perguntas verbais do pesquisador, frequentemente tabulando de alguma forma as "certas" e "erradas". Estarão de fato pesquisador e estudante lidando com a mesma questão? Nesse ponto, a opção metodológica pelas entrevistas clínicas foi essencial para permitir o aprofundamento nos sentidos que os participantes atribuem aos conceitos.

Entendemos, à luz das considerações feitas nesse estudo, que a conceitualização das teorias gerais no sentido de sistemas transobjetais de pensamento, capazes de integrar o conhecimento de todo um microdomínio ou de um Campo Conceitual, é uma conquista conceitual importante a ser buscada pelo ensino de ciências, na medida em que este valorize as habilidades de modelização dos estudantes. Uma possibilidade nessa direção seria buscar tornar mais translúcidas as caixas-pretas por eles construídas, voltando-se a atenção para os papéis da idealização e abstração na produção de objetos-modelo e para as teorias gerais no sentido delineado acima. Essa transição gradual das

caixas-pretas para outras menos opacas envolveria portanto, do ponto de vista cognitivo, uma redescrição representacional (RR) dos conceitos-em-ação além de uma RR das próprias teorias gerais, cuja dinâmica específica é ainda uma questão em aberto.

Embora não possamos aqui delinear em detalhes uma RR desse tipo, nosso referencial teórico sobre modelização em conjunto com os dados dessa pesquisa pode indicar algumas aproximações. Em primeiro lugar, o modelo de RR na ordem I→E1→E2→E3 poderá ser útil para estudar a elaboração de modelos do tipo caixa-preta, como é o caso do próprio exemplo de equilíbro dos corpos estudado por Karmiloff-Smith (1992). Isso porque as ações dos sujeitos - por exemplo, em situações experimentais - são capazes de estimular novas redescrições representacionais, gerando novos conhecimentos-em-ação. Contudo, abordagens mais translúcidas certamente envolverão outros modelos de RR, porque não é razoável esperar que teorias gerais sejam construídas individualmente pelos estudantes, nem mesmo com base em um grande número de modelos teóricos iniciais. Teorias gerais poderão estar, por exemplo, codificadas inicialmente em forma E3 (verbal) e progressivamente tornarem-se operatórias ao serem empregadas na construção de modelos teóricos translúcidos e, com isso, tornarem-se também menos encapsuladas. Proposições e análises de modelos de RR para a modelização de situações no ensino, em diversos Campos Conceituais, poderão constituir futuros avanços no entendimento do processo de conceitualização.

REFERÊNCIAS

AAAS (American Association for the Advancement of Science). Benchmarks for science literacy: **A Project 2061 report**. New York, Oxford: 1993.

ABD-EL-KHALICK, Fouad; LEDERMAN, Norman G. The influence of history of science courses on students' views of nature of science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 37, n. 10, p. 1057-1095, 2000.

ACHINSTEIN, Peter. **Concepts of Science**. Baltimore: John Hopkins Press, 1968.

ADÚRIZ-BRAVO, Agustín; MORALES, Laura. El Concepto de Modelo en la Enseñanza de la Física − Consideraciones Epistemológicas, Didácticas y Retóricas. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 19, n.1, p.76-88, abr. 2002.

ADÚRIZ-BRAVO, Agustín. A 'semantic'view of scientific models for science education. **Science & Education**, v. 22, n. 7, p. 1593-1611, 2013.

ANGELL, C.; KIND, P. M.; HENRIKSEN, E. K; GUTTERSRUD, O. An empirical-mathematical modeling approach to upper secondary physics. **Physics Education**, v. 43, n. 3, 2008.

ASTOLFI, J. P. & DEVELAY, M. **A didática das ciências**. São Paulo : Papirus, 1995.

AUGÉ, Pierre S. **Restrições cognitivas e o desenvolvimento de concepções sobre queda dos corpos e ação física**. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal Fluminense, 2014.

BAGHERI-CROSSON, Roja; VENTURINI, Patrice; LEFEVRE, Richard. Invariants opératoires mobilisés en électromagnétisme et schemes associés: une étude de cas chez les étudiants du premier cycle universitaire. In: **Acte du Colloque Les processus de conceptualisation en débat: Hommage à Gérard Vergnaud**. Clichy-La Garenne, p. 813-823, 2004.

BAILER-JONES, Daniela. Models, Metaphors and Analogies. In: MACHAMER, Peter K.; SILBERSTEIN, Michael (Eds). **The Blackwell guide to the philosophy of science**. Copenhagen: Wiley-Blackwell, 2002.

BARBOSA, João Paulino; BORGES, Antônio. O entendimento dos estudantes sobre energia no início do ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 23, n. 2, p. 182-217, ago. 2006.

BLACK, Max. **Models and metaphors**: Studies in language and philosophy. New York: Cornell University Press, 1962.

BLUM, Werner; LEISS, Dominik. How do students and teachers deal with modelling problems. **Mathematical Modelling (ICTMA 12): Education, Engineering and Economics**. Chichester: Horwood Publishing, p. 222-231, 2007.

BLUM, Werner.; BORROMEO FERRI, Rita. Mathematical modelling: Can it be taught and learnt? **Journal of Mathematical Modelling and Application**, v. 1, n. 1, p. 45–58, 2009.

BOGDAN, Robert; BIKLEN, Sari. **Investigação qualitativa em educação**. Portugal: Porto Editora, 1994.

BONIOLO, Giovanni; BUDINICH, Paolo. The role of mathematics in physical sciences and Dirac's methodological revolution. In: **The role of mathematics in physical sciences**. Dordrecht: Springer, 2005. p. 75-96.

BORGES, Antônio Tarciso. Modelos mentais de eletromagnetismo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 15, n. 1, p. 7-31, 1998.

BORGES, Antônio Tarciso. Como evoluem os modelos mentais. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 1, n. 1, p. 66-92, 1999.

BORROMEO FERRI, Rita. Theoretical and empirical differentiations of phases in the modelling process. **ZDM**, v. 38, n. 2, p. 86-95, 2006.

BRANDÃO, Rafael Vasques; ARAUJO, Ives Solano; VEIT, Eliane Angela. A modelagem científica vista como um campo conceitual. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 507-545, 2011.

BRANDÃO, Rafael Vasques. **A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização real no ensino de física**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

BRASIL. **Orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**: Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC; SEMTEC, 2002.

BUCKLEY, Barbara C.; BOULTER, Carolyn J. Investigating the role of representations and expressed models in building mental models. In: GILBERT, John K; BOULTER, Carolyn (Eds). **Developing models in science education**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000. p. 119-135.

BUENO FILHO, Marco Antonio; FERNANDEZ, Carmen; MARZORATI, Liliana. Detecção dos esquemas de ação na perspectiva da teoria dos campos conceituais relativos à representação química em alunos do Ensino Superior. **Atas do VII Encontro Nacional de Pesquisa em Ciências**, p. 1-12, 2009.

BUNGE, Mario. Concepts of model. In: **Method, model and matter**. Springer Netherlands, p. 91-113, 1973a.

BUNGE, Mario. **Philosophy of physics**. Dordrecht: Reidel, 1973b.

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

BUNGE, Mario. **Semantics II:** interpretation and truth. Dordrecht: Reidel, 1974b.

BUNGE, Mario. **Treatise on basic philosophy:** Ontology I: the furniture of the world. Dordrecht: Reidel, 1977.

BUNGE, Mario. **La ciencia, su método y su filosofía**. Buenos Aires: Siglo Veinte, 1979.

BUNGE, Mario. **Epistemology & Methodology I**: Exploring the World. Dordrecht: Reidel, 1983.

BUNGE, Mario. **Epistemology and Methodology III**: Philosophy of Science and Technology. Dordrecht: Reidel, 1985.

BUNGE, Mario. Una caricatura de la ciencia: la novisima sociologia de la ciencia. **Interciencia**. Caracas, v.16, nº 2, p.69-77, abr. 1991.

BUNGE, M. **Intuición y Razón**. Buenos Aires: Sudamericana, 1996.

BUNGE, Mario. **Philosophy of science: from problem to theory**. Transaction Publishers, 1998.

BUNGE, Mario. **Física e filosofia**. São Paulo: Perspectiva, 2007.

BUTLER, Cathal. **Evaluating the utility and validity of the representational redescription model as a general model for cognitive development**. Tese de Doutorado. University of Hertfordshire. 2007.

CAMPBELL, Todd et al. A review of modeling pedagogies: Pedagogical functions, discursive acts, and technology in modeling instruction. **Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education**, v. 11, n. 1, p. 159-176, 2015.

CARNAP, Rudolf. **Foundations of logic and mathematics**. Chicago: Chicago University Press, 1939.

CARTWRIGHT, Nancy. **How the laws of physics lie**. Oxford: Clarendon Press, 1983.

CARTWRIGHT, Nancy. Capacities and abstractions. **Scientific explanation**, v. 13, p. 349-356, 1989.

CARTWRIGHT, Nancy; SHOMAR, Towfic; SUÁREZ, Mauricio. The tool box of science: Tools for the building of models with a superconductivity example.**Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities**, v. 44, p. 137-149, 1995.

CARVALHO JÚNIOR, Gabriel Dias de; AGUIAR JUNIOR, Orlando Gomes de. Os campos conceituais de Vergnaud como ferramenta para o planejamento didático. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 207-227, 2008.

CARVALHO JÚNIOR, Gabriel Dias de; PARRAT-DAYAN, Silvia. Historical outlines about the notion of schème in Piaget: the process of development of a concept. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, v. 96, n. 244, p. 522-540, 2015.

CASTORINA, José A.; CARRETERO, Mario. **Desenvolvimento Cognitivo e Educação:** O Início do Conhecimento-Volume 1. Porto Alegre: Penso Editora, 2014.

CHAKRAVARTTY, Anjan. The semantic or model-theoretic view of theories and scientific realism. **Synthese**, v. 127, n. 3, p. 325-345, 2001.

CHAMIZO, José A. A new definition of models and modeling in chemistry's teaching. **Science & Education**, v. 22, n. 7, p. 1613-1632, 2013.

CHEVALLARD, Yves. **La transposition didactique**: du savoir savant au savoir enseigné. Paris : La Penseé Sauvage, 1991.

CLEMENT, John. Learning via model construction and criticism. In: GLOVER, J.; RONNING, R.; REYNOLDS, C. (Eds). **Handbook of creativity**. Boston: Springer US, 1989. p. 341-381.

CLEMENT, John. Analysis of clinical interviews: Foundations and model viability. In: KELLY, A.; LESH, R. (Eds). **Handbook of research design in mathematics and science education**. London: Lawrence Erlbaum, 2000. p. 547-589.

CLOUGH, Michael P. Learners' responses to the demands of conceptual change: Considerations for effective nature of science instruction. **Science & Education**, v. 15, n. 5, p. 463-494, 2006.

COELHO, Ricardo Lopes. On the concept of force: How understanding its history can improve physics teaching. **Science & education**, v. 19, n. 1, p. 91, 2010.

COLINVAUX, Dominique. **Modelos e educação em Ciências**. Rio de Janeiro: Ravil, 1998.

COLL, Richard K.; TREAGUST, David F. Learners' mental models of metallic bonding: A cross-age study. **Science Education**, v. 87, n. 5, p. 685-707, 2003.

COLL, Richard K.; FRANCE, Bev; TAYLOR, Ian. The role of models/and analogies in science education: implications from research. **International Journal of Science Education**, v. 27, n. 2, p. 183-198, 2005.

COLL, Richard K.; LAJIUM, Denis. Modeling and the future of science learning. In: **Models and modeling**. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 3-21, 2011.

COSTA, Sayonara Salvador Cabral da; MOREIRA, Marco Antonio. Knowledge-in-action: an example with rigid body motion. **Research in Science & Technological Education**, v. 23, n. 1, p. 99-122, 2005.

CREW, Henry; de SALVIO, Alfonso. **Dialogues concerning two new sciences**, by Galileo Galilei (1638), translated by H. Crew and A. de Salvio. New York: Dover Publications Inc., 1914.

CUPANI, Alberto. A Filosofia da Ciencia de Mario Bunge e a questão do "Positivismo". **Manuscrito**, v. 19, n. 2, p. 113-142, 1991.

CUPANI, Alberto; PIETROCOLA, Maurício. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. especial, 2002.

CUSTÓDIO, José Francisco; PIETROCOLA, Maurício. Princípios nas ciências empíricas e o seu tratamento em livros didáticos. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 3, p. 383-399, 2004.

DELIZOICOV, Demétrio. **Didática geral**. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM, 2006.

DELVAL, Juan. **Introdução à prática do método clínico**: descobrindo o pensamento das crianças. São Paulo: Artmed, 2002.

DEVELAKI, Maria. The model-based view of scientific theories and the structuring of school science programmes. **Science & Education**, v. 16, n. 7, p. 725-749, 2007.

DRIVER, Rosalind; GUESNE, Edith; TIBERGHIEN, Andrée. Some features of children's ideas and their implications for teaching. **Children's ideas in science**, p. 193-201, 1985.

DRIVER, Rosalind; OLDHAM, Valerie. A constructivist approach to curriculum development in science. **Studies in Science Education**, v. 13, p. 105-122, 1986.

DRIVER, Rosalind. Students' conceptions and the learning of science. **International journal of science education**, v. 11, n. 5, p. 481-490, 1989.

DROUIN, Anne-Marie. Le modéle en questions. **Aster**, v.7, p.1-20, 1988.

DUIT, Reinders; GLYNN, Shawn. Mental Modelling. In: WELFORD, G.; OSBORNE, J.; SCOTT, P. (Eds.). **Research in Science Education in Europe**: Current Issues and Themes. London: Falmer Press, 1996, p. 166-176.

DUIT, Reinders; TREAGUST, David F. Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. **International journal of science education**, v. 25, n. 6, p. 671-688, 2003.

DUPIN, J. J.; JOHSUA, S. Analogies and "modeling analogies" in teaching: Some examples in basic electricity. **Science Education**, v. 73, n. 2, p. 207-224, 1989.

ESCUDERO, Consuelo; MOREIRA, Marco Antonio; CABALLERO, María Concesa. A research on undergraduate students' conceptualizations of physics notions related to non-sliding rotational motion. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 3, n. 1, p. 1, 2009.

FIGUEROA, Patricia Sureda; OTERO, María Rita. Nociones fundamentales de la Teoría de los Campos Conceptuales. **Revista Electronica de Investigacion en Educacion en Ciencias**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2011.

FLEISS, Joseph. **Statistical methods for rates and proportions**. New York: John Wiley, 1981.

FLEISS, Joseph; LEVIN, Bruce; PAIK, Myunghee Cho. **Statistical methods for rates and proportions**. Third Edition. New York: John Wiley & Sons, 2013.

FODOR, Jerry A. **The modularity of mind**: An essay on faculty psychology. Cambridge: MIT press, 1983.

FRANCO, Creso; COLINVAUX, Dominique; KRAPAS, Sonia; QUEIROZ, Gloria. A teoria piagetiana e os modelos mentais. In: BANKS LEITE, L. (Eds.). **Percursos Piagetianos**. São Paulo, Cortez, p. 187-206, 1997.

FRANCO, Creso. O desenvolvimento do método clínico e suas relações com as modificações na tradição de pesquisa piagetiana. In: BANKS LEITE, L. (Eds.). **Percursos Piagetianos**. São Paulo: Cortez, 1997.

GALAGOVSKY, Lydia R.; ADÚRIZ-BRAVO, Agustín. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 19, n. 2, p. 231-242, 2001.

GEBERT, H. Physical models. **Physics Education**, v. 4, pp. 117-118, 1969.

GIERE, Ronald. **Explaining Science**: A Cognitive Approach. Chicago: University of Chicago, 1988.

GIERE, Ronald N. An agent-based conception of models and scientific representation. **Synthese**, v. 172, n. 2, p. 269-281, 2010.

GILBERT, John K; OSBORNE, Roger J. The Use of Models in Science and Science Teaching. **European Journal of Science Education**, v. 2, n. 1, p. 3-13, 1980.

GILBERT, John K.; WATTS, D. Michael. Concepts, misconceptions and alternative conceptions: Changing perspectives in science education. **Studies in Science Education**, v. 10, n. 1, p. 61-98, 1983.

GILBERT, John K.; BOULTER, Carolyn J. Learning science through models and modelling. In: FRASER, B, TOBIN,K. (Eds). **International Handbook of Science Education** vol 2. London: Kluwer Academics, 1998. p. 53-66.

GILBERT, John K.; BOULTER, Carolyn; RUTHERFORD, Margaret. Models in explanations, Part 1: Horses for courses? **International Journal of Science Education**, v. 20, p. 83-97, 1998.

GILBERT, John K.; PIETROCOLA, Maurício; ZYLBERSZTAJN, Arden; FRANCO, Creso. Science and education: Notions of reality, theory and model. In: GILBERT, John K.; BOULTER, Carolyn. **Developing models in science education**. Dordrecht: Springer, 2000. p. 19-40.

GILBERT, John K. Models and Modelling: Routes to More Authentic Science Education. **International Journal of Science and Mathematics Education**, v.2, n. 2, p. 115-130, 2004.

GILBERT, John K.; JUSTI, Rosária. Models of Modelling. In: **Modelling-based Teaching in Science Education**. Springer International Publishing, 2016. p. 17-40.

GIL PÉREZ, Daniel et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação** (Bauru), v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GINSBURG, Herbert. The clinical interview in psychological research on mathematical thinking: Aims, rationales, techniques. **For the learning of mathematics**, v. 1, n.3, p. 4-11, 1981.

GINSBURG, Herbert. **Entering the child's mind: The clinical interview in psychological research and practice**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

GLYNN, Shawn M. Explaining science concepts: A teaching-with-analogies model. In: GLYNN, Shawn M.; YEANY, R.; BRITTON, B. (Eds). **The psychology of learning science**. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1991. p. 219-240.

GRANDY, Richard E. What are models and why do we need them? **Science & Education**, v. 12, n. 8, p. 773-777, 2003.

GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antonio. Mental models, conceptual models, and modelling. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 1, p. 1-11, 2000.

GRECA, Ileana M.; MOREIRA, Marco A. Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. **Science Education**, v. 86, n.1, p. 106–121, 2001.

GRECA, Ileana; SANTOS, Flávia. Dificuldades da Generalização das Estratégias de Modelação em Ciências: o Caso da Física e da Química. **Revista eletrônica Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 1, 2005.

GRINGS, Edi Terezinha de Oliveira; CABALLERO, Concesa; MOREIRA, Marco Antonio. Uma proposta didática para abordar o conceito de temperatura a partir de situações, à luz da teoria dos campos conceituais de Vergnaud. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 1, n. 1, 2008.

GROSSLIGHT, L.; UNGER, C.; JAY, E; SMITH, C. L. Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 28, 1991.

GUILLON, Alain. Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'Université Cergy Pontoise. **Didaskalia**, v. 7, p. 113–127, 1995.

HALLOUN, Ibrahim Abou; HESTENES, David. Modeling instruction in mechanics. **American Journal of Physics**, v. 55, n. 5, p. 455-462, 1987.

HARRÉ, Rom. Metaphor, model and mechanism. **Proceedings of the Aristotelian Society**, v. 60, p. 101–122, 1960.

HARRÉ, H. Rom. **Theories and things**. London, UK: Sheed and Ward, 1961.

HARRÉ, Rom; ROTHBART, Daniel. **Modeling:** Gateway to the Unknown: a Work by Rom Harré. Amsterdam: Elsevier, 2004.

HARRISON, Allan. G.; TREAGUST, David. F. Modelling in science lessons: Are there better ways to learn with models? **School Science and Mathematics**, v. 98, n.8, p. 420-429, 1998.

HARRISON, Allan G.; TREAGUST, David F. A typology of school science models. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 9, p. 1011-1026, 2000.

HARRISON, Allan G.; TREAGUST, David F. Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: A case study of multiple-model use in grade 11 chemistry. **Science Education**, v. 84, n. 3, p. 352-381, 2000b.

HARTMANN, Stephan. Modeling in philosophy of science. **Representation, evidence, and justification: Themes from Suppes**, v. 1, p. 95-121, 2008.

HESSE, Mary. **Models and Analogies in Science**. Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1966.

HESSEN, Johannes. **Teoria do conhecimento**. 7a ed. Coimbra: Armênio Amado, 1979.

HESTENES, David. Toward a modeling theory of physics instruction. **American journal of physics**, v. 55, n. 5, p. 440-454, 1987.

HODSON, Derek. Philosophy of Science, Science and Science Education. **Studies in Science Education**, v. 12, p. 25-57, 1985.

HODSON, Derek. Toward a philosophically more valid science curriculum. **Science education**, v. 72, n. 1, p. 19-40, 1988.

IZQUIERDO-AYMERICH, Mercè; ADÚRIZ-BRAVO, Agustín. Epistemological foundations of school science. **Science & Education**, v. 12, n. 1, p. 27-43, 2003.

JAMMER, Max. **Concepts of mass in contemporary physics and philosophy**. Princeton: Princeton University Press, 2000.

JOHNSON-LAIRD, Philip Nicholas. **Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness**. Cambridge: Harvard University Press, 1983.

JOHNSON-LAIRD, P. Mental models. In: POSNER, Michael. (Org.). **Foundations of Cognitive Science**. Cambridge: MIT Press, p. 469–99, 1990.

JUSTI, Rosaria; GILBERT, John K. History and philosophy of science through models: some challenges in the case of 'the atom'. **International journal of science education**, v. 22, n. 9, p. 993-1009, 2000.

JUSTI, Rosaria; GILBERT, John K. Modelling, teachers' views on the nature of modelling, implications for the education of modellers. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 4, p. 369–387, 2002.

JUSTI, Rosaria; GILBERT, John K. The Role of Analog Models in the Understanging of the Nature of Models in Chemistry. In: **Metaphor and analogy in science education**. Springer Netherlands, p. 119-130, 2006.

KARAM, Ricardo Avelar Sotomaior; PIETROCOLA, Maurício. Habilidades técnicas versus habilidades estruturantes: resolução de problemas e o papel da matemática como estruturante do pensamento físico. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 181-205, 2009.

KARMILOFF-SMITH, Annette; INHELDER, Bärbel. If you want to get ahead, get a theory. **Cognition**, v. 3, n. 3, p. 195-212, 1975.

KARMILOFF-SMITH, Annette. **Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science**. Cambridge: MIT press, 1992.

KNUUTILA, Tarja. **Models as epistemic artefacts**: Toward a non-representationalist account of scientific representation. Helsinki, Finland: University of Helsinki, 2005.

KNUUTTILA, Tarja; BOON, Mieke. How do models give us knowledge? The case of Carnot's ideal heat engine. **European journal for philosophy of science**, v. 1, n. 3, p. 309, 2011.

KOPONEN, Ismo Tapio. Models and modelling in physics education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. **Science & Education**, v. 16, n. 7, p. 751-773, 2007.

KRAPAS, Sonia et al. Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 2, n. 3, p. 185-202, 1997.

KRAPAS, Sonia; SANTOS, Paulo A. Modelagem do espalhamento Rayleigh da luz. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 19, n. 3, 2002.

LAMEU, Lucas de Paulo. **Efeito Fotoelétrico no Ensino Fundamental: Uma proposta à luz da Teoria dos Campos Conceituais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, 2014.

LANDIS, J. Richard; KOCH, Gary G. The measurement for observer agreement for categorial data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159 - 174, 1977.

LLANCAQUEO, Alfonso; CABALLERO, Concesa; MOREIRA, Marco Antonio. El aprendizaje del concepto de campo en física: una investigación exploratoria a luz de la teoría de Vergnaud. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 4, p. 399-417, 2003.

LEACH, John; SCOTT, Phil. Individual and sociocultural views of learning in science education. **Science & Education**, v. 12, n. 1, p. 91-113, 2003.

LEDERMAN, Norman G. Nature of science: Past, present, and future. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), **Handbook of Research on Science Education** (pp. 831 – 880). Mahwah, NJ: Erlbaum, 2007.

LEFKADITOU, Ageliki; KORFIATIS, Konstantinos; HOVARDAS, Tasos. Contextualising the teaching and learning of ecology: Historical and philosophical considerations. In: MATTHEWS, Michael (Ed.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Springer Netherlands, 2014. p. 523-550.

LIMÓN, Margarita. On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal. **Learning and instruction**, v. 11, n. 4, p. 357-380, 2001.

LIND, Gunter. Models in physics: Some pedagogical reflections based on the history of science. **European Journal of Science Education**, v. 2, n. 1, p. 15-23, 1980.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação**: Abordagens Qualitativas. São Paulo: Ed. Pedagógica e Universitária - EPU, 1986.

MACHADO, Juliana. **Modelização na formação inicial de professores de física**. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MACHADO, Juliana; BRAGA, Marco. Can the History of Science contribute to modelling in Physics teaching? **Science Education**, v. 25, p. 823 - 836, 2016.

MACHADO, Juliana; BRAGA, Marco. Modelização do Equilíbrio no Plano Inclinado: Um estudo clínico. **Enseñanza de Las Ciencias**, v. 1, p. 4433-4438, 2017.

MATHEUS, Thiago Alexandre Melo; SOUSA, Celia Maria Soares Gomes de; MOREIRA, Marco Antonio. A resolução de situações problemáticas experimentais em física geral à luz da teoria dos campos conceituais. In: **Anais do XVI Simpósio Nacional De Ensino De Física**, v. 16, 2005.

MATTHEWS, Michael R. A role for history and philosophy in science teaching. **Interchange**, v. 20, n. 2, p. 3-15, 1989.

MATTHEWS, Michael R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MATTHEWS, Michael R. **Time for science education**: How teaching the history and philosophy of pendulum motion can contribute to science literacy. New York: Kluwer Academic, 2000.

MATTHEWS, Michael R. Models in science and in science education: an introduction. **Science & Education**, v. 16, n. 7-8, p. 647-652, 2007.

MATTHEWS, Michael R. Mario Bunge, systematic philosophy and science education: An introduction. **Science & Education**, v. 21, n. 10, p. 1393-1403, 2012.

MCCLOSKEY, Michael. Naive theories of motion. In: GENTNER, D.; STEVENS, A. (Eds). **Mental models**. Hove: Psychology Press, 1983. p. 299-324.

MCCOMAS, William C. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. **Science & Education**, v. 17, p. 1249 – 1263, 2008.

MCMULLIN, Ernan. Galilean idealization. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, v. 16, n. 3, p. 247-273, 1985.

MEDEIROS, Alexandre; MEDEIROS, Cleide Farias de. Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, 2002.

MENEZES, Eduardo Diatahy Bezerra de. A sociologia de Jean Piaget: uma resposta a questões irritantes. In: BANKS-LEITE, L. **Percursos Piagetianos**. São Paulo: Cortez, p. 117-154, 1997.

MESSER, David J.; PINE, Karen J.; BUTLER, Cathal. Children's behaviour and cognitions across different balance tasks. **Learning and Instruction**, v. 18, n. 1, p. 42-53, 2008.

METSALA, Jamie L.; GLYNN, Shawn. **T**eaching with analogies: Building on the science textbook. **The Reading Teacher**, v. 49, n. 6, p. 490, 1996.

MOREIRA, Marco Antonio. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em ensino de ciências**, v. 7, n. 1, p. 7-29, 2002.

MOREIRA, Marco Antonio. Modelos mentais. **Investigações em ensino de ciências**, v. 1, n. 3, p. 193-232, 1996.

MORGAN, Mary S.; MORRISON, Margaret. **Models as mediators: Perspectives on natural and social science**. Cambridge : Cambridge University Press, 1999.

MORRISON, Margaret. Where have all the theories gone? **Philosophy of Science**, v. 74, n. 2, p. 195-228, 2007.

MORRISON, Margaret. Models as autonomous agents. **Ideas in Context**, v. 52, p. 38-65, 1999.

MORTIMER, Eduardo Fleury. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? **Investigações em ensino de ciências**, v. 1, n. 1, p. 20-39, 1996.

MOZZER, Nilmara B. **O Entendimento Conceitual do Processo de Dissolução a partir da Elaboração de Modelos e sob a Perspectiva da Teoria de Campos Conceituais**. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NAGEL, Ernest. **The Structure of Science**: Problems in the Logic of Scientific Explanation. New York: Harcourt, Brace & World, 1961.

NARDI, Roberto; GATTI, Sandra Regina Teodoro. Uma revisão sobre as investigações construtivistas nas últimas décadas: concepções espontâneas, mudança conceitual e ensino de ciências. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 6, n. 2, p. 129-150, 2008.

NERSESSIAN, Nancy. Constructing and instructing: The role of "abstraction techniques" in creating and learning physics. In: DUSCHL, Richard Alan; HAMILTON, Richard J. (Orgs.) **Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice**. New York: Suny Press, p. 48-68, 1992.

NERSESSIAN, Nancy J. Should physicists preach what they practice? In: BERNARDINI, C.; TARSITANI, C.; VICENTINI, M. (Eds). **Thinking physics for teaching**. New York: Springer US, 1995. p. 77-96.

NERSESSIAN, Nancy J. The cognitive basis of model-based reasoning in science. In: **The cognitive basis of science**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 133-153, 2002.

NERSESSIAN, Nancy J. **Creating scientific concepts**. Cambridge: MIT, 2008.

NIINILUOTO, Ilkka. **Critical Scientific Realism**. London: Oxford University Press, 2002.

OH, Phil Seok; OH, Sung Jin. What teachers of science need to know about models: An overview. **International Journal of Science Education**, v. 33, n. 8, p. 1109-1130, 2011.

ORMEROD, M. B. 'Real'models and physical properties (for teachers). **Physics Education**, v. 13, n. 5, p. 278, 1978.

OSBORNE, Roger J.; BELL, Beverley F.; GILBERT, John K. Science teaching and children's views of the world. **European Journal of Science Education**, v. 5, n. 1, p. 1-14, 1983.

OSBORNE, Roger J.; WITTROCK, Merlin C. Learning science: A generative process. **Science education**, v. 67, n. 4, p. 489-508, 1983.

OTERO, María Rita. La Notion de Situation: analysée depuis la Théorie des Champs Conceptuels, la Théorie des Situations, la Dialectique Outil-Object et la Théorie Anthropologique du Didactique. **Revista electrónica de investigación en educación en ciencias**, v. 5, n. 1, p. 42-53, 2010.

OTERO, María Rita; ARLEGO, Marcelo; PRODANOFF, Fabiana. Design, analysis and reformulation of a didactic sequence for teaching the special theory of relativity in high school. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 3401-1-3401-10, 2015.

PIAGET, Jean. **The Origins of Intelligence in Children**. New York: International University Press, 1952.

PIAGET, Jean. **Play, dreams and imitation in childhood**. Londres: Routledge & Kegan Paul, 1962.

PIAGET, Jean. **Biologie et connaissance**. Paris: Gallimard idées, 1973.

PIAGET, Jean; INHELDER, Bärbel. **Da lógica da criança à lógica do adolescente**. São Paulo: Pioneira, 1976.

PIAGET, Jean. **A equilibração das estruturas cognitivas: problema central do desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Zahar, 1976b.

PIAGET, Jean. **La psicología de la inteligencia**. Barcelona: Crítica, 1983.

PIAGET, Jean. **A representação do mundo na criança**. (3a. edição de 1947). São Paulo: Ideias e Letras, 2005 .

PIAGET, Jean; INHELDER, Bärbel. **A psicologia da criança**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Difel, 2011.

PIAGET, Jean; GARCIA, Rolando. **Psicogênese e História das Ciências**. Petrópolis: Vozes. (Trabalho original publicado em 1983), 2011.

PIAGET, Jean. **Epistemologia genética**. Tradução de Álvaro Cabral. 4. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2012.

PIETROCOLA, Maurício. Construção e realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em ensino de ciências**, v. 4, n. 3, p. 213-227, 1999.

PIETROCOLA, Maurício. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 1, p. 93-114, 2002.

PINE, Karen J.; MESSER, David J. Group collaboration effects and the explicitness of children's knowledge. **Cognitive Development**, v. 13, n. 1, p. 109-126, 1998.

PINE, Karen; MESSER, David J. What children do and what children know: looking beyond success using Karmiloff–Smith's RR framework. **New Ideas in Psychology**, v. 17, n. 1, p. 17-30, 1999.

PINE, Karen; MESSER, David. The development of representations as children learn about balancing. **British Journal of Developmental Psychology**, v. 21, n. 2, p. 285-301, 2003.

PINHEIRO, Terezinha de Fátima. **Aproximação entre a ciência do aluno na sala de aula da 1a série do 2o grau e a ciência dos cientistas**: uma discussão. 1996. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências da Educação, 1996.

PORTIDES, Demetris P. A theory of scientific model construction: The conceptual process of abstraction and concretisation. **Foundations of Science**, v. 10, n. 1, p. 67-88, 2005.

PORTIDES, Demetris.The Relation between Idealisation and Approximation in Scientific Model Construction. **Science & Education**, v. 16, n. 8, p. 699 – 724, ago. 2007

PORTIDES, Demetris. Seeking representations of phenomena: Phenomenological models. **Studies In History and Philosophy of Science Part A**, v. 42, n. 2, p. 334-341, 2011.

PORTIDES, Demetris. Idealization in Physics Modeling. In: EPSA11 **Perspectives and Foundational Problems in Philosophy of Science**. Springer International Publishing, p. 103-113, 2013.

POSNER, George J., STRIKE, K. A., HESON, P. W., GERTZOG, W.A. Accomodations of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. **Science Education**, v. 66, n. 22, p. 211-227, 1982

POSNER, George J.; GERTZOG, William A. The clinical interview and the measurement of conceptual change. **Science Education**, v. 66, n. 2, p. 195-209, 1982.

POZO, Juan Ignacio; GOMEZ CRESPO, Miguel Angel. The embodied nature of implicit theories: The consistency of ideas about the nature of matter. **Cognition and Instruction**, v. 23, n. 3, p. 351-387, 2005.

PREDIGER, Susanne. Aber wie sag ich es mathematisch? Empirische Befunde und Konsequenzen zum Lernen von Mathematik als Mittel zur Beschreibung von Welt. In D. Höttecke (Ed.) **Entwicklung naturwissenschaftlichen Denkens zwischen Phänomen und Systematik**:, Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Dresden 2009. Berlin: LIT-Verlag, pp. 6–20, 2010.

REICHENBACH, Hans. **Experience and Prediction**. Chicago: University of Chicago Press, 1938.

REZENDE JUNIOR, Mikael Frank. **O processo de conceitualização em situações diferenciadas na formação inicial de professores de Física.** 2006. 288 p. 2006. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RODRIGUEZ, Ruth. **Les équations différentielles comme outil de modélisation mathématique en Classe de Physique et de Mathématiques au lycée** : une étude demanuels et de processus de modélisation d'élèves en Terminale S. 500 p. Tese (Doutorado em Ecole doctorale de Mathématiques et Informatique- Sciences de Technologies de l'Information) – Université Joseph Fourier – Grenoble I, 2008.

ROQUE, Tatiana. Estabilidade: exigência física ou formalidade matemática? In: PIETROCOLA, M.; FREIRE JR., O. (Orgs). **Filosofia, Ciência e História: uma homenagem aos 40 anos de colaboração de Michel Paty com o Brasil**. São Paulo: Discurso Editorial, 2005.

SAGLAM, Ayse. **Les équations différentielles en mathématiques et en physique: étude des conditions de leur enseignement et caractérisation des rapports personnels des étudiants de première année d'université à cet objet de savoir**. 264f. 2004. Thèse (Doctorat em Sciences de Technologies de l'Information) - Université Joseph Fourier, Grenoble, 2004.

SALOMON, Gavriel; PERKINS, David N. Chapter 1: Individual and social aspects of learning. **Review of research in education**, v. 23, n. 1, p. 1-24, 1998.

SCHEFFLER, Guilherme L. **A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud e o Ensino de Radioatividade**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Trabalho de conclusão de curso para obtenção do grau de licenciado em Química. Orientador: Prof. Dr. José Cláudio del Pino, Porto Alegre, 2011.

SCHUCHARDT, Anita M.; SCHUNN, Christian D. Modeling scientific processes with mathematics equations enhances student qualitative conceptual understanding and quantitative problem solving. **Science Education**, v. 100, p. 290 - 320, 2016.

SEEL, Norbert M. Model-based learning: a synthesis of theory and research. **Education Techonology Research and Development**, v. 65, p 1-36 2017.

SHTULMAN, Andrew; VALCARCEL, Joshua. Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. **Cognition**, v. 124, n. 2, p. 209-215, 2012.

SIEGLER, Robert S. Three aspects of cognitive development. **Cognitive Psychology**, v. 8, n. 4, p. 481-520, 1976.

SILVA, João Alberto; FREZZA, Júnior Saccon. Aspectos metodológicos e constitutivos do pensamento do adulto. **Educar em revista**, n. 39, p. 191-205, 2011.

SMIT, J. J. A.; FINEGOLD, M. Models in physics: Perceptions held by final year prospective physical science teachers studying at South African universities. **International Journal of Science Education**, v. 17, n. 5, p. 621-634, 1995.

SOUSA, Célia Maria Soares Gomes; FÁVERO, Maria Helena. Análise de uma situação de resolução de problemas de física, em situação de interlocução entre um especialista e um novato, à luz da teoria dos campos conceituais de Vergnaud. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 55-75, 2002

STOCKMAN, Norman. **Anti-positivist theories of science**: critical rationalism, critical theory and scientific realism. Dordrecht: Reidel, 1983.

SUPPE, Frederick. **The Structure of Scientific Theories**. Illinois: University of Illinois Press, 1977.

SUPPE, Frederick. **The semantic conception of theories and scientific realism**. Illinois: University of Illinois Press, 1989.

SUPPES, Patrick. Models of Data. In: NAGEL, Ernest; SUPPES, Patrick; TARSKI, Alfred (Eds). **Logic, Methodology and Philosophy of Science**: Proceedings of the International Congress. Stanford: Stanford University Press, 1962.

TABER, Keith S. The natures of scientific thinking: Creativity as the handmaiden to logic in the development of public and personal knowledge. In: KHINE, M. S. (Ed). **Advances in Nature of Science Research**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 51-74.

UHDEN, O.; KARAM, R.; PIETROCOLA, M.; POSPIECH, G. Modelling mathematical reasoning in physics education. **Science & Education**, v. 21, n. 4, p. 485-506, 2012.

VAN DRIEL, Jan H.; VERLOOP, Nico. Teachers' knowledge of models and modelling in science. **International Journal of Science Education**, v. 21, n. 11, p. 1141-1153, 1999.

VAN FRAASSEN, Bas. **The Scientific Image**. Oxford: Clarendon Press, 1980.

VERGNAUD, Gérard. Psychologie du développement cognitif et didactique des mathématiques. **Grand N**, v. 38, p. 21-40, 1986.

VERGNAUD, Gérard. L'Elève Face à la Tâche: Problèmes à Résoudre, Difficultés à Surmonter. **European Journal of Psychology of Education**, v. 3, n. 1, p. 15-21, 1988.

VERGNAUD, Gérard. La formation des concepts scientifiques. Relire Vygotski et débattre avec lui aujourd'hui. **Enfance**, v. 42, n. 1, p. 111-118, 1989

VERGNAUD, Gérard. La théorie des champs conceptuels. **Recherches en Didactique des Mathématiques**, v. 10, n. 23, p. 133-170, 1990.

VERGNAUD, Gérard. La prise en compte de l'enseignant dans la théorie des champs conceptuels. In A. Bessot (Ed.), **Formation des enseignants et étude didactique de l'enseignant** (pp. 3-19). Grenoble: Laboratoire Leibniz-IMAG, 1992.

VERGNAUD, Gérard. Teoria dos campos conceituais. In: Seminário Internacional de Educação Matemática, 1., 1993, Rio de Janeiro. **Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática**, p. 1 - 26, 1993.

VERGNAUD, Gérard. Homomorphismes réel-représentation et signifié-signifiant: Exemples en mathématiques. **Didaskalia**, n. 5, p. 25-34, 1994.

VERGNAUD, Gérard. Towards a cognitive theory of practice. In: **Mathematics education as a research domain: A search for identity**. Springer Netherlands, p. 227-240, 1998.

VERGNAUD, Gerard; PLAISANCE, Eric. **As ciências da Educação**. Tradução Nadyr de Salles Penteado. São Paulo: Loyola, 2001.

VERGNAUD, Gérard. L'explication est-elle autre chose que la conceptualisation?. **Raisons éducatives**, p. 31-44, 2002.

VERGNAUD, Gérard. **Lev Vygotski**: pedagogo e pensador do nosso tempo. Porto Alegre: GEEMPA, 2004a.

VERGNAUD, Gérard. Un cadre général en guise d'introduction. **La nouvelle revue de l'AIS**, v. 27, p. 7-13, 2004b.

VERGNAUD, Gérard. ¿ En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo? **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 12, n. 2, p. 285-302, 2007a.

VERGNAUD, Gérard. Représentation et activité: deux concepts étroitement associés. **Recherches en Education**, v. 4, p. 9-22, 2007b.

VERGNAUD, Gérard. The theory of conceptual fields. **Human development**, v. 52, n. 2, p. 83-94, 2009.

VERGNAUD, Gérard. Au fond de l'action, la conceptualisation. In: **Savoirs théoriques et savoirs d'action**. Presses Universitaires de France, p. 275-292, 2011.

VERGNAUD, Gérard. Pourquoi la théorie des champs conceptuels? **Infancia y Aprendizaje**, v. 36, n. 2, p. 131-161, 2013.

VIVEIROS, Edval Rodrigues de. **Mindware semiótico-comunicativo: campos conceituais no ensino de física para deficientes visuais utilizando uma interface cérebro-computador**. 2013. 487 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências de Bauru, 2013.

VON GLASERSFELD, Ernst. Cognition, construction of knowledge, and teaching. **Synthese**, v. 80, n. 1, p. 121-140, 1989.

VON GLASERSFELD, Ernst. How do we mean? A constructivist sketch of semantics. **Cybernetics & Human Knowing**, v. 6, n. 1, p. 9-16, 1999.

VOSNIADOU, Stella; BREWER, William F. Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. **Cognitive psychology**, v. 24, n. 4, p. 535-585, 1992.

VOSNIADOU, Stella; IOANNIDES, Christos. From conceptual development to science education: A psychological point of view. **International journal of science education**, v. 20, n. 10, p. 1213-1230, 1998.

WEIL-BARAIS, A.; VERGNAUD, G. Students conception in Physics and Mathematics: biases and helps. In: CAVERNI, J. P.; FABRE, J. M.; GONZÁLEZ, M. (Eds.). **Cognitive biases**. North Holland: Elsevier Science Publishers, 1990. p. 69-84.

WERTSCH, James V. **Voices of the mind**: A Sociocultural Approach to Mediated action. Cambridge: Harvard University Press, 1991.

WESTPHAL, Murilo; PINHEIRO, Thais. C. A epistemologia de Mario Bunge e sua contribuição para o Ensino de Ciências. **Ciência e Educaçã**o (UNESP), Bauru - S.P., v. 10, n.3, p. 585-596, 2004.

APÊNDICE A - Protocolo das Entrevistas

Pêndulo simples

APRESENTAÇÃO

- Perguntar ao sujeito se ele reconhece o aparato, se já viu pêndulos, sabe o que é, como ele descreveria um pêndulo, o que sabe sobre o funcionamento deles?
- Todos os pêndulos são iguais, ou tem alguma diferença entre eles? Quais seriam as diferenças importantes?
- Essas são todas, ou tem mais alguma?
- Pra que serve um pêndulo? Como ele faz isso?
- Apresentar o aparato, mostrando o fio, o recipiente com massa, o conômetro, as variáveis.

APOSTAS

- **O tempo de ida e volta depende do que**?

Se ele disser: "do comprimento":

Depende como? Qual você acha que levará mais tempo, um fio longo ( ) ou um fio curto ( )?

hipóteses: fio longo, porque percorre uma distância maior.

Quanto maior? Se eu dobrar o comprimento, quantas vezes maior será o tempo?

fio curto: por que? _____

Se ele disser: "da massa":

Depende como? Qual você acha que levará mais tempo, três massas ( ) ou só uma ( )?

hipóteses: 1) três massas, porque na subida vai ser mais difícil faze-la subir.

2) uma só, porque o mais leve cai mais devagar.

- A altura inicial vai influenciar no tempo? Como? Não vai ( ) Sim, aumentando ( ) Sim, diminuindo ( ).
- A velocidade inicial vai influenciar no tempo? Como? Não vai ( ) Sim, aumentando ( ) Sim, diminuindo ( ).

REALIZAÇÃO DA TAREFA

- entregar a tabela e pedir ao sujeito para preenchê-la.

observar:

- o sujeito começa testando o T inicial? ( ) Sim ( ) Não.
- Inicialmente tenta variar o comprimento ( ) ou a massa ( )
- Considera a altura inicial de lançamento ( ) Sim ( ) Não
- Considera o impulso inicial dado ( ) Sim ( ) Não

Com base nessas observações, questionar a motivação para cada uma.

- Como você fez? quais passos? o que influencia no tempo?
- o comprimento influencia? aumentando ou diminuindo? por que você acha que é assim?

- a massa influencia? aumentando ou diminuindo? por que você acha que é assim?
- altura inicial influencia? ( ) Sim ( ) Não. Por que? Como?

DISCUSSÃO
- Se nós ficássemos por duas horas observando, o tempo ainda seria o mesmo? [*se disser que não*] Por que? [*se disser que é porque o movimento desvanece, fica mais fraco...]* o tempo depende da altura? *[intenção é ver se o sujeito chega a alguma versão do isocronismo]*
E então, o que acontece com o período depois de muito tempo?
- Se nós amarrássemos a bolinha no centro do fio, como ficaria o período? Maior, menor? Por que? *[intenção é ver se ele percebe que isso equivale a diminuir o comprimento]*
- E se, ao invés de usar o fio de nylon, nós usássemos um fio grosso e pesado, você esperaria alguma mudança no tempo? Se sim, qual? Se não, por que? *[intenção é ver se ele percebe que isso desloca o centro de massa]*
- Você acabou de regular o pêndulo para completar uma oscilação em X segundos. Se nós o
levássemos desse jeito para a Lua, ele levaria o mesmo tempo, ou um tempo diferente?
Por que? (se não) levaria um tempo maior ou menor? Como você sabe? *[intenção é ver se ele relaciona com a gravidade]*
- Vou te pedir pra resumir suas conclusões. Você pode listar as características do pêndulo? Qualquer pêndulo se comporta assim? Em que condições ele se comporta assim?
- Alguém que quisesse prever o funcionamento de um certo pêndulo, necessariamente precisa fazer todos esses passos que você fez? Por que? Como ele poderia prever o funcionamento de um pêndulo de outra forma?
[Se ele disser que precisaria] E se a gente quisesse construir um pêndulo gigante, que demorasse 3 minutos pra ir e volta? Tem algum jeito?
Existe alguma forma de fazer isso sem utilizar dados experimentais? [*intenção é ver se ele fala de teoria geral]*

<u>Caixinha no plano inclinado</u>

APRESENTAÇÃO
Mostrar o plano inclinado composto pelas réguas, a caixinha de fósforos e os bloquinhos que cabem na caixinha. Apontar a medida de altura do plano. Instruir a elevar bem lentamente,

APOSTA 1
- Dá pra saber em que altura a caixinha vazia vai tombar? *Se sim* Qual altura vai ser, pode me mostrar **enquanto eu seguro a caixinha, pra ela não cair**? Como você sabe que será esta altura?
Se não Mas existe um jeito, será que dá pra prever?

REALIZAÇÃO DA TAREFA
Pede-se ao sujeito manipular o sistema e verificar a altura de tombamento. _____ cm.
Se a gente colocar bloquinhos dentro da caixinha, isso vai influenciar a altura de queda?

APOSTA 2
- Eu gostaria de alcançar uma altura maior antes da caixinha tombar. Dá pra fazer isso? Como?
hipóteses:
1) colocando mais bloquinhos em baixo, assim fica mais estável. ( ) Por que? _____
2) colocando mais bloquinhos em cima. ( ) Por que? _____
3) mudando a base da caixinha ( )
4) Não dá ( ).

REALIZAÇÃO DA TAREFA
Pede-se para que o sujeito teste sua hipótese e reporte as conclusões.
Se hipótese 1) Como você explica que ela caiu logo? Será que não dá pra fazer essa tarefa? Ou será que tem outro jeito? *Se ela não disser nada, sugerir CM alto*
Se hipótese 2) Era isso que você esperava? E se eu quisesse que ela tombasse em uma altura menor do que ela tomba quando vazia, é possível? Como deveria fazer? *Se ele não disser nada, sugerir CM baixo.*
Se hipótese 3) Por que você espera que assim ela demore mais a tombar? Existe mais algum jeito, ou esse é o unico? *Se ele não disser nada, sugerir a variável dos bloquinhos*.
Se hipótese 4) *Se ele não disser nada, sugerir a variável dos bloquinhos*.

DISCUSSÃO
- Em que situação você obteve maior altura de tombamento?
- Por que com o peso em cima ela atinge maior altura?
- E se você fizesse o mesmo experimento com a caixinha totalmente cheia, o que esperaria que acontecesse? *Sugerir fazer*. Como você explica isso?
- O que provocou o tombamento da caixinha? Por que ela não tombou antes nem depois? *intenção é ver se relaciona com algum ponto do corpo*
- Se você repetir várias vezes, espera que o resultado seja diferente? *Há uma regularidade?*
- Se eu quisesse construir uma caixinha que tombe com 1 cm de altura, é possível? Como ela deveria ser?
- E se eu quisse construir uma que deixasse o plano reto, como uma parede? É possível? Como deveria ser?
- Você acha que é possível prever a altura de tombamento da caixinha sem fazer o experimento? Se sim, como? Se não, por que?

Lançamento horizontal

APRESENTAÇÃO
Usando um elástico para fornecer um impulso, uma bola pequena e leve é lançada horizontalmente numa calha.

APOSTA 1
- Onde você espera que a bolinha pare, aproximadamente?

REALIZAÇÃO DA TAREFA
O sujeito é convidado a realizar o experimento e comparar com a sua previsão. Caso tenha sido diferente do que previu, pede-se que ele fale sobre por quê acha que o resultado foi diferente.
Como você descreveria esse movimento, para uma pessoa cega?

APOSTA 2
- Se usarmos uma bolinha mais pesada, onde você espera que ela pare? antes ou depois da primeira?
Por que?

REALIZAÇÃO DA TAREFA 2
Oferecer uma bolinha mais pesada e mais volumosa do que a primeira e convidar o sujeito a fazer a experiência.
Caso ele tenha aposta que ela pára mais perto: Por que você acha que isso ocorreu?
Caso o sujeito diga que é por ser mais volumosa, repetir com uma bolinha pequena e pesada!
- O tamanho da bolinha é importante? Por que?

DISCUSSÃO
a) Por que a bolinha entra em movimento?
"Porque foi dado um impulso"
b) Por que a bolinha pára?
"Porque a força dela acabou"
Onde está essa força? Do que ela depende? O que é que faz ela acabar?
"O atrito"
Como você sabe?Onde está o atrito?
c) Há algo que você possa fazer para a bolinha ir mais longe? E menos longe?
"Dar mais força".
Esse é o único jeito, ou tem mais algum?
"Diminuir o atrito".
Como você poderia fazer isso? Ele poderia ser totalmente eliminado?
d) O que é preciso para a bolinha ir longe? E o que é preciso pra ele parar logo?
Como você sabe?
e) Por que isso fará ela ir mais longe (ou menos longe)?

Como você sabe?
f) *Se ele não sugerir isso antes:* Se não existisse nenhuma parede na frente, será que seria possível lançar uma bolinha que não parasse nunca? Por que sim, ou por que não?
- *Se ele falar em inércia: como você sabe disso? É possível provar isso experimentalmente?*
g) Faz diferença em que parte da bolinha você dá o peteleco? Por que? [*intenção é ver se ele fala em centro de massa]*

APÊNDICE B - TCLE

Este documento que você está lendo é chamado de Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Ele contém duas páginas com explicações sobre o estudo que você está sendo convidado a participar. Antes de decidir se deseja participar (de livre e espontânea vontade) você deverá ler e compreender todo o conteúdo. Ao final, caso decida participar, você será solicitado a assiná-lo e receberá uma via do mesmo.

Antes de assinar faça perguntas sobre tudo o que não tiver entendido bem. A equipe deste estudo responderá às suas perguntas a qualquer momento (antes, durante e após o estudo).

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO – TCLE

O Sr. (a) está sendo convidado (a) como voluntário (a) a participar do projeto de pesquisa "A Construção de Modelos no Ensino de Física: da Realidade à Conceitualização". Trata-se de um projeto de pesquisa cujo objetivo é investigar como ocorre o processo de desenvolvimento conceitual em crianças e adolescentes, com relação ao campo conceitual da mecânica.

Para este estudo adotaremos procedimentos da pesquisa qualitativa no qual pretendemos coletar dados sobre as ações e falas de crianças e adolescentes frente a algumas situações experimentais e teóricas. Essa coleta de dados ocorrerá a partir de anotações do pesquisador e gravação em aúdio e vídeo da entrevista com os participantes. A pesquisa traz os seguintes benefícios aos participantes: participarem de uma atividade que poderá contribuir ao seu desenvolvimento conceitual e contribuírem para o avanço do conhecimento didático sobre o processo de conceitualização. Como o instrumento de pesquisa é original, os participantes tem o risco de operarem uma ferramenta que será aperfeiçoada.

Assumimos o compromisso de confidencialidade dos dados e sigilo das informações que possam caracterizar os participantes do grupo. Assim, seus dados serão manuseados somente pelos pesquisadores do grupo de pesquisa e não será permitido o acesso a outras pessoas. O material com as suas informações (fitas, vídeos, entrevistas,

etc) ficará guardado sob a responsabilidade dos pesquisadores com a garantia de manutenção do sigilo e confidencialidade.

Os resultados deste trabalho poderão ser apresentados em encontros, congressos, simpósios, artigos em revistas, dissertações de mestrado, teses de doutorado, relatórios, etc. Entretanto, serão apresentados apenas os resultados obtidos, análises, conclusões, pareceres, etc, sem revelar o seu nome, a instituição a qual pertence ou qualquer outra informação que esteja relacionada à sua privacidade. Da mesma forma, não serão divulgadas as imagnes captadas por gravação de vídeo.

Para participar deste estudo o(a) Sr (a) não terá nenhum custo, nem receberá qualquer vantagem financeira. O (A) Sr(a) poderá solicitar esclarecimentos sobre o estudo em qualquer aspecto que desejar, a qualquer momento, mesmo depois de iniciada a pesquisa e estará livre para participar ou recusar-se a participar.

Poderá retirar seu consentimento ou interromper a participação a qualquer momento, mesmo depois de iniciado o processo. A sua participação é voluntária e a recusa em participar não acarretará qualquer penalidade.

Este estudo não possui nenhum tipo de risco que possa ameaçar sua integridade física ou psicológica. Caso a realização da pesquisa lhe provoque algum tipo de constrangimento você é livre para abandoná-lo a qualquer momento.

Os resultados da pesquisa, depois de finalizada, estarão à sua disposição, mantendo-se o sigilo dos demais participantes.

Este termo de consentimento encontra-se impresso em duas vias, sendo que uma via será arquivada pelo pesquisador responsável e a outra será fornecida a você. Todas as páginas do TCLE devem ser assinadas, onde pertinente, e rubricadas, onde não houver assinatura, por todos os envolvidos.

Eu, _____(participante da pesquisa), portador do documento de Identidade _____ fui informado(a) dos objetivos do estudo "A Construção de Modelos no Ensino de Física: da Realidade à Conceitualização", de maneira clara e detalhada e esclareci minhas

dúvidas. Sei que a qualquer momento poderei solicitar novas informações e modificar minha decisão de participar se assim o desejar.

Eu, _____(responsável, caso o participante da pesquisa seja menor de idade ou legalmente incapaz), portador do documento de Identidade _____ fui informado(a) dos objetivos do estudo "A Construção de Modelos no Ensino de Física: da Realidade à Conceitualização", de maneira clara e detalhada e esclareci minhas dúvidas. Cabe destacar que também fui informado da metodologia usada, da divulgação dos dados coletados e dos potenciais riscos da pesquisa. Sei que a qualquer momento poderei solicitar novas informações e modificar minha decisão de participar se assim o desejar.

Declaro que concordo em participar desse estudo, que recebi uma via deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE – e que me foi dada à oportunidade de esclarecer as minhas dúvidas.

Participante (Nome):

_____

_____
Participante (assinatura)

Participante (responsável): _____

_____
Participante (assinatura)

Pesquisador (Nome): _____

_____
Pesquisador (Assinatura)

Rio de Janeiro, _____ de _____ de 201__ .

Outros esclarecimentos podem ser obtidos com a coordenadora do projeto, Professora, **Ms. Juliana Machado.** Coordenação de Física – Centro Federal de Educação tecnológica do Rio de Janeiro – CEFET/RJ. Av. Maracanã, 229 – Maracanã. CEP: 31270-901- Rio de Janeiro - Rio de Janeiro. Fone: 21 2554 6079 ou 21 99799 3475

Email: juliana.fsc@gmail.com - lattes:http://lattes.cnpq.br/0431989749235576

CEP-IFRJ: Campus Nilópolis

Rua Lúcio Tavares nº 1045.

Bairro Centro, Nilópolis, Rio de Janeiro

CEP: 26530-060 Telefone: (21) 26911811 e-mail cep@ifrj.edu.br

APÊNDICE C - Protocolo para análise dos juízes

Caros juízes/as,

Com o objetivo de investigar a natureza das representações que estudantes de física utilizam sobre o papel da distribuição de massa dos corpos em um conjunto de situações do estudo da dinâmica, propus três ensaios aplicados na forma de entrevistas clínicas. Os dois primeiros ensaios contém três situações cada, e o último ensaio é formado por uma única situação. Um total de dez estudantes voluntários participaram das entrevistas. As entrevistas foram gravadas em vídeo, transcritas e analisadas, dando origem a um conjunto de seis categorias. Fiz uma seleção de unidades de análise de modo a incluir todos os alunos participantes para cada uma das situações. Por isso, cada situação tem dez unidades de análise.Abaixo, as categorias de análise são descritas e, na sequência, apresento os três ensaios e as respectivas unidades de análise. Nem todas as categorias são pertinentes a todos os ensaios. Para ajudar a avaliar a confiabilidade da minha análise, peço que indiquem, após cada unidade de análise, o número da categoria correspondente. Vocês também podem, se desejarem, opinar sobre a análise de uma forma geral e sobre a descrição das categorias. Desde já, agradeço muito pela ajuda!

PRIMEIRO ENSAIO



Apresenta-se um pêndulo, composto por um fino fio de nylon suspenso, com uma massa amarrada em sua extremidade inferior, que é posto a oscilar em um plano vertical. Um crônometro é disponibilizado para permitir medições do tempo de ida e volta do pêndulo.

Categorias

1. Produtora de força

Explicações que apresentam uma versão escolar da segunda lei de newton, que pode ser expressa como "força é igual a massa vezes aceleração" ou quanto maior a massa, maior a força; ou ainda, quanto maior a força ou impulso, maior aceleração.

2. Massa total

Explicações que recorrem a uma propriedade do **objeto em si** (geralmente é a propriedade de ser pesado ou de ser leve), sem consideração de relações entre ele e demais objetos, de seu contexto ou de sua estrutura. Levam em conta apenas a massa total por si mesma, sem considerações de como esta se distribui espacialmente ou como produz efeitos por meio de alguma relação com outra variável externa ao próprio objeto. Imaginam o corpo como um todo, sem alguma consideração sobre a distribuição de sua massa ao longo do seu volume.

3. Distribuição discreta

Explicações que levam em consideração a distribuição **discreta** de massa ou peso entre diferentes lados diferentes ou partes diferentes do corpo em questão ou consideram que forças atuam de forma diferente nos diferentes lados ou partes do corpo em questão ou ainda, na situação 2 do primeiro ensaio, que a mudança de posição da massa equivale a uma redução no comprimento do fio.

4. Centro de massa

Explicações que consideram que a mudança da distribuição espacial **contínua** de massa no sistema altera a posição do centro de massa, empregando a noção de centro de massa.

SITUAÇÃO 1

Questiona-se se a intensidade da massa na ponta do fio irá influenciar no tempo de ida e volta do pêndulo e pede-se para o participante justificar sua resposta.

1. "*porque... você aprende que força é igual a massa vezes aceleração. Se você tem uma massa maior, daí tipo, uma força maior"* [ ];
2. *"Ah, porque ele vai ficar mais pesado. "* [ ];
3. *"Quanto maior a massa, maior vai ser o impulso que ele vai ter, maior vai ser a força do movimento"* [ ];
4. *"Tipo, quando você vai pular de um prédio, se você é mais pesado, você chega primeiro"* [ ];
5. *"Eu vou na intuição. Eu não sei explicar"* [ ];
6. *"Assim, acho que se está mais leve, acho que ele vai mais rápido.* Por que você acha isso? *Não sei"* [ ];
7. *"Força igual a massa vezes aceleração. Se você tiver uma massa maior, a força vai ser maior"* [ ];
8. *"Porque normalmente, quando a gente leva muito peso... por exemplo, a minha mochila, quando a minha mochila está um pouco mais leve, eu consigo andar mais tranquila e vou mais rápido. Agora quando a mochila está mais pesada, eu vou um pouco mais devagar. Então deve ser por causa disso"* [ ];
9. *"Tem até uma fórmula de aceleração lá, que... a aceleração fica mais rápida"* [ ];
10. "*... como tem mais força pra baixo, por causa do peso, quando tem a massa mais elevada, a força para baixo aumenta"* [ ];

SITUAÇÃO 2

Questiona-se: Se nós amarrássemos a massa no centro do fio, como ficaria o tempo de ida e volta do pêndulo? Maior, menor, igual? Por que?

11. " *Porque agora a tração é aqui [aponta no meio do fio]. Então vai aumentar a velocidade. Aumentando a velocidade, diminui o tempo. O fio que sobrar não vai mudar muita coisa.* " [ ];
12. "*... é como se a corda que estivesse abaixo do peso não servisse para nada.* " [ ];
13. "*Se colocar aqui, não vai ser a mesma coisa que, tipo... puxar ele pra cima?*" [ ];

14. "*Se você conseguir jogar ele da mesma altura, por exemplo, jogo ele aqui, dessa altura [coloca o pêndulo em posição bem elevada], mas eu modificar aqui pela metade [aproxima o pêndulo do eixo, como se o fio tivesse metade do comprimento], ele vai ficar mais próximo, então ele vai ter um comprimento menor* [...] *Então ele vai levar menos tempo.*" [ ];
15. "*Acho que o exemplo seria o mesmo que eu colocasse ele aqui, assim [encurta o fio até metade de seu comprimento e deixa o pêndulo oscilar com este comprimento]"* [ ];
16. "*... virtualmente, seria a mesma coisa que você mudar o comprimento do fio. Se você colocasse isso aqui, seria equivalente ao comprimento do fio ser isso aqui [a metade].*" [ ];
17. "*Principalmente porque quando a gente tava com... fio mais longo, e você me perguntou se quando a gente fosse encurtar o tempo da ida e da volta fosse diminuir eu acreditei que não, porque a distância era igual. Então por o tempo ter... a velocidade ter aumentado, eu acredito que se você colocasse aqui assim [aponta para o meio do fio], talvez poderia ser diferente.* " [ ];
18. "*Sim... [...] Mas é tipo a mesma coisa que isso aqui [eleva o fio com o suporte de discos, obtendo um pêndulo com metade do comprimento inicial], mas tem um fio pra baixo.* " [ ];
19. "*Acho que diferente. Acho que menor.* [referindo-se ao período] Por que? "*Porque vai diminuir a corda... O fio né, vai diminuir."* [ ];
20. "*Outro tempo, porque seria a mesma coisa que você diminuir o fio!"* [ ];

SITUAÇÃO 3

Questiona-se: E se, ao invés de usar o fio de nylon fino e leve, nós usássemos um fio grosso e pesado, como ficaria o tempo de ida e volta do pêndulo? Maior, menor, igual? Por que?

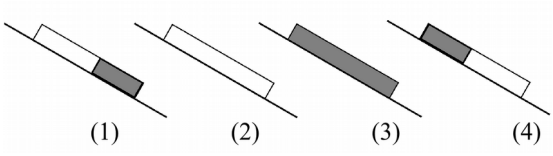
21. " *Eu achava que tipo... o peso ia faz diferença, mas não faz. Então eu acho que seria igual.* " [ ];
22. "*Eu acho que não, porque, pelo que eu testei, a massa do peso não modifica o período. Mesmo aumentando a massa do conjunto inteiro, acabaria sendo igual.* " [ ];
23. *"Ah, o tempo ia aumentar muito. Porque o que faz ele ir mais rápido, esse peso aqui [o suporte com discos], é esse peso. Quanto maior esse peso, e menor a massa do fio, mais rápido ele vai. Então ele consegue fazer esse movimento melhor [gesticulando imitando o movimento do pêndulo]. Agora, se você botar um cordão, com esse pesinho aqui, a diferença de peso deles vai ficar muito menor. Aí ele não vai conseguir fazer isso aqui [movimento de oscilação do pêndulo]* Por que? *Porque o peso... tá aqui [segurando o suporte com discos. Tem que ser maior isso aqui [suporte com discos], menor isso aqui [fio], mais rápido ele vai".* [ ];
24. "*Não ia influenciar não.* Por que? *Porque eu vi que... pelo que testei do peso, a diferença é muito pouca, então... Tipo [sorrindo], eu ainda estou na dúvida se o peso influencia ou não, entendeu? Mas eu acho que não, porque quando eu tirei os pesos ele manteve mais ou menos o tempo igual.* " [ ];

25. "*Se você botasse um objeto maior, mas com a mesma massa desse aqui* [aponta o suporte com discos]*, não iria modificar o movimento*" [ ];
26. "*... acho que o centro de massa por exemplo se alteraria. Seria meio equivalente como se pegasse todo esse peso e colocasse alterando a altura dele. Como a gente já viu, se alterar aqui [movimento o suporte com discos verticalmente, mostrando diferentes alturas de pêndulo], altera o período dele*" [ ];
27. "*A velocidade iria diminuir. [...] porque aí é mais peso pra se balançar."* [ ];
28. "*Porque ia ser a mesma coisa que se eu botasse mais peso aqui"* [ ];
29. "*Eu acho que ia alterar pela questão da densidade. Só. Porque se você tiver uma corda muito pesada [pausa], ela vai querer se estabilizar com mais violência."* [ ];
30. "*Acho que ele iria com velocidade... maior. Força. Força maior. Por causa do peso. "* [ ];

SEGUNDO ENSAIO - EQUILÍBRIO DA CAIXINHA NO PLANO INCLINADO



Uma caixinha de fósforos, apoiada sobre sua base estreita, é equilibrada sobre uma régua inclinada. Um pequeno alfinete colado à régua impede que a caixinha deslize para baixo. Aumenta-se a inclinação da régua lentamente até que a caixinha tombe. O experimento é repetido para quatro diferentes distribuições de massa (massa no na parte inferior, caixinha vazia, caixinha cheia, massa na parte superior).



Categorias

2. Massa total

Explicações que recorrem a uma propriedade do **objeto em si** (geralmente é a propriedade de ser pesado ou de ser leve), sem consideração de relações entre ele e demais objetos, de seu contexto ou de sua estrutura. Levam em conta apenas a massa total por si mesma, sem considerações de como esta se distribui espacialmente ou como produz efeitos por meio de alguma relação com outra variável externa ao próprio objeto. Imaginam o corpo como um todo, sem alguma consideração sobre a distribuição de sua massa ao longo do seu volume.

3. Distribuição discreta

Explicações que levam em consideração a distribuição **discreta** de massa ou peso entre diferentes lados diferentes ou partes diferentes do corpo em questão ou consideram que forças atuam de forma diferente nos diferentes lados ou partes do corpo em questão ou ainda, na situação 2 do primeiro ensaio, que a mudança de posição da massa equivale a uma redução no comprimento do fio.

5. Ponto de equilíbrio ou ponto de apoio

Explicações em que imaginam algum ponto do objeto como sendo o ponto que determina se o objeto permanece ou não em equilíbrio em alguma condição e/ou explicações em que consideram a condição de equilíbrio do corpo como determinada por uma relação entre o ponto de apoio e a distribuição de massa do corpo.

SITUAÇÃO 1
Antes de fazer o experimento, questiona-se o participante sobre qual ele espera que seja a ordem de tombamento para as diferentes inclinações, desde a primeira configuração a produzir tombamento até a última, e pede-se para justificar sua expectativa.

31. "*porque ela é mais leve [...] porque ele vai estar mais pesado."* [ ];
32. "*Porque eu acho que ele vai ficar mais preso aqui no alfinete* [quando a caixinha está totalmente cheia] [...] *eu acho que ela ia ficar mais presinha aqui"* [ ];
33. *"pra ela cair, eu acho que teria que ter mais peso desse lado"* [ ];
34. *"como esse é o lado que tem mais massa, esse é o lado que quer cair mais"* [ ];
35. "eu só penso assim: alguém cabeçudinho. Se ele estivesse com o pé aqui [alfinete] e a cabeça aqui [lado oposto da caixinha], seria mais fácil ele fazer assim [move a parte superior do corpo, simulando um tombamento]" [ ];
36. *"... isso aqui* [apontando para o ponto da caixinha em contato com o alfinete] *é como se fosse um eixo também, que segurasse a caixa enquanto ela faz essa trajetória* [de tombamento]. *E como o alfinete pega só um pedaço da caixa, e eles* [os bloquinhos] *estão distribuídos nessa reta, fica um pouco mais de peso para fora do alfinete do que no alfinete"* [ ];
37. *"porque pra inclinar isso aqui* [lado com os bloquinhos] *pra cá* [lado do tombamento]*, não precisa ser tão alto. Mas já o outro* [pesinhos pra cima]*, eu precisaria aumentar bastante. Se eu aumentasse o que eu aumentei ali* [elevasse a régua da mesma altura]*, já não vai dar tanto, ele já vai voltar."* [ ];
38. *"... o peso já está desse lado* [aponta o lado da caixinha mais próximo do alfinete]*, quando a gente levantar meio que só vai fazer com que...* [gesticula imitando o movimento de tombamento da caixinha] *virar.* [ ];
39. *"A partir do momento em que ele virar esse carrinho, se o centro de massa ele estiver... um pouquinho aqui do apoio, um pouquinho adiante do apoio, ele não cai. Mas se ele passar, aí ele cai, entendeu?"* [ ];
40. " *parece que o que faz tombar ela é esse lado de cá* [vértice superior da caixinha, no lado oposto ao alfinete]. *Entendeu? Parece que ela está assim* [coloca a caixinha sobre a régua e inclina-a] *e o que faz ela tombar é a força sobre isso aqui* [vértice superior da caixinha]" [ ]

SITUAÇÃO 2
Questiona-se o participante sobre qual é a condição necessária para que a caixinha tombe.

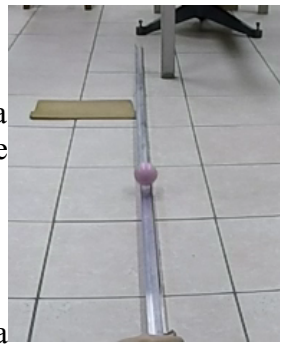
41. *" ... eu acho que ele chegou no ângulo máximo que ele aguentava. Do centro de gravidade. Aí ele virou* [faz a caixinha tombar algumas vezes, sorrindo]. [...] *Eu acho...*

acho que chega uma hora em que ela não aguenta mais ficar tipo retinha. Tem uma hora em que ela fica tipo... sei lá... isso é complicado" [ ];
42. "*Acho que é porque um lado fica mais pesado do que o outro. "* [ ];
43. "*Porque se existe alguma inclinação, mesmo que seja pequena, esse peso, ele não vai querer ficar inclinado"* [ ];
44. *"É porque eu imagino no... de novo, aquela história do centro de massa e tal. Porque o centro de massa eu imagino assim. Nesse caso ele está assim* [aponta o centro da caixinha, a caixinha encontra-se alinhada na horizontal]. *A partir do momento em que eu virar, quando ele passar desse alfinete aqui, que ele vai puxar e vai tombar. É porque eu lembro de um exemplo de um carrinho de golfe* [começa a desenhar no papel de rascunho]. *É que ele foi girar o carrinho de golfe e ele caiu, daí vem a explicação de por que é que ele caiu. O centro de massa dele é, sei lá, aqui, mais ou menos* [aponta aproximadamente o centro do carrinho desenhado]. *A partir do momento em que ele virar esse carrinho, se o centro de massa ele estiver... um pouquinho aqui do apoio, um pouquinho adiante do apoio, ele não cai. Mas se ele passar, aí ele cai, entendeu?"* [ ];
45. "*Porque se estiver muito inclinado, uma hora é inevitável e ele vai tombar.*" [ ];
46. *"Eu acho que é tipo a forma com que a força atua no corpo da caixa. Depende da gravidade. Acho que conforme você vai subindo, a gravidade vai atuando de forma diferente. Por exemplo... faz a divisão das forças entre o cosseno e o seno. Então eu acho que isso interfere."* [ ];
47. *"Quando ela está aqui* [régua na posição horizontal, sobre a mesa], *a força está para baixo.* [A caixinha está posicionada de maneira que os bloquinhos estão longe do alfinete]. [...] *Como vai se aproximando, e como esse peso está do lado oposto ao alfinete, a força da gravidade é maior desse lado [onde estão os bloquinhos], então é mais longe* [ênfase].. [ ];
48. " [o peso dentro da caixinha] *fica solto, querendo tombar"* [ ];
49. " [as forças] *começam assim, o peso e a normal se anulando* [gesticula mostrando que essas forças tem a mesma direção e sentidos opostos]*, aí quando ela vai fazendo isso aqui* [gesticula mostrando a mudança de direção da força normal à medida que a régua é inclinada]*, aí... aí a tendência é de a caixinha cair* " [ ];
50. "Então você acha que tem a ver com o centro de gravidade? *Do objeto.* [...] *Bom, eu tenho na minha cabeça assim, aqui* [no meio da caixinha] *tem uma seta apontando pra cá* [verticalmente para baixo, quando o plano está na horizontal]. *Quando mais eu for subindo, mais...* [vai inclinando a régua, mantendo a seta imaginária sempre perpendicular a ela] *ela vai tombando pra cá. Mas quando ela sai do eixo onde ela está sendo segurada, aí que ela cai.* Essa seta é que tem que sair do eixo, então? *É, a seta que está na minha cabeça!* [rindo]. Entendi! Mas o que essa seta representa, na sua cabeça? *A gravidade, tipo, o centro gravitacional dela. Como se fosse o equilíbrio. Até sair do equilíbrio e cair."* [ ];

SITUAÇÃO 3
Pede-se ao participante para comparar, especificamente, qual toma primeiro entre a caixinha totalmente cheia e totalmente vazia e pede-se para justificar sua expectativa.

51. *" A distribuição mais parecida seria a da caixinha vazia, porque ela tem o peso nela inteira. "*
[ ];
52. *"Acho que o que faz diferença é a diferença entre um lado e outro, e não a massa total da caixinha."* [ ];
53. "*... quanto mais pesadinha ela for, mas ela vai ficar... eu acho que mais ela aguenta* [...] *Ela fica mais presinha aqui* [na régua]" [ ];
54. "*Não, porque a minha explicação era que... com o peso, a caixinha preenchida com o peso, né, o peso fazia com que ela ficasse parada por mais tempo, aguentasse um pouco mais do que a caixinha vazia."* [ ];
55. *" Eu acho que vai tipo, compensar o que um teve no outro.* Explique um pouquinho mais como é que vai compensar. *Quando você bota o peso na frente, e o peso atrás, ela modifica o... assim, ela vai tender para um lado, ou ela vai tender para ter mais inclinação ou menos inclinação. Mas quando você bota o peso em tudo, ela equilibra. Então você não tem nenhum lado pesando mais do que o outro. Então ela vai... é como se, entre algumas aspas* [faz sinais de aspas com as mãos]*, estivesse vazio"* [ ];
56. *"Porque você vai estar... tipo... não sei, porque você vai estar voltando com o centro de gravidade da caixinha para o meio.* [...] *porque ela vai ficar totalmente preenchida, você não vai ter tipo... diferença de peso de um lado e de outro"* [ ];
57. *"Vai aumentar o peso... quanto maior massa, maior o peso, aí mais tendência pra ir pra baixo ele tem. "* [ ];
58. *"É o ponto do objeto que estabelece o equilíbrio, em que ele não cai."* [ ];
59. *"Por esse aqui* [refere-se a uma das caixinhas] *ser mais pesado, essa setinha aqui* [em um desenho feito anteriormente, representado o vetor da força peso]*, seria maior."* [ ];
60. *"Porque ia ficar muito leve, ia ficar tipo... "* [ ];

TERCEIRO ENSAIO - MOVIMENTO HORIZONTAL
SITUAÇÃO ÚNICA



Aplicando-lhe um pequeno impulso, uma bola pequena e leve é lançada horizontalmente numa calha. Questiona-se: Faz alguma diferença em que parte da bolinha você dá a batida? Por que?

Categorias
2. Massa total
Explicações que recorrem a uma propriedade do **objeto em si** (geralmente é a propriedade de ser pesado ou de ser leve), sem consideração de relações entre ele e demais objetos, de seu contexto ou de sua estrutura. Levam em conta apenas a massa total por si mesma, sem considerações de como esta se distribui espacialmente ou como produz efeitos por meio de alguma relação com outra variável externa ao próprio objeto. Imaginam o corpo como um todo, sem alguma consideração sobre a distribuição de sua massa ao longo do seu volume.

3. Distribuição discreta
Explicações que levam em consideração a distribuição **discreta** de massa ou peso entre diferentes lados diferentes ou partes diferentes do corpo em questão ou consideram que forças atuam de forma diferente nos diferentes lados ou partes do corpo em questão ou ainda, na situação 2 do primeiro ensaio, que a mudança de posição da massa equivale a uma redução no comprimento do fio.

6. Ponto que distribui a força aplicada ou que concentra a massa do objeto
Explicações em que imaginam um ponto do corpo que melhor distribui a força que nele é aplicada e/ou explicações em que imaginam um ponto do corpo que atuaria como se toda a massa do corpo estivesse concentrada naquele ponto.

61. *"Acho que quanto mais no centro você bater, mais rápido ela vai.* [...] *Porque está no meio dela... você vai dar a força dela para frente. Se bater mais pra cá [pro lado], você empurra pro lado, se bater em cima empurra pra baixo, em baixo, empurra pra cima... é melhor bater no meio, reto."* [ ];
62. "*Sim. É melhor no centro.* [...] *Porque distribui melhor a força. E também... o vetor da força vai ser reto, né? Se você bater reto, ele vai... Se você bater embaixo, uma parte da força vai reto e uma parte vai pra cima. Você vai perder essa parte que vai para cima. "* [ ];
63. "*Acho que não.* " Se for um pouco mais pra baixo, mais para cima, ou mais para o meio... você acha que isso faz diferença? [Silêncio de treze segundos, enquanto olha para a bolinha com expressão pensativa] *Não."* [ ];
64. "*Faz. Pra mim, faz.* [...] *Seria no centro da bola. Exatamente no centro.* Por que? *Porque aí ia aplicar a força na bola toda. Se fosse aqui* [pontos fora do centro] *iria perder bastante a... não sei se pode falar em perder força, mas ia perder bastante a energia que eu apliquei nela, pra ela girar. Mas se for aqui* [no centro] *já ia distribuir mais pra ela e ela iria mais rápido"* [ ];
65. "*Acho que faz. Acho que se você tipo... bater no centro... acho que ela vai... mais longe. Do que se bater em alguma outra parte. Porque no centro é onde concentra a massa dela. Aí se você bate aqui [no centro], eu acho que ela movimenta a bolinha por mais... tempo.* Tem algum motivo pra você achar que a massa se concentra no centro? *Não sei"* [ ];
66. " Se a batida for paralela ao chão... *Aí não faz diferença. Pode ser do meio pra baixo ou do meio pra cima. Não faz diferença. Só faz diferença se mudar a inclinação"* [ ];
67. *"*Sim, p*orque eu tenho a ideia de que a energia vai se distribuir mais facilmente para todo o corpo.* [...] *eu imagino que aqui é onde vai ser melhor distribuído* [no centro]. [Falando baixinho] *É, explicando eu não... não tenho* [balançando a cabeça negativamente]. " [ ];
68. "*Com certeza. Quanto mais embaixo, mais longe vai.* [...] *Acho que aqui* [no centro da bolinha] *você está aplicando uma força que está... meio que atingindo a massa inteira da bola. Aqui* [na parte de cima] *você só está atingindo... está atingindo mais a parte de cima. Se você bate no meio, você está... empurrando a bola como um todo* [...]

Porque se for em cima ou embaixo, você vai estar distribuindo mal essa força. Por exemplo, se voce bater bem aqui em cima [ponto no topo da bola]*, ela não vai... você não está aplicando uma força na massa inteira. Só na parte de cima*" [ ];

69. "*Faz. Se der aqui embaixo, ela sobe e vai mais devagar. Se der aqui, tipo, um lado vai pra cima, ela vai mais devagar. Se der bem no meio, ela mais forte , mais rápido. Porque... é como se a força fosse bem dividida, porque aqui ela ia pegar de raspão... é como se a força fosse mais bem dividida, a força se espalhasse mais.. sei lá, mai igual, não sei explicar.* [...] . *Se pegar aqui no lado, ela vai de lado, girando, meio que se espalha errado. "* [ ];

70. "*Eu costumo imaginar que é porque se você bater no meio ela não iria para os lados. Se você bater no meio, ela só vai pro lado. Mas se bater no lado, ela não só iria, mas também giraria... porque teria mais força de um lado que do outro. Aí no meio seria isso, você pegaria os dois lados, iria ela inteira, como se fosse uma barra*" [ ];