



Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP

Instituto de Física Gleb Wataghin — IFGW

Daniel dos Anjos Silva

Controvérsia entre Ação a Distância e Ação por Contato:
Abordagem Histórica com Implicações no Ensino

Campinas, 2019

Daniel dos Anjos Silva

Controvérsia entre Ação a Distância e Ação por Contato:
Abordagem Histórica com Implicações no Ensino

Dissertação de Mestrado defendida junto ao
Programa de Pós-Graduação Multiunidades
em Ensino de Ciências e Matemática, PECIM,
para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Matemática,
na área de Ensino de Ciências e Matemática

Orientador: Prof. Dr. André Koch Torres de Assis

O arquivo digital corresponde à versão final da dissertação defendida pelo
aluno Daniel dos Anjos Silva e orientada pelo Prof. Dr. André Koch Torres
de Assis.

Campinas, agosto de 2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Física Gleb Wataghin
Lucimeire de Oliveira Silva da Rocha - CRB 8/9174

Si38c Silva, Daniel dos Anjos, 1992-
Controvérsia entre ação a distância e ação por contato : abordagem histórica com implicações no ensino / Daniel dos Anjos Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: André Koch Torres de Assis.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Aprendizagem significativa. 3. Aprendizagem por atividades. 4. Ciência - História. I. Assis, André K. T. (André Koch Torres), 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física Gleb Wataghin. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Controversy between action at a distance and contact action : historical approach with implication in teaching

Palavras-chave em inglês:

Physics - Study and Teaching

Meaningful learning

Active learning

Science - History

Área de concentração: Ensino de Ciências e Matemática

Titulação: Mestre em Ensino de Ciências e Matemática

Banca examinadora:

André Koch Torres de Assis

José Joaquín Lunazzi

Edmundo Capelas de Oliveira

Data de defesa: 26-06-2019

Programa de Pós-Graduação: Multiunidades em Ensino de Ciências e Matemática

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2987-0494>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6392075544781883>

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. André Koch Torres de Assis

Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi

Prof. Dr. Edmundo Capelas de Oliveira

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa do Instituto de Física Gleb Wataghin.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me ajudaram de alguma maneira para a confecção dessa dissertação. Embora existam muitos, que algumas poucas páginas seriam insuficientes para descrever, alguns contribuíram de maneira direta para o produto final desse trabalho. Arriscarei-me a tentar elencar, com o cuidado de não cometer nenhuma injustiça (fato que julgo impossível), aqueles que mais diretamente influenciaram a dissertação que apresento como produto final desses dois anos de mestrado.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer minha família, meu pai Adélio e minha mãe Maria que sempre foram minha fonte de valores e motivação para seguir o percurso. Duas pessoas simples, que não tiveram instrução formal mas sobreviveram ao mundo com muita garra e cada qual com um tipo de inteligência que não se desenvolve sob livros e lista de exercícios. Pai Adélio, com sua absoluta empatia, raciocínio rápido e sua facilidade de comunicação, brincalhão, extrovertido, sempre com bom humor é capaz de falar sobre os assuntos mais polêmicos sem fazer inimigos. Mãe Maria, com sua firmeza moral e calma no trato, sempre consegue impor o respeito que a experiência de seus 71 anos de vida acumulou. Essas características, ainda que imperfeitamente, tento atingir, pois elas sempre foram lumes em minha trajetória.

À minha Tia Idalina que me ensinou os fenômenos da natureza sobre a ótica do saber popular, conhecimento muito precioso que ela acumulou durante seus mais de 80 anos em sua vida camponesa. Um pessoa que não conhece os símbolos formais que representam os números, mas na sua vida cotidiana lida com muita facilidade com operações sobre esses mesmos números, não conhece as letras mas seria capaz de versar sobre a vida, com construções verbais tão elaboradas que poderiam ser encontradas nos mais profundos literatos, que não conhece as leis de propagação dos raios de luz e nem os ângulos cravados em uma circunferência mas se orienta com absoluta precisão pela posição do sol no céu. A ela devo a explicação dos primeiros fenômenos.

A meus irmãos Ozias, Elias, Carlos (*in memoriam*) e minhas irmãs Adriana e Vanuza, que entre o convívio e as briguinhas entre irmãos sempre forneceram o apoio necessário, o ombro irmão e torceram pelo meu sucesso. A Meus Sobrinhos Davi, Deane, Gustavo, Eduardo, Nayara, Patrícia, Ruan,

Bryan, Lorenzo e Isabella que alegram a casa e para os quais, ao meu modo, tento dar algum exemplo que mereça ser seguido.

Quero agradecer a minha querida Bela, que foi coparticipe da escrita deste trabalho, seus comentários de observador leigo que vinham sempre seguidos de um olhar de confiança e admiração ajudaram a melhorar essa peça. Além disso, ela devotou a mim amor, carinho e muitos cuidados, essenciais para resistir os momentos mais difíceis (que foram muitos). Sem sua crença inabalável na minha capacidade de produzir esse trabalho ele jamais teria se concretizado.

A minha nova família, Luís, Gisele, Mariana, Rafaella, Davizinho, Vinícius, Edna (a amada *Cansativa*), Tio Zé, Terezinha e Dona Anna, que me recebeu de braços abertos como se sempre tivesse feito parte da sua casa e me deu o carinho da proximidade familiar que os muitos quilômetros de distância entre São Paulo e Bahia haviam me tirado.

Ao meu irmão que a biologia não deu mas que eu escolhi, José Ramos (Neto). Inhambupense que nem eu, baiano que nem eu, de família humilde que nem eu, retirante que nem eu, matuto que nem eu... só pode ser amigo meu. Com sua amizade, começa toda essa história. Aproveito pra agradecer a sua família, que é também minha, Nalva, Bibina, Dona Tita, Seu Zé de Alcides (*in memoriam*), Lene, Eliana e todos os outros.

Meus grandes amigos de empreitada, Márcio, Tarcísio, César, Fábio, Jow, Josenilton, Harley, Francisco, Matheus que conviveram comigo ao longo da graduação e nesses dois anos, a eles devo parte de minha formação. As conversas e debates, às vezes com tons apocalípticos mas sempre ornados pela mais refinada intelectualidade, que tive com meu amigo César me levaram a enxergar, ainda que pobremente, com os óculos de quem olha para a obra humana na terra, seus méritos e deméritos. A sabedoria, quase que “*matusalenica*”, de meus amigos Márcio e Tarsísio e suas habilidades de, com toques de humor, unir o sagrado e o profano nas mais profundas afirmações sobre a vida e a existência, me despertaram o senso estético. As questões colocadas sobre a interligação entre o mundo da abstração e o do concreto, seja as questões sobre como aplicar a matemática, colocadas pelo Josenilton, ou as implicações do mundo real sobre a subjetividade humana, levantadas pelo Fabinho, ou mesmo sobre as ingerências das condições sociais e de representação na vida prática da sociedade, trazidas diuturnamente pelo Matheus, fixaram em minhas análises a observância da causalidade. Ao meu grande amigo Edson Mano pelo apoio e pela amizade nesses longos anos de estrada.

As conversas sobre História, Linguística, Sociologia, Literatura e Política, que tive com o meu caro Francisco, regadas a cerveja, ou com Harley, regadas a chá, me fizeram conhecer mais sobre esses tópicos e aprender com profunda erudição desses mestres que me honram com sua amizade. Agradeço ao novo

companheiro Weverson.

Agradeço também a Francielly pela longa convivência e interesse na influência social da história da ciência. Giovanna pelas contribuições essenciais dadas às minhas reflexões sobre a estrutura do conhecimento e a sua aquisição. Jucier meu companheiro de sala e de programa pelas sempre relevantes discussões sobre a estrutura acadêmica e o modo como podemos contribuir para a melhoria do ensino no país.

Ao Mestre Guido, que dividiu o barco dos problemas da pós graduação e me brindou com bela amizade que tem aumentado ao longo desses dois anos, daquelas de chorar juntos nas derrotas (de preferência com cerveja) e se alegrar nas vitórias. Agradeço também a Noêmia, Walter e Alberto, por fazerem parte também dessa amizade.

Aos professores do Instituto federal Baiano, agradeço pela formação que me possibilitou chegar até aqui. Em especial aos meus padrinhos e amigos, Prof. Alex, Prof. Jacson e Profa. Alexandra, aos quais devo parte da minha história. Agradeço também a todos os amigos que fiz naquela instituição, os momentos que vivi com eles foram parte determinante da formação do meu caráter.

Queria agradecer também a todos os professores do PECIM, em especial à Profa. Silvia Figueirôa pela disciplina de História e Filosofia das Ciências Aplicadas ao Ensino, que foi de grande utilidade para a consolidação de algumas ideias presentes nessa dissertação. À Profa. Elisabeth Barolli (Beth), pela parceria e a amizade e por ter discutido sobre filosofia da ciência em sua disciplina de conhecimento de física escolar, essas discussões me deram base para escrever o capítulo 2 dessa dissertação. Sou grato de maneira muito especial ao Prof. Jorge Megid Neto por ter assumido minha orientação nos primeiros meses de mestrado. Aos meus antigos orientadores Profs. Waldyr Alves Rodrigues Jr. (*in memoriam*), Yuri Dimitrov Bozhkov e Lisandro Pavie Cardoso pela formação acadêmica e humana que me permitiu chegar até aqui.

Agradeço também aos amigos do LPCM, Guilherme, Fernanda, Dayane, Hugo e Vinícius, com os quais vivi momentos determinantes durante a graduação. Em especial a Rogério Marcon, pela inspiração que recebi das conversas que tive sobre a ciência em geral e por ver sua admiração estonteante pelos fenômenos da natureza e pelo funcionamento do cosmos.

Ao meu Orientador, Prof. André Koch Torres Assis, pela criteriosa e impecável orientação, seu rigor profissional, suas dicas preciosas para o futuro profissional e sua maneira afável de transmitir valores intelectuais e humanos.

Aos professores M. Menon e J. J. Lunazzi por suas sugestões construtivas relativas ao trabalho.

Por fim agradeço a CAPES pelo financiamento desse trabalho intelectual em tempos tão difíceis. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Processo 01P3703/2017.

RESUMO

Discute-se o método científico, a estrutura conceitual da física, a aprendizagem significativa e a utilização de controvérsias no ensino de ciências. Apresenta-se então o debate sobre como ocorre a interação entre os corpos, com a análise concentrada nas interações gravitacionais, elétricas e magnéticas. Em particular é discutido se a interação ocorre através de uma ação a distância entre os corpos, ou se ocorre por contato. Neste último caso concentra-se a análise no contato através do campo gravitacional, do campo elétrico ou do campo magnético. São apresentadas experiências simples que podem ser feitas em sala de aula ilustrando esses fenômenos. Em seguida mostra-se a explicação desses fenômenos por ação a distância, assim como por ação por contato através do campo. É apresentado um estudo crítico com as várias definições e propriedades do conceito de campo. São apresentadas implicações desse estudo para o ensino de física. Em particular analisa-se a comparação de modelos teóricos distintos para explicar um mesmo conjunto de fenômenos experimentais.

Palavras-chave: Ensino de física, aprendizagem significativa, controvérsia, ação a distância, ação por contato.

ABSTRACT

Title: Controversy between Action at a Distance and Contact Action: Historical Approach with Implications in Teaching

Abstract: We discuss the scientific method, the conceptual structure of physics, meaningful learning and the utilization of controversies in science teaching. We present the debate on the gravitational, electric and magnetic interaction between bodies. In particular, we discuss if the interaction takes place with the bodies at a distance from one another, or if it happens by contact. In this last situation, we analyze the contact through gravitational, electric and magnetic fields. We present simple experiments which can be utilized in the classroom illustrating these phenomena. We then explain these phenomena utilizing action at a distance and also utilizing contact through the field. We present a critical analysis of the many definitions and properties of the field concept. We discuss implications of this study for the teaching of physics. In particular, we analyze the comparison of different theoretical models in order to explain a single set of experimental phenomena.

Key-words: Physics teaching, meaningful learning, controversy, action at a distance, action by contact.

SUMÁRIO

1. <i>Introdução</i>	13
2. <i>Método Utilizado para a Construção da Proposta</i>	16
3. <i>O Método da Ciência</i>	20
4. <i>Os Conceitos e a Estrutura das Ciências Físicas</i>	27
5. <i>Aprendizagem Significativa</i>	32
5.1 <i>O Significado da Aprendizagem</i>	32
5.2 <i>A Utilização das Controvérsias no Ensino de Física</i>	34
6. <i>Preliminares</i>	37
7. <i>Alguns Trabalhos que fazem uso do Ensino Baseado em Controvérsias</i>	40
8. <i>Fenômenos Gravitacionais, Elétricos e Magnéticos</i>	44
8.1 <i>Gravitação</i>	44
8.2 <i>Eletricidade</i>	48
8.3 <i>Magnetismo</i>	53
9. <i>Explicações das Interações por Ação a Distância</i>	59
9.1 <i>Gravitação</i>	59
9.1.1 <i>Newton e a Lei da Gravitação Universal</i>	59
9.1.2 <i>Cotes e a Ação a Distância</i>	64
9.1.3 <i>Força Gravitacional nos Livros Didáticos</i>	64
9.1.4 <i>Explicação da Queda Livre com o Conceito de Força</i>	65
9.2 <i>Eletricidade</i>	66
9.2.1 <i>Coulomb e a Força Elétrica</i>	66
9.2.2 <i>Força Elétrica nos Livros Didáticos</i>	68
9.2.3 <i>Explicação da Interação Elétrica Utilizando o Conceito de Força</i>	69
9.3 <i>Magnetismo</i>	70

9.3.1	Coulomb e a Força Magnética	70
9.3.2	Força Magnética nos Livros Didáticos	71
9.3.3	Explicação da Interação entre Dois Ímãs Utilizando o Conceito de Força	74
10.	<i>Explicações das Interações Através da Ação por Contato</i>	77
10.1	Gravitação	77
10.2	Eleticidade	79
10.3	Magnetismo	80
11.	<i>Propriedades do Conceito de Campo</i>	83
11.1	Alguns Aspectos Históricos Ligados ao Conceito de Campo	83
11.2	O Campo Propagando-se no Espaço Vazio	88
11.3	O Campo Definido a Partir da Força	90
11.4	O Campo como Intermediário na Interação entre Corpos	91
11.5	As Teorias Modernas de Campo	93
12.	<i>A Comparação de Modelos como uma Estratégia de Ensino</i>	95
13.	<i>Considerações Finais</i>	99
	<i>Referências Bibliográficas</i>	101

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo em que tudo muda com velocidade cada vez maior, os conhecimentos se intercalam e às vezes se confundem. Ensinar com clareza e de modo efetivo tem sido tarefa cada vez mais árdua. Embora todas as áreas do conhecimento que se possam ensinar no ambiente escolar padeçam dessa mesma dificuldade, as que estão localizadas na grande área do ensino de ciências sempre se encontram em destaque nesse aspecto.

Ensinar ciências é uma empreitada que carrega diversas expectativas: a formação de cidadãos que compreendam o papel da ciência no mundo; as implicações tecnológicas levando em conta suas benesses e malefícios; a reposição do quadro de técnicos e cientistas, fato que é crucial para o desenvolvimento cívico e econômico de países com alto índice de desigualdade e pobreza como o nosso; e ainda a tarefa de aumentar o nível cultural da humanidade como instrumento de busca de respostas para questões existenciais e do funcionamento mais íntimo da natureza.

Entre as ciências naturais, a que expressa com maior nitidez as considerações anteriores é a física, tanto em termos das aspirações fundamentais da humanidade quanto na dificuldade de ensino. A física é uma ciência complexa. Ela compreende aspectos linguísticos, empíricos e epistemológicos e assim deve ser ensinada.

O que vemos na maioria das vezes no ensino de física é o foco direcionado para o lado linguístico, dando essencial centralidade aos métodos matemáticos. Poucas escolas de ensino médio possuem laboratórios de física. No ensino superior de ciências exatas temos laboratórios dedicados ao ensino de física. Apesar disso, a ênfase do ensino de física é quase sempre teórica, com uma bagagem muito forte de fórmulas matemáticas. O tratamento de muitas questões é baseado em formulações puramente algébricas, esquecendo que existe uma correspondência empírica para as fórmulas. Além disso, a física possui bases epistemológicas que merecem ser discutidas. Apresentar os conceitos negligenciando essa base epistemológica pode gerar alunos com déficit de entendimento de fenômenos da física e que cometam sérios equívocos ao discutirem o funcionamento da ciência. Essa constatação não se confunde com a ideia ingênua e perniciososa de defender que a física não deva abordar matematicamente os fenômenos que se propõe a estudar. Ao contrário disso,

a matemática deve ser empregada de maneira elegante e benéfica na física, sendo que as conexões dos fenômenos com os fundamentos da física também devem ser apresentadas.

Esse tipo de discussão, que faz parte do entendimento da ciência como um todo, mas que não está contida no aprendizado exclusivamente técnico do fazer científico, pode ser abordada com tratamentos históricos e filosóficos aos conteúdos ensinados, não nos esquecendo de trazer o lastro empírico para esses tratamentos. Em outras palavras, é possível e desejável trazer elementos da história e da filosofia da ciência sempre remetendo às observações empíricas feitas pelos primeiros cientistas que trabalharam na formulação de certos conceitos.

Não é de hoje que autores brasileiros defendem a utilização de abordagens históricas nos conteúdos ensinados, tanto assim que essa discussão chegou aos Parâmetros Curriculares Nacionais e tem sido objeto de artigos nas revistas de ensino de ciências. Apesar desse fato, a tradição de história da ciência no Brasil ainda é pequena se compararmos com outros países. Os currículos universitários ainda não acompanharam de maneira significativa a incorporação dessa discussão na formação de professores e cientistas. Essa triste realidade se impõe pela falta de quadros que possam ministrar disciplinas relacionadas à discussão de fundamentos históricos e filosóficos.

Muito embora a filosofia da ciência seja um campo de disputa mais explícito que a própria física, existe atualmente um conjunto de orientações que passou a ser majoritariamente consensual nas modernas escolas de pensamento, estando aliado aos princípios da moderna educação. A introdução de elementos filosóficos no ensino de física pode também ser utilizada como estratégia para a construção de significados para certos conceitos. A discussão da evolução dos conceitos físicos a partir da forma como a ciência é feita torna o ensino localizado e conectado ao desenvolvimento histórico e social. Os conceitos são formulados para explicar fenômenos ou conexões entre eles. Isso faz com que os alunos possa apreender o espírito que move as formulações teóricas na física e em outras ciências.

Adotamos esse ponto de vista tentando contribuir, dentro do ensino de ciências, buscando fornecer soluções para mitigar os problemas apresentados e assim perseguir a melhoria do ensino de física. Para isso apresentamos nesse trabalho uma proposta metodológica para ser aplicada em um curso superior de licenciatura em física ou, de maneira complementar, em cursos de ciências exatas (física, matemática ou engenharia). Nossa proposta tenta mesclar de modo ajustado duas dimensões do saber: forma e conteúdo. A forma se dá na apresentação do instrumento de ensino: o conflito de diferentes modelos para explicar os mesmos fenômenos. Esse instrumento é proposto porque acreditamos fortemente que o contraste entre visões diferentes sobre o mesmo

assunto enriquece o conhecimento do aluno e ajuda a dar significado às coisas aprendidas. O conteúdo retoma uma controvérsia entre duas abordagens para um problema fundamental para a física, que é o da interação entre corpos. As abordagens são: ação mediada por campo e ação a distância.

Esse trabalho é dividido em quatro partes, a primeira voltada a discutir os aspectos gerais e filosóficos que embasam o trabalho, a segunda e a terceira contendo o núcleo de conteúdos que visam dar forma e exemplificar os aspectos gerais discutidos na primeira parte e, finalmente, uma quarta parte que especifica como as partes anteriores podem gerar efeitos no ensino de ciências e em especial no ensino de física.

2. MÉTODO UTILIZADO PARA A CONSTRUÇÃO DA PROPOSTA

Esse é um trabalho desenvolvido em educação de ciências. Portanto, ele toma como instrumento os saberes pedagógicos e empresta conhecimentos de outras áreas, de maneira pragmática, com vistas a desenvolver técnicas que possibilitem uma melhor transferência dos saberes estabelecidos em uma dada área de conhecimento. Essa transferência, ou introdução em um campo erudito de pensamento, deve se dar de maneira que os estudantes introduzidos nessa nova cultura apresentem certo domínio de técnicas e de capacidade crítica na análise dos conteúdos que são objeto de estudo desse ambiente. Em última análise, ainda que os métodos específicos sejam variados, quando se trata do desenvolvimento em educação de ciências, existem orientações de procedimento e objetivos a atingir.

Devido ao fato de estar no domínio pedagógico, este trabalho é dotado de uma estrutura tridimensional: um eixo referente ao conteúdo da área dura que deva ser ensinado (no nosso caso a física), que corresponde ao saber técnico; outro eixo relativo às ciências cognitivas, que nos fornecem instrumentos a respeito de aspectos do aprendizado dos estudantes; e um terceiro eixo onde se concentram os valores da educação, que indicam a maneira de estabelecer compatibilidade entre o que conhecemos e a formação individual e coletiva. Por deter essa estrutura, esse trabalho é, por definição, uma obra híbrida em termos de conteúdos. A estrutura do conhecimento contido aqui é similar à descrita pela teoria de Schulman do conhecimento pedagógico.¹ Essa teoria representa o conhecimento útil para o ensino com duas dimensões: uma vertente ligada às capacidades e ciências cognitivas, juntamente com outra vertente ligada ao conteúdo de uma dada ciência dura. A educação em ciências é, portanto, uma metadisciplina que estuda os elementos de uma disciplina específica sobre o ponto de vista de como sua assimilação possa ser o melhor possível. Portanto, cabe-nos esclarecer como os elementos das disciplinas história, filosofia e física serão mobilizados, juntamente com os aspectos da cognição, para produzir a estratégia de abordagem que propomos aqui.

¹ [MK06].

O trabalho aqui desenvolvido, apesar de possuir muitos elementos históricos, não pode ser enquadrado como pesquisa histórica, já que apenas faz uso dela para estabelecer a proposta que apresentamos. Nossa pesquisa se constitui em uma proposta pedagógica que utiliza as controvérsias como um mecanismo para introduzir aspectos importantes da filosofia da ciência e da epistemologia da física.² Visamos auxiliar na formação de cientistas e professores com uma visão mais realista do trabalho científico e que possam transmitir isso em seus trabalhos ou fazer uso na preparação de aulas de física que diminuam consideravelmente o risco de que os alunos aprendam uma imagem da ciência que seja carregada de estereótipos.

No ponto relativo ao trabalho do pesquisador, é importante que ele o desenvolva com a consciência de que mesmo as teorias mais aceitas atualmente possuem explicações em aberto. Em alguns casos, possuem críticos que apontam possíveis incoerências internas. Mesmo admitindo que estas teorias sejam bem estruturadas ou aceitas majoritariamente pela comunidade científica, deve-se reconhecer que elas possuem limitantes e que algumas de suas conclusões podem ser frágeis. Mesmo que uma teoria seja amplamente aceita pela comunidade em certa época, isso não significa que ela seja uma verdade absoluta, mas apenas uma maneira eficiente, largamente consensual, de enxergar a natureza. No período de seu surgimento essa teoria disputava com outras teorias igualmente boas, que davam respostas a uma série de fenômenos que as teorias atuais também dão. Em algum momento do futuro, quando surgirem nessas novas teorias alguns paradoxos insolúveis, talvez sejam retomadas algumas abordagens esquecidas que possam conter a solução ou ao menos um caminho para resolver esses problemas. Isso já aconteceu diversas vezes no passado. A teoria atômica foi proposta pelos antigos gregos, abandonada por dois milênios, voltando à vida na revolução científica. O mesmo aconteceu com a teoria heliocêntrica. A teoria do éter já foi proposta e abandonada alternadamente diversas vezes ao longo da evolução científica.

A visão ingênua da física contribui para o julgamento equivocado sobre o trabalho de diversos campos da ciência. Retornando aos elementos utilizados na construção de nossa proposta, o trabalho traz também elementos de filosofia da ciência e da epistemologia. O método que utilizamos aqui se aproxima muito mais do método filosófico do que do método histórico. No século XX as áreas de história e filosofia da ciência se conectaram muitas vezes, embora o trabalho do historiador da ciência seja diferente do trabalho do filósofo da ciência. O historiador é impelido a produzir uma narrativa sobre

² A epistemologia constitui-se no ramo da filosofia que se ocupa do conhecimento científico.

um conjunto de fatos dando um sentido ao processo de produção científica. O filósofo, por sua vez, trata a ciência de um modo estático, objetivando extrair dos exemplos históricos leis gerais que possam ser expandidas para o funcionamento de boa parte da ciência.

Todas as disciplinas científicas, do ponto de vista epistemológico, procuram tratar e se debruçar sobre as leis de construção da própria área. Seu enfoque é visualizar com profundidade e com rigor os fundamentos que dão a base de sustentação de seus métodos e de seus conceitos mais primordiais. O problema central desse trabalho é de cunho epistemológico, sendo ele abordado integrado com os outros elementos.

O problema epistemológico que discutimos aqui é a concepção de interações na física, nos limitando às interações que concernem à física clássica. Para isso dividiremos a ideia de interação em duas categorias: interação por contato e interação a distância. Por contato entendemos tanto o contato direto entre dois corpos, quanto o contato indireto entre eles através de um agente mediador. O agente mediador considerado em nosso trabalho é o conceito de campo desenvolvido a partir do século XIX.

Historicamente essas duas categorias de interação sempre foram consideradas opostas entre si. Contudo, alguns livros didáticos atuais enxergam a ideia de campo como uma continuidade natural da ação a distância e não como uma concepção rival a esta que estende a necessidade do contato físico. A própria formulação da questão central desse trabalho já se tornaria assim facciosa, pois exigiria a tomada de posição sobre a concepção epistemológica da ideia de campo, que é um dos conceitos centrais estudados nessa dissertação. Apresentamos aqui a posição do autor desse trabalho para que os leitores a utilizem da maneira mais adequada possível. A posição que adotamos é a que parece manter a coerência, em maior grau, com o escopo desse trabalho. Aceitar que a ideia de campo é uma continuidade da ideia de ação a distância, muito embora seja uma posição difundida em alguns materiais didáticos da atualidade, não guarda coerência com o desenvolvimento histórico da formulação do conceito de campo.

Em relação ao conceito de campo, podemos separar três tipos de posições epistemológicas principais: os que acreditam no campo como entidade física, os que rechaçam o conceito de campo e os que assumem uma posição operacional em relação a esse conceito. Os que acreditam na estrutura física do campo o enxergam como agente físico que faz a intermediação da ação entre os corpos. Em segundo lugar existe a posição daqueles que consideram o campo como um erro conceitual, uma entidade difícil de ser classificada e que traz incoerências nas explicações quando elas são submetidas a uma análise rigorosa. Já a posição operacional não confere ao campo um sentido físico, mas aceitam sua formulação matemática como sendo de grande utilidade.

Pretendemos discutir essas posições epistemológicas trazendo os elementos da história da física que pontuaram as observações sobre os fenômenos. Sempre que possível faremos demonstrações simples enfatizando os aspectos fenomenológicos do que está sendo observado.

Seguimos essa estrutura nessa dissertação. Defendemos essa estratégia didática da utilização de controvérsia como uma fonte de elementos históricos e filosóficos que pode tornar mais significativa a aprendizagem da física.

3. O MÉTODO DA CIÊNCIA

Já estava presente no entendimento dos gregos, que o ato de nomear algo no mundo não significa rotular uma coisa específica, mas sim descrever um conjunto de propriedades. Estas propriedades definem uma classe de coisas que podem ser chamadas pelo mesmo nome. Ao pronunciar o nome ‘cadeira’, não queremos apontar um objeto singular no mundo, mas sim uma coleção de objetos que sirvam para sentar e possuam um tipo de recosto para as costas. Assim fazemos não só com os objetos mas também com as atividades humanas, a política, a arte e a ciência.

Assim como não queremos dizer que exista uma única forma de causar emoção, quando caracterizamos certa atividade como artística, também não parece haver um único modo de produzir o conhecimento que chamamos de científico. Em todas as atividades que damos o nome de científicas encontramos certo tipo de método, embora ele não seja uniforme.

O título do Capítulo convida à polêmica, pois poderia suscitar que a tese, aqui defendida, seria a existência de um método uno para toda atividade científica; não é o caso. Método é sinônimo de receita e também de processo sistemático. A intenção aqui é usar o segundo significado. O nosso entendimento é que, embora existam métodos variados para diferentes áreas científicas, ou mesmo dentro de uma mesma área em diferentes períodos da história, não parece existir ciência sem algum tipo de método.

A ciência é uma obra humana que se consolidou ao longo da história e, como tal, possuiu, em diversos momentos, entendimentos diferentes sobre suas atividades. A ciência descende da filosofia e, sobretudo, da arte de pensar. Para organizar o pensamento, a fim de obter um modo de legitimação das conclusões, os gregos já convencionavam o uso do processo dedutivo fundamentado pela lógica. Aristóteles reuniu um conjunto de trabalhos sobre lógica que postumamente foi chamado de “*Organon*”, palavra que significa “instrumento” ou “ferramenta”. Ou seja, a lógica seria o instrumento ou ferramenta básica para as investigações filosóficas. Esse método dedutivo serviu, por muito tempo, como o recurso utilizado para se fazer a ciência (ou a filosofia natural). Esse método supõe um sistema de regras em que se enunciam premissas gerais que induzem uma conclusão imediata sobre uma proposição mais particular ligada à proposição geral. Um exemplo disto é:

“os homens são mortais”, “Pedro é um homem”, logo “Pedro é mortal”. Se a primeira sentença se verifica, a última também o faz, pois “Pedro” é um caso particular de homens.

A ciência do período medieval foi metodologicamente dominada pela forma dedutiva de premissas teóricas, algo que foi também incorporado à matemática e dela nunca saiu¹. Foi ainda no final desse período, que se iniciou a mudança de concepção de metodologia científica, uma nova fase do fazer científico deslocada para práticas fundadas na experiência.² Os artesões, construtores e toda ordem daqueles que realizavam trabalho manual, em sua maioria analfabetos, extraíram conclusões sólidas das observações empíricas que em muitas ocasiões divergiam das conclusões da teoria. Essa nova tendência foi sintetizada na obra de Francis Bacon “*Novum Organum*” de 1620.³ Nessa obra Bacon defende um método que ficou conhecido como o “método da indução enumerativa”, que supunha que a observação de dados empíricos que permitiam a validação de sentenças particulares eram suficientes para induzir a validade de sentenças mais gerais. Por exemplo, usando este método, o ato de observar que uma série de pessoas conhecidas que escrevem com a mão esquerda possuem letra bonita, levará à formulação: “canhotos escrevem com letra bonita”.

Embora seja inegável que, geralmente, a indução de casos particulares bem conhecidos represente ao fundo um caso mais geral, a indução de uma conclusão particular para outra mais geral tinha o problema do contra exemplo. Contudo, as bases empíricas do método baconiano de fazer ciência não deveriam ser desprezadas. A simples indução enumerativa necessitava de algum melhoramento. Na primeira metade do século XX, em Viena, foi proposta uma sofisticação para o modo de fazer ciência.

O movimento conhecido como Círculo de Viena, por ter se iniciado como um grupo de discussões entre intelectuais Vienenses, legou para o mundo a corrente de pensamento denominada de positivismo lógico.⁴ O positivismo

¹ Na verdade, há uma tese apresentada no livro do Professor japonês Chikara Sasaki, *Introdução à Teoria da Ciência*, que defende que esse método dedutivo nasceu junto com a democracia, pois os gregos necessitavam debater. Esse método foi reunido e estruturado principalmente no livro *Os Elementos*, de Euclides, como aplicação à matemática, [Sas10, p. 59–74] e [Euc09].

² Essa tese de construção científica bastante difundida entre os historiadores da ciência foi defendida pelo sociólogo da ciência Edgar Zilsel em um ensaio do início do século XX, [Zil03]. No entanto, ela foi fartamente documentada pelo historiador da ciência italiano Paolo Rossi em outro ensaio, “*Os Filósofos e as Máquinas*”, [Ros89].

³ [Bac79]. Um estudo detalhado do papel das obras de Bacon para a construção da ciência moderna foi realizado pelo professor Paolo Rossi nos comentários feitos à tradução dos escritos filosóficos de Bacon para o italiano, [Bac75, págs. 9–97].

⁴ [Lun92, págs. 31–43].

lógico possui uma proposta, bem intencionada, de tornar claro quais são os conhecimentos que devem ser considerados científicos e os que não devem. Para atingir esse objetivo, os positivistas lógicos apresentaram um espécie de lista para a construção de uma teoria científica. Todas as atividades que não obedecessem aos critérios contidos nessa lista deveriam, portanto, serem categorizadas como não-científicas. Essa lista de critérios basicamente continha os desdobramentos das ideias kantianas.⁵ Ela teve também uma inspiração no sucesso impressionante que tinha se revelado a aplicação da matemática na física, vinda do recém terminado século XIX.⁶ Os critérios dos positivistas lógicos para a cientificidade de uma atividade, resumidamente, são:

- Todas as ciências, tanto naturais quanto humanas, devem ser tratadas com o mesmo método.
- O conhecimento é fruto da percepção, que é o processo de aplicação das regras da lógica e da matemática sobre os dados empíricos.
- As atividades científicas devem apresentar seus resultados e proposições em um conjunto de sentenças expressas na linguagem lógico-matemática.
- A essas sentenças ou a suas implicações imediatas deve ser permitido discutir sua veracidade através de testes experimentais (critério de “verificabilidade”).

Embora esse tipo de entendimento sobre a estrutura dos saberes científicos ainda tenha adeptos, perdeu muita força pela grande quantidade e qualidade de críticos incansáveis. Primeiro, dissidências do próprio movimento já na década de 30 do século XX, como é o caso emblemático do austríaco Karl Popper. Em segundo lugar, as críticas externas que foram coroadas no pós-guerra principalmente nos trabalhos de Thomas Kuhn e Paul Feyerabend nas décadas de 60 e 70.⁷

⁵ No seu livro *Crítica da Razão Pura* Kant propôs a construção de uma estrutura teórica produzida com conhecimentos que pudessem ser confiáveis, de “razão pura”, que são os conhecimentos dados a priori pela razão. Nesse livro aparecem a estrutura e os termos que são largamente utilizados pelos positivistas, [Kan94].

⁶ No final do século XIX os grandes tratados de física trazem uma preocupação muito evidente com a precisão da medida através dos instrumentos e de como isso poderia ser traduzido matematicamente. Pode-se facilmente perceber essa tendência verificando os primeiros capítulos dos tratados de autores como Maxwell, Peter Tait, Pierre Duhem, Lord Kelvin e tantos outros.

⁷ Thomas Kuhn com o ensaio “*A Estrutura das Revoluções Científicas*”, [Kuh82], e Paul Feyerabend com seu livro “*Contra o Método*”, [Fey11].

Karl Popper, o mais ilustre dissidente do Círculo de Viena, faz uma crítica ao positivismo-lógico pela sua rigidez completa. Contudo, sua contraproposta ao positivismo-lógico ainda funciona dentro da mesma estrutura lógico-positivista. As discordâncias entre o positivismo-lógico e o racionalismo popperiano, é que Popper é mais intenso quando rechaça o simples indutivismo baconiano e faz a ligação das sentenças abstratas com o mundo empírico por intermédio da falseabilidade ao invés do verificacionismo. A ideia de que as sentenças científicas, ou suas implicações imediatas, devem permitir serem verificadas é substituída pela admissão de que devam ser falseáveis. Apesar dessa modificação, os outros pressupostos do positivismo-lógico ainda podem ser encontrados na concepção de Popper, sobretudo o espírito do positivismo (um método preciso para a distinção entre o científico e o não-científico) ainda permanece inabalável em suas ideias.⁸

A estrutura do positivismo foi completamente abandonada e o seu espírito superado nas propostas de Kuhn e Feyerabend durante a revolução da concepção de filosofia da ciência feita no pós-guerra. A proposta de Kuhn, que é a concepção de maior consenso entre os pensadores da filosofia da ciência, desenvolve uma visão que retira a exclusividade do método de dizer se certas atividades são ou não corretas. Kuhn escreveu um ensaio onde analisa sobre a luz da história o desenvolvimento de áreas da ciência e grandes teorias científicas. Nessa análise, ele verifica que aquilo que determina a cientificidade dos conhecimentos de uma área de estudos científicos é um conjunto de práticas e pressupostos adotados por uma comunidade, o paradigma. Além disto, está também presente nas considerações de Kuhn, que uma área da ciência até se tornar consolidada passa por determinadas fases. Esse período em que a produção científica em um determinado campo ganha estabilidade, ou seja, quando existe um grau maior de consenso sobre o que é aceitável como produto científico daquele campo, recebe o nome de ciência normal.⁹

A concepção de Kuhn descreve o processo de nascimento e formação de um campo científico em uma narrativa de evolução, dando um papel fundamental para a comunidade científica. Para Kuhn, o próprio valor de verdadeiro e científico depende sensivelmente do consenso entre os membros da comunidade científica. A trajetória de uma área científica se dá da seguinte maneira:

- Surgem os fenômenos e as estruturas teóricas vigentes não fornecem explicações satisfatórias, o que faz com que, na tentativa de resolver essa questão, os pensadores que se dediquem a estudar esses fenômenos façam suas propostas de explicação. É o que se chama de fase pré-paradigmática.

⁸ [Pop75, págs. 27–58].

⁹ [Kuh82].

- Essas explicações se reúnem e, as correlatas, se compatibilizam formando assim algumas propostas de paradigmas, duas ou mais. Esses paradigmas são, de algum modo, razoavelmente bons para a explicação dos fenômenos, mas são incompatíveis entre si. Essa é a fase poliparadigmática, ou seja, na qual coexistem diversos paradigmas.
- Estes paradigmas, através de seus representantes, disputam a hegemonia entre si. Como não há um juiz externo para decidir sobre qual é mais verdadeiro, algum desses paradigmas, por competência de seus defensores ou por outro fatores externos a si, ganha a hegemonia e se torna o paradigma da área científica. A partir de então, a condição de juiz do grau de cientificidade de qualquer atividade desenvolvida no campo é o paradigma escolhido. Os outros paradigmas são eliminados ou postos à margem. Essa é a fase denominada de ciência normal.
- Na ciência normal começam a surgir novas demandas e conflitos que desafiam o paradigma, que são acompanhadas por um esforço por parte dos cientistas de compatibilização do paradigma com esses novos desafios. Essas tentativas nem sempre são bem sucedidas, havendo então uma perda de confiança no paradigma e um colapso da condição de ciência normal. Ao se romper o paradigma que garante a estabilidade da estrutura científica da área, surgem, em substituição a ele, outras propostas de novos paradigmas. Essa é a fase que Kuhn denomina de crise.
- Essas propostas de paradigma coexistem e rivalizam entre si em busca de conseguir a condição hegemônica. Estamos de volta à fase poliparadigmática.

De certa forma essa abordagem de Kuhn retoma e aprofunda a essência do método dialético de Heráclito e Hegel.

A revolução sobre o entendimento de como a ciência funciona causada pelas ideias de Kuhn foi tão impactante ao questionar a exclusividade do método como o legitimador do conhecimento científico, que permitiu o surgimento de convicções ainda mais radicais como a de Paul Feyerabend que recusava qualquer método específico como orientador da produção científica. Feyerabend propôs uma visão sobre o saber científico em que as atividades, pelo que podia ser comprovado pela história da ciência, eram mais compatíveis com uma espécie de anarquismo metodológico, admitindo uma maneira distinta de proceder para cada caso diferente na história das ciências. Para Feyerabend, a adoção de leis rígidas para a produção de ciências, mesmo na defesa de princípios sólidos para a obtenção de veracidade, se deviam a uma

deturpação do ensino, em que a suavização, ou até mesmo a modificação, de casos da história da ciência produzia uma versão higienizada desses casos, para fazer parecer que o método advogado pela comunidade científica estivesse presente na história. A sua concepção de ciência admitia um único princípio para a produção de ciência: *tudo vale*.¹⁰

Embora pareça chocante essa afirmação, se extrapolada do contexto pode aparentar um pouco mais radical do que o próprio Feyerabend almejava. O pânico causado pelas ideias advogadas por ele se deve mais pela sua auto-proclamação de anarquista epistemológico do que por suas ideias em si, que em geral são pouco conhecidas, sendo consideradas de modo estereotipado.

A noção comumente adotada das ideias de Feyerabend, de um anarquista epistemológico por assim dizer, é de alguém que recusa qualquer forma de procedimento metodológico. Esse entendimento vem da equivocada visão do anarquismo considerado como sendo contra toda forma de organização. Na verdade a confusão é causada por um artifício de linguagem similar ao que adotamos no título desse capítulo: os dois sentidos da palavra método. Adotamos o sentido da palavra método como sendo um procedimento sistemático, ao passo que Feyerabend quando direciona suas críticas o faz para o método entendido como receita. Se o título de seu livro mais famoso, *Contra o Método*,¹¹ for tomado com a palavra método tendo o significado de procedimento sistemático, o impacto será mais dramático do que se for tomado como receita.

Ainda que as ideias de Feyerabend continuem se mostrando muito radicais para aqueles que professam ordem no modo de fazer ciência, ele está muito longe de ser o terrorista metodológico ou o relativista desenfreado que lhe rotularam, como ele mesmo rechaça em seu livro de 1993.¹² Feyerabend, em última análise, se volta contra as “estórias” contadas sobre os feitos dos cientistas. Para ele os processos e suposições logicamente concatenadas atribuídas aos cientistas no momento da concepção de suas ideias não correspondiam ao que de fato havia ocorrido. Essa não era uma negativa do valor das conclusões científicas em si, mas uma desconfiança sobre a versão do processo empregado na empreitada para chegar a essas conclusões. No que concerne à crítica desenvolvida por Feyerabend ao até então convencido método para produzir ciência, podemos resumir seu pensamento em dois pontos:

- Os cientistas nem sempre utilizam hipóteses que se ajustam a teorias confirmadas ou corroboradas.

¹⁰ [Fey11] e [San18, págs. 24–35].

¹¹ [Fey11].

¹² [Fey11].

- Ao desenvolver suas explicações teóricas os cientistas nem sempre eliminam hipóteses que não se ajustam a fatos bem estabelecidos.

Nesse sentido o ‘vale tudo’ *Feyerabendiano* está relacionado com uma crença do autor sobre o processo de produção de uma conclusão científica, não no valor da conclusão em si. No ponto em questão a crítica de Feyerabend pode conter um fundo de justiça, embora não na intensidade e profundidade com as quais ele a formulou. É um consenso de que existe um conjunto de subjetividades que não são descritas por qualquer algoritmo, sendo que esse conjunto exerce um papel relevante no trabalho de qualquer cientista.

4. OS CONCEITOS E A ESTRUTURA DAS CIÊNCIAS FÍSICAS

Esse Capítulo é baseado em reflexões próprias com respeito à natureza da física. As inspirações vieram da leitura da introdução da obra *Theory of Heat* de J. C. Maxwell,¹ embora tenha fundamentos e conclusões diferentes.

A física como ciência possui uma estrutura multifacetada, que se entrelaça para produzir um resultado: aquilo que se pode chamar de descrição física da realidade. Das faces que a física apresenta, podemos distinguir três com clareza: uma face de caráter epistemológico, onde residem as preocupações relacionadas entre o que pode ser apreendido da descrição da natureza por intermédio da física; outra face de caráter linguístico que realiza a mediação entre os fenômenos naturais e sua representação simbólica, em termos matemáticos e proposições científicas de alta precisão; juntamente com uma terceira face que possui caráter empírico que cuida da transposição, de maneira sistemática, dos dados difusamente apresentados pela natureza para dados que possam ser incorporados ao discurso científico. De uma forma mais direta podemos dizer que a física é uma ciência que possui aspectos filosóficos, lógico-matemáticos e experimentais.

A face mais evidente dessas três é obviamente a terceira, a empírica. A ideia de produção científica em física está quase sempre ligada com a ideia de experimento. Ainda que isto represente apenas uma parte do trabalho, é muito comum que a imagem da física venha sempre acompanhada de manipulação de equipamentos aparentemente complicados, esferas metálicas por onde saem faíscas elétricas, aparelhos que lançam laser, entre outras imagens estereotipadas. Essa é, de certo modo, uma parte importante do trabalho da física, pois ela faz a conexão com o real, confere validade na estrutura construída e embasada pelas partes linguísticas e epistemológicas. A forte asserção do método experimental como elemento de confiabilidade da produção científica da física e o sucesso, em meados do século XVII, da interação imediata entre o universo da teoria e o universo da técnica, tornou a face experimental da física praticamente sinônimo de ciência natural.

A outra face, na qual está concentrada um profundo grau de relevância

¹ [Max75, págs. 1–31].

no modo de operar a física, é a linguística. Na caracterização das ciências, dividimos as atividades de pensamento, que costumamos caracterizar como científicas, em dois campos: As ciências factuais e as formais.² As ciências factuais, campo ao qual pertencem as ciências naturais e humanas, são caracterizadas deste modo por terem como objeto de estudo os fatos do mundo natural (a queda de um corpo, a formação de um mineral, o funcionamento biológico de uma célula, etc.) ou do universo social (o comportamento humano, as línguas, a relação entre o homem e o espaço, etc.). A categoria que é chamada de ciência formal inclui a matemática e a lógica, que são áreas que se ocupam da forma, dos aspectos formais do código utilizado na descrição dos conceitos, mas não dos fatos empíricos. A parte que envolve a teorização dos fenômenos físicos, com equações matemáticas e conceitos que permitam uma movimentação lógica do discurso da física, é a que estamos chamando de linguística. Quando expressamos como linguística uma das partes da física, embora seja ela uma ciência factual, estamos dizendo que existe uma parte dela que é estritamente formal, mas que desempenha um papel crucial na sua construção como ciência.

A terceira face, quase sempre esquecida quando se aborda uma ciência de metodologia experimental e de apelo significativo ao formalismo matemático, como é o caso da física, é a de caráter epistemológico. Quando se lida com a ideia de realidade e de natureza, surgem diversas questões filosóficas. Algumas questões dizem respeito ao limite até onde os métodos da física propiciam uma descrição da realidade. Existem alguns conceitos envolvidos nessa descrição que transcendem os domínios da experiência empírica e da formalidade.

Essas três faces se unem de maneira complexa no produto final da física. Aqui entendemos o complexo no sentido original do termo, que vem do latim: “*complexus*” (cercado, compreendido, abrangido) e também de “*plexus*” (trançado, tecido, entrelaçado). Ou seja, algo complexo significa, entre outras coisas, algo que foi tecido junto. Essas faces se entrelaçam para se expressarem no conjunto de leis da natureza que descrevem uma teoria física. Essa ligação entre os caracteres que compõem a física se realiza de maneira quase simbiótica.

Vamos dar um exemplo de como essa estrutura se apresenta dentro de uma teoria da física como a mecânica clássica, por exemplo. Ela é composta pelo conjunto das leis físicas denominadas *leis de Newton*, juntamente com a lei da gravitação universal. Essas leis são enunciados científicos que explicam fenômenos e podem se transformar em equações matemáticas. Nesse caso, já podemos notar a dependência estrita de duas características que

² [Lun92, págs. 17–30].

foram enunciadas anteriormente: a face linguística e a empírica. A parte linguística de cada lei se resume a uma sentença que, devido a certo grau de precisão, pode ser modelada em termos matemáticos e com isso utilizam-se todos os benefícios (que não são poucos) das ferramentas matemáticas desse modelo. Por outro lado, a construção de uma lei física e sua utilização, estão fixadas no caráter empírico dessa ciência. As leis são postuladas após uma observação criteriosa de um conjunto significativo de dados empíricos e, como consequência final, se destinam a prever e explicar fenômenos e dados de mesma natureza. Por isso, a ligação entre os aspectos empíricos e linguísticos da física fica explícita em qualquer teoria.

Embora no exemplo acima não apareça explicitamente o terceiro caráter, o filosófico, ele está como pano de fundo e desempenha um papel fundamental. Para escrever qualquer lei, que são os axiomas de uma teoria física, é necessário possuir algumas premissas anteriores, elementos primitivos, que são epistemologicamente fundamentados. As leis mecânicas referem-se a alguns conceitos ou entidades primitivas: a força, o tempo, o espaço, a massa etc. Esses conceitos primitivos precisam pré-existirem para que as leis sejam enunciadas. Esses conceitos são uma ponte filosoficamente concebida entre o empírico e o linguístico.

Podemos dar um exemplo dessa importância do caráter epistemológico da física dentro do própria mecânica. As três leis de Newton e a lei da gravitação, para serem enunciadas, necessitam implicitamente da ideia de espaço e tempo absolutos. Newton descreveu esses conceitos absolutos na sua obra fundamental, *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, conhecida usualmente por seu primeiro nome em latim, *Principia*.³ Eles são apresentados por Newton antes de suas leis do movimento. O espaço e o tempo absoluto são formulações teóricas abstratas que se fundam na concepção epistemológica de Newton e dos outros físicos que as adotaram.

A junção complexa desses três domínios na física é mediada pelos conceitos. O conceito pode ser uma grandeza física específica tal como massa, comprimento, força, carga, campo etc. Em outros casos o conceito envolve entidades mais abrangentes tais como, por exemplo, as ideias de espaço e tempo. Esses conceitos fazem a ligação entre os domínios, pois dependendo do momento podem ser encarados como uma variável de um processo matemático de maneira estritamente operacional, uma conexão direta entre a natureza e o mundo da teoria como algo que venha da medida experimental, ou ainda uma entidade conceitual vinda de reflexões epistemológicas.

Com o avanço da ciência, muitos conceitos científicos surgem a cada dia. Cada série de conceitos, sobretudo na física, deve ter sua base bem sólida

³ [New12a] e [New12b].

do ponto de vista teórico. Uma interpretação não muito criteriosa de um conceito pode levar vários anos para ser percebida e conduzir ao entendimento frágil. Além disso, um conceito definido de maneira vaga ou imprecisa pode necessitar a admissão de muitas premissas *ad hoc* para permitir de maneira satisfatória uma boa descrição da realidade física.

Alguns autores têm enfatizado a falta de discussão sobre os conceitos básicos da física como apontado, por exemplo, por Kneubil e Rubilotta:⁴

Em ambos os contextos (Ensino médio e Ensino Superior) a delimitação desses conceitos é feita através de exemplos e aplicações e, raramente são discutidos os seus significados explícitos.

Além desses aspectos, o conceito de campo é apontado como um assunto propício para a introdução da discussão histórica. No entanto, este tópico vem sendo subutilizado como aponta Rocha em um artigo publicado em 2009 na Revista Brasileira de Ensino de Física:⁵

Apesar de sua importância, quando o mesmo [conceito de campo] é apresentado em sala de aula geralmente somente seus aspectos matemático-conceituais são enfatizados deixando-se em segundo plano os aspectos histórico-conceituais, quando estes não são simplesmente ignorados.

Para complementar a crítica de Rocha é possível se falar também da potencialidade desse conceito como indutor de uma discussão sobre epistemologia da física e filosofia da ciência.

Este conceito é um dos mais centrais no ensino de eletromagnetismo. Já existem alguns trabalhos que recuperam de maneira histórica o desenvolvimento e o estabelecimento do importante papel desse conceito. Um exemplo é o artigo *The Origins of the Field Concept in Physics*.⁶ Neste trabalho de 2002 McMullin apresenta as ideias embrionárias que antecederam o estabelecimento do conceito de campo. Coloca como uma constante quase consensual a refutação da ideia de ação a distância.

Essa falta de discussão, aliada à própria dificuldade intrínseca ao caráter abstrato de alguns desses conceitos, leva o aluno a adquirir uma concepção apenas superficial das bases da física. Uma visão semelhante, referindo-se à ciência como um todo, foi apresentada por Leite e Almeida:⁷

⁴ [KR13, pág. 2].

⁵ [Roc09].

⁶ [McM02].

⁷ [LA01].

As limitações no entendimento da metalinguagem da ciência dificultam a interpretação dos textos que os alunos leem ou das aulas a que assistem e reduzem as capacidades de aprendizagem.

Existe toda uma problemática associada ao ensino e entendimento da linguagem científica. Além disso, temos a constatação da falta de discussão de conceitos fundamentais para o conhecimento da física, em especial o conceito de campo gravitacional e eletromagnético. Estes conceitos embasam a mais vasta gama de aplicações tecnológicas com a qual temos contato diário. Diante desse quadro, a presente pesquisa visa contribuir para o esforço de melhoria do ensino de ciências, em especial da física. Deseja-se contribuir também com a qualidade do texto das discussões conceituais apresentadas nos livros didáticos.

5. APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

5.1 O Significado da Aprendizagem

Em 1963 David Ausubel propôs uma teoria de aquisição do conhecimento na qual descreveu a maneira como os conhecimentos adquiridos se fixam na grade cognitiva.¹ A ideia da Ausubel é de que os conhecimentos adquiridos se fixam em um conhecimento prévio já estabelecido e a partir dele ganham significado. Por esse motivo a teoria foi chamada de aprendizagem significativa.

Os conhecimentos apreendidos, segundo a concepção de Ausubel, interagem com as ideias anteriores de forma não literal e não arbitrária. Assim eles ganham significado e, ao mesmo tempo, mudam o significado das ideias prévias. O conhecimento prévio, que pode ser de natureza conceitual, procedimental ou comportamental, é chamado de subsunçor ou ideia âncora.² Cada vez que o subsunçor é utilizado e modificado, ele ganha mais nitidez e fica mais consolidado, mais rico em detalhe, mais aderente. Os conhecimentos adquiridos, assim que se tornem significados, podem ser utilizados para significar outros conhecimentos, ou seja, se tornam também subsunçores.

A teoria da aprendizagem significativa, utilizando a ideia de subsunçor, oferece uma concepção de cognição, ou grade cognitiva. A grade cognitiva é o conjunto de subsunçores e a inter-relação entre eles. Nessa grade cognitiva o processo de inter-relação pode gerar uma *interação diferenciadora progressiva* ou uma *interação de reconciliação integrante*.

A *diferenciação progressiva*, na teoria da aprendizagem significativa, é

¹ [Aus00] e [Mor12].

² A palavra subsunçor não existe de fato na língua portuguesa. O vocábulo original em inglês é *subsumers*, que é um processo de substantivação do qualitativo *subsumptive*, da expressão *concept subsumptive*. Em português esse processo não ocorre. Embora seja possível a expressão *conceito subsuntivo*, a substantivação não ocorre. O qualitativo *subsuntivo* existe e qualifica a ação de subsumir, ou seja, a ação de incluir (alguma coisa) em algo mais amplo. Os tradutores da obra de Ausubel, no entanto, preferiram preservar o caráter substantivo do conceito e dessa forma a expressão “subsunçor” já se encontra consagrada atualmente em português. Quando a palavra subsunçor for encontrada aqui, deve ser encarada como *aquele agente que possui a função de integrar um novo conhecimento na grade cognitiva*.

o resultado da utilização de um mesmo subsunçor para atribuir significado a vários conhecimentos. Esse processo resulta na distinção clara dos subsunçores, consolidação e conseqüente aumento de sua aderência. Tomamos como exemplo a utilização de localização com coordenadas cartesianas para dar significado ao conceito de mapa cartográfico e depois ao de gráfico. Quando se aprende a localização por intermédio de coordenadas cartesianas, em um mapa, a ideia de plano cartesiano fica intimamente ligada ao sentido de distância física. Em nossa mente vemos as representações geométricas ou os símbolos geométricos (figuras, retas, círculos etc.) no plano cartesiano como representações inequívocas da distância física. Essa concepção começa a mudar quando começamos a utilizar outras variáveis para construir um gráfico: tempo e espaço, volume e pressão, quantidade e custo, juntamente com muitos outros pares possíveis de se representar. Nesse momento o subsunçor *plano cartesiano* ganha mais nitidez, se descola da ideia de distância física e passa a representar uma ferramenta menos particularizada, que pode ser utilizada para cruzar distância física, no sentido de estabelecer uma localização geograficamente falando, ou conectar variáveis de qualquer natureza. Esse é, segundo Ausubel, o modo mais comum de interação entre um conhecimento que está sendo adquirido e o subsunçor. O processo de diferenciação é conhecido como aprendizagem subordinada.

A *reconciliação integrante*, por outro lado, é o processo de incorporação de significados a um subsunçor, fazendo com que os conhecimentos adquiridos se fundam e adquiram um significado mais geral, que consiga aglutinar vários conhecimentos em um único subsunçor, aumentando sua fronteira de aderência. Como exemplo disso podemos tomar o subsunçor “mapa”. Caso esse subsunçor esteja significado como o mapa de localização geográfica, podemos utilizar esse conhecimento para significar o conceito de mapa político, físico, conceitual etc. Todos esses novos conceitos são tipos de mapas que aderem ao significado antigo do subsunçor e fazem com que mapa tenha um significado mais geral e que cada um dos seus tipos sejam casos particulares. Esse processo de produção de conhecimento significado (em tese, um novo subsunçor) é chamado de superordenação.

A estrutura cognitiva ausubeliana é dinâmica, na medida em que a rede de subsunçores interagentes que a formam não é estática. Eles obedecem a um tipo de hierarquia, ou seja, um subsunçor que está ligado a outro tem mais força de ancoragem que este segundo subsunçor. Dizemos nesse caso que o subsunçor com maior força de ancoragem tem mais alto nível hierárquico. Essa hierarquia no entanto pode mudar. Se um subsunçor não é utilizado, ele passa por um processo de obliteração e seu significado vai ficando ofuscado ao ponto de perder seu nível de hierarquia em relação aos seus subsunçores correlatos subordinados. Esse nível hierárquico também

é anisotrópico, no sentido em que depende da direção de raciocínio. Dois subsunçores correlatos, de diferentes níveis de hierarquia, podem inverter a posição hierárquica dependendo da direção de raciocínio que se adote.

5.2 A Utilização das Controvérsias no Ensino de Física

A teoria de Ausubel sobre o modo como a aprendizagem se estabelece na nossa grade de cognição fornece um ferramental muito frutífero para todo o campo de ensino, das mais variadas áreas, inclusive para o ensino de ciências. Esse fato pode ser observado notando a vasta aplicação de mecanismos baseados na concepção de Ausubel: os denominados organizadores prévios. São muito utilizados os mapas conceptuais e ‘V’s de Gowin.³ A utilização de esquemas que estabeleçam links que favoreçam a significação por subordinação ou por superordenação já faz parte do rol dos métodos de ensino e a frequência de seus aparecimentos é cada vez mais significativa.

Esses métodos são muito úteis. No entanto, utilizando a estrutura teórica ausubeliana, poderíamos adicionar um caso a mais de aprendizagem que, a nosso ver, é compatível com a teoria de Ausubel e permite a construção de novos mecanismos teoricamente embasados para auxiliar na significação do ensino de conceitos. Trata-se, como definiremos aqui, da aprendizagem por *oposição elucidativa* ou *confronto elucidativo*. Ou seja, significar através de ideias que mantenham relações opositivas com os conhecimentos a serem significados.

Nos processos de significação descritos na Seção 5.1, o subsunçor interage positivamente com o conhecimento a ser significado. O subsunçor tem um significado correlato ao do conhecimento que está sendo adquirido. Isso permite a interação diferenciadora ou a integrativa devido às fronteiras de aderência entre o subsunçor e o conceito significado. Através das fronteiras, o conhecimento pode interagir se diferenciando (e modificando o subsunçor) no processo de subordinação, ou se aglutinando, como na superordenação.

Entre diferenciação e integração, o processo que nos interessa é o primeiro deles, pois permitirá a extensão para o caso de oposição elucidativa. A ideia que propomos é de que os subsunçores não fixem apenas conhecimentos que possuam uma intersecção substantiva com o conhecimento que está sendo significado, mas que a ancoragem inclua também os casos em que o subsunçor e o conhecimento a ser adquirido possuam uma oposição substantiva. Essa oposição, notadamente, deve ser exercida em relação a um ponto de tangência e a interação entre os dois conhecimentos deve fornecer o significado ao conhecimento que está sendo adquirido, modificando o significado

³ [Mor12, págs. 49–51, 95–99, 143–176].

do subsunçor. Essa modificação do significado do subsunçor não quer dizer a negação do significado que existia antes da interação, mas sim uma melhor clareza e consolidação dele.

Essa extensão encontra respaldo em observações empíricas. Por exemplo, tomemos o caso do aprendizado das concepções morais de Kant através de visões utilitaristas como as de John Stuart Mill ou Nicolau Maquiavel.⁴ Primeiro vamos desenvolver, através desses conhecimentos, as significações por processos conhecidos.

Se já se tem consolidado a visão de Maquiavel sobre o valor das ações humanas, que é conferido pelo sucesso ou pelo fracasso em se conseguir o que se quer, pode-se utilizá-la como subsunçor para a significação de outra visão utilitarista, a de John Stuart Mill, que refere o valor da conduta humana em termos de seu êxito positivo ou negativo em conseguir a felicidade. Ambas as concepções possuem traços em comum que podem ser utilizados no processo de significação. A concepção de Maquiavel advoga a ideia que os seres humanos desejam algo e suas ações se moldam em relação à busca a esse objeto de desejo. Este objeto é o poder, segundo Maquiavel. Para Mill, as ações humanas também são determinadas por uma busca, a da felicidade. Como existe esse tipo de traço que é comum para as duas concepções, uma das abordagens pode ser utilizada para significar a outra. Nos dois casos as ações humanas são determinadas por uma busca e seu valor estará determinado pelo sucesso ou fracasso de atingir o objeto dessa busca. Nesse sentido os dois conhecimentos podem se aglutinar e dar origem a um novo subsunçor: “a conduta humana é determinada pela busca de um objeto de desejo”. Ou seja, a conduta seria um meio para alcançar um determinado fim, as ações humanas seriam utilitárias. Desse modo, com conhecimentos que possuam traços de significados em comum podemos realizar a diferenciação progressiva e a superordenação.

No caso da estrutura moral kantiana, as ações são determinadas por um dispositivo chamado imperativo moral categórico. De maneira direta é difícil de significar esse mecanismo filosófico, pois pertence a uma moral não utilitária e os comportamentos morais utilitários são mais comuns. No entanto, ela pode ser significada por oposição ao comportamento utilitário. O imperativo moral categórico é aquilo que determina que uma ação sempre deve ser executada de uma dada maneira independente se existe um agente externo (um desejo) a ser perseguido. Não existe um resultado que se almeje conseguir, como no caso das ações utilitárias. Os resultados certamente acon-

⁴ As ideias utilitaristas, embora sejam atribuídas a John Stuart Mill (1806-1873) por sua obra de 1861, o “*Utilitarismo*”, já podem ser encontradas em “*O Príncipe*”, de Nicolau Maquiavel (1469-1527), que foi publicado postumamente em 1532.

tecerão, no entanto a ação que foi tomada independe deles. O valor da ação é anterior, na própria origem da ação, da intenção de executá-la. Nesse sentido, deslocando o “juiz” que valora a ação para algo interno à ação, ela deixa de ser um meio para um fim e passa a ser um fim em si mesma. O valor da conduta é inferido na intenção de realizá-la. Por isso dizemos que esse tipo de comportamento moral é intencionalista.

Esse e outros exemplos mostram que um tipo de conhecimento pode ser significado por um subsunçor que tenha oposição substantiva em relação a ele. É necessário, obviamente, que haja um ponto de tangência em relação ao qual se possa estabelecer a oposição. No caso em questão, o ponto de tangência foi a causa determinante da ação humana. Para os utilitaristas eram elementos externos à própria ação, enquanto que para os intencionalistas a conduta tem valor em si mesma. Temos aqui uma diferença opositiva que pode ser significada por interação entre as duas correntes de filosofia moral.

Essa proposição de extensão da ideia de significação de Ausubel tem fundamento empírico e nos dá uma ferramenta que permite elaborarmos estratégias de ensino. Essa proposição se torna potente para o ensino de física, que é o caso em questão, se aliarmos a história e a filosofia da ciência. A história da ciência possui uma série de modelos e ideias científicas que foram esquecidas ou que se confundiram com o passar do tempo com outras ideias. Essas ideias, que representam modelos de explicações ou até mesmo grandes sistemas que podem ser encarados como paradigmas, podem fornecer elementos que muitas vezes já tenhamos significado em nossa estrutura cognitiva e que sejam de grande valia para significar os modelos aceitos atualmente. A filosofia por sua vez, trás, por definição, a discussão de modelos que estejam no fundamento das questões centrais das ciências, seja na epistemologia dos conhecimentos pertencentes a uma área científica, ou na discussão da estrutura da própria área.

Essa abordagem, de significação por oposição, requer que possamos significar os conhecimentos através da comparação de concepções opostas sobre um ponto de tangência. No nosso exemplo de ensino de ciências os conhecimentos opostos serão sistemas de conceitos propostos para explicar os fenômenos. O ponto de tangência será a explicação dos fenômenos utilizando modelos teóricos distintos.

6. PRELIMINARES

Desde os primórdios da civilização sabe-se que os corpos interagem entre si alterando suas posições ou estados de movimento. Existem alguns fenômenos que parecem indicar a existência de uma interação a distância, ou seja, sem o contato imediato entre os corpos (por exemplo, um ímã afetando a orientação de uma bússola). Outros fenômenos parecem indicar a existência de uma interação por contato (por exemplo, a colisão entre duas bolas arremessadas uma contra a outra). Nesse trabalho vamos discutir fenômenos nos quais os corpos interagem estando a distâncias mensuráveis entre si. Vamos analisar especificamente fenômenos gravitacionais, elétricos e magnéticos. Vamos ver como eles podem ser explicados tanto por ação a distância quanto através da ação por contato. Abordaremos alguns aspectos da história da física relacionados a esses tópicos e também analisaremos como alguns desses assuntos são apresentados nos livros didáticos.

Por questão de tempo e espaço não vamos discutir forças elásticas, forças de atrito, forças nucleares ou fenômenos eletromagnéticos mais complexos (tais como interações entre fios com corrente, um fio com corrente interagindo com um ímã, indução de correntes etc.). Também não vamos tratar de fenômenos termodinâmicos, não vamos considerar o estudo de gases e líquidos, não lidaremos com cosmologia, com as teorias da relatividade e com a mecânica quântica. Ficaria inviável lidar de maneira apropriada e cuidadosa de todos esses tópicos em uma dissertação de mestrado.

Esse tema é muito antigo e vem sendo discutido pelo menos desde a Grécia antiga, passando por filósofos romanos, da idade média, do renascimento e chegando até os tempos modernos.¹ Vamos restringir nosso trabalho ao período no qual tem início a física clássica, ou seja, com as obras de Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727). Antigamente se supunha que alguns fenômenos gravitacionais, elétricos e magnéticos que pareciam indicar ação a distância poderiam ser explicados através da ação por contato supondo a existência de um meio material localizado entre os corpos que estavam interagindo, sendo esse meio chamado de éter. O conceito de éter

¹ [Max73], [Max54, Vol. 2, Cap. 23: Theories of action at a distance], [Hes55], [Hes61], [Ass92b], [Ass99], [TCA04] e [Ass06].

tornou-se supérfluo na física moderna, tendo sido abandonado.² Logo não vamos analisar o conceito de éter nessa dissertação. Nosso trabalho vai se restringir à explicação desses fenômenos pela ação a distância e também por ação por contato supondo, nesse último caso, que o contato ocorra através de uma grandeza chamada de campo. Esse conceito foi introduzido por Michael Faraday (1791-1867) e James Clerk Maxwell (1831-1879). Em particular, vamos analisar os conceitos de campo gravitacional, campo elétrico e campo magnético.

Entre os fundadores da eletrodinâmica existem figuras ilustres que não trabalhavam com a ideia de campo. Um dos mais proeminentes foi André-Marie Ampère (1775-1836). Ele desenvolveu algumas das mais notáveis descobertas experimentais no eletromagnetismo, juntamente com contribuições teóricas fundamentais, sempre aceitando que elementos de corrente agiam diretamente um sobre o outro sem qualquer mediador.³ Outro pesquisador que apresentou diversas contribuições importantes ao eletromagnetismo sem utilizar o conceito de campo foi Franz Neumann (1798-1895), um dos grandes cientistas do século XIX relacionado com a teoria de circuitos. Wilhelm Weber (1804-1891) também desenvolveu uma eletrodinâmica completa sem trabalhar com a ideia de campo.⁴ Esses pesquisadores admitiam em suas teorias que partículas eletrizadas atuavam diretamente sobre outras partículas eletrizadas (ou que elementos de corrente atuavam diretamente sobre outros elementos de corrente).

Modernamente ainda existem cientistas que enxergam como polêmica a ideia do campo como sendo um mediador da interação entre dois corpos. Mary Hesse, por exemplo, apresentou críticas filosóficas sobre essa concepção.⁵ Do ponto de vista físico existem alguns autores como Peter e Neal Graneau que não utilizam o conceito de campo. Suas pesquisas experimentais e teóricas utilizam ação direta a distância, uma concepção denominada por eles de eletrodinâmica newtoniana.⁶ Recentemente o professor Dustin Lazarovici escreveu um artigo com o título “Contra o campo” no qual tece argumentos de várias ordens contrários ao conceito de campo.⁷

Mesmo alguns cientistas que trabalham com o conceito de campo admitem a dificuldade de tratar desse tema. Vejamos, por exemplo, o caso de Hecht ao comentar o tratamento conceitual de mais sucesso da teoria eletromagnética

² [Ein78, pág. 48].

³ [AC11] e [AC15].

⁴ [Ass92a] e [Ass15].

⁵ [Hes55] e [Hes61].

⁶ [GG93], [GG96].

⁷ [Laz18].

clássica baseada em campos, a saber, as ondas eletromagnéticas:⁸

O que começou por ser uma representação de um campo de forças (fosse qual fosse a causa) assumia uma realidade própria, era um campo, capaz de exercer uma força. Muitas perguntas persistiam, todavia, apesar dessa aparente simplicidade: até que ponto o campo \mathbf{E} estático tem, por si próprio, realidade física? Tendo realidade física, será que preenche o espaço do ponto de vista energético? De que modo? Existe alguma entidade que objetivamente “flua”? Como é que um campo aplica uma força numa carga? Será a influência do campo instantânea ou retardada?

Quando o campo eletromagnético se tornou uma realidade, os físicos foram capazes de imaginar perturbações num tal etéreo que tão convenientemente se estendia por todo espaço; **a luz passou a ser considerada uma onda eletromagnética no campo eletromagnético**. Apesar de ser fácil imaginar uma onda propagando-se num campo pré-existente, não é de modo algum evidente como é que um pulso luminoso localizado pode ser conceitualizado. Não existe nenhum campo estático estabelecido no espaço na zona que vai sendo atingido pelo pulso; se a propagação do pulso se faz sobre o próprio campo eletromagnético, então tal “meio” deve ser antecipadamente criado para permitir suportar a propagação do impulso luminoso. [...] Uma onda eletromagnética, ideia tão simples do ponto de vista matemático, não é, pois, nada transparente do ponto de vista conceitual.

Mesmo um dos grandes formuladores da eletrodinâmica quântica, Richard Feynman (1918-1988), chegou a defender em um artigo que a eletrodinâmica clássica fosse desenvolvida aceitando a ideia de ação direta entre as cargas, já que ele próprio reconhecia dificuldades com a sua teoria quântica de campos.⁹

O autor desta dissertação, Daniel dos Anjos Silva, se alinha com aqueles que assumem a abordagem de campo como sendo uma abordagem de interação por contato, ou seja, contrária à concepção de ação a distância. Tal ponto de vista foi defendido, entre outros, por James Clerk Maxwell.¹⁰

⁸ [Hec02, págs. 109-110].

⁹ [WF49].

¹⁰ [Max73], [Ass92b] e [TCA04].

7. ALGUNS TRABALHOS QUE FAZEM USO DO ENSINO BASEADO EM CONTROVÉRSIAS

Nossa dissertação não se encontra isolada. Existem diversos trabalhos que utilizam controvérsias no ensino de ciências.¹

Não é novo para os historiadores que existe uma quantidade imensa de controvérsias na atividade científica. Por esse motivo eles se dedicam de maneira muito competente a entender e explicitar todos esses embates no meio científico. Na verdade, procurar embates e diferenças de visões sobre uma dada área ou assunto é um dos eixos centrais do trabalho historiográfico científico.² No entanto essa relação não é tão imediata quando se fala em estratégia de ensino. Nos últimos anos, porém, essa abordagem vem ganhando força. Alguns autores discutem propostas explícitas apresentando a discussão de diferentes paradigmas como um importante instrumento dentro do ensino de ciências. Nessa linha poderíamos citar dois trabalhos de Daniel Gardelli: sua dissertação de mestrado e sua tese de doutorado, que possuem algumas similaridades com nosso trabalho.

A dissertação de mestrado de Daniel Gardelli, **Concepções de interação física: subsídios para uma abordagem histórica do assunto no ensino médio**,³ é um texto que traz uma abordagem histórica bem fundamentada sobre o tema das interações. Ele reúne elementos para a reconstrução histórica do ambiente intelectual da época de nascimento do eletromagnetismo que permitiram o surgimento de um grande debate sobre interações. O centro da abordagem de Gardelli nesse trabalho é a análise das ideias filosóficas do período, o debate sobre a constituição da filosofia da natureza e como isso se relacionou com as ideias da física no período. Nossa abordagem, apesar de ter uma base histórica, concentra-se inicialmente nos fenômenos para só então entrar nas diferentes explicações. A dissertação de Gardelli faz uma análise da abordagem dos campos gravitacional, elétrico e magnético pelos livros didáticos do ensino médio, ao passo que nós preferimos fazer um estudo utilizando livros de graduação, pois nosso foco de aplicação é o ensino

¹ [RPA18].

² [AC11] e [AC15].

³ [Gar04].

superior.

Na mesma linha e utilizando o mesmo método de estruturação, a tese de Doutorado de Gardelli, **Experimento de Ørsted: subsídios para uma abordagem histórica do assunto no ensino médio**,⁴ utiliza o método de confronto de modelos de maneira muito rica. Dessa vez o autor faz uma reconstrução do ambiente científico da época e foca a discussão nas várias interpretações a respeito do experimento que iniciou os estudos na ciência da eletrodinâmica, a saber, a experiência de Ørsted de 1820. Encontra-se nessa tese as várias interpretações alternativas para essa experiência. Esse fenômeno acentuou a controvérsia entre ação por campo e ação a distância. Gardelli faz novamente uma análise de livros didáticos voltados especificamente para a abordagem desse assunto. O trabalho traz uma análise histórica minuciosa.

O trabalho que mais tem paralelo ao nosso é a dissertação de mestrado de Hugo Shigueo Tanaka dos Santos, **Controvérsias entre a ação a distância e a ação por campos — subsídios para o uso da história do eletromagnetismo em sala de aula**,⁵ que aborda o mesmo tema tratado aqui, mas de um ponto de vista centrado na explicação da consolidação da ideia de ação por campo no desenvolvimento do eletromagnetismo ao longo do século XIX. A seguir apresentamos as principais diferenças entre o trabalho de Santos e o nosso.

Os objetivos do trabalho de Santos e a metodologia empregada são um pouco diferentes dos contidos aqui. Para delimitar a marca que diferencia os dois trabalhos devemos caracterizar a intenção de Santos que se divide em três blocos: uma enfática defesa da utilização da história da ciência no ensino de física, uma argumentação em favor do uso de fontes primárias no ensino de ciências e a produção narrativa sobre um caso histórico do eletromagnetismo.

A narrativa histórica montada por Santos se concentra mais especificamente no período final da formulação do eletromagnetismo. Temos por um lado a formalização matemática com a obra de Maxwell centrada nas ideias de campo de Faraday, juntamente com a força de Grassmann entre elementos de corrente e a força de Lorentz atuando sobre uma partícula eletrizada. Santos confere uma atenção especial às contribuições de Oliver Heaviside, estabelecendo um dos lados da controvérsia científica, enquanto que o outro lado defende a força de Ampère entre elementos de corrente e a formulação de Weber da interação entre cargas elétricas.

No encaminhamento narrativo apresentado por Santos há uma fatalidade histórica como explicação mais plausível para a aceitação das ideias

⁴ [Gar14].

⁵ [San18].

de Maxwell em detrimento das outras formulações. Ele propõe que teorias que estejam fora do consenso científico adotado atualmente podem ter grande utilidade no ensino de ciências. Ele apresenta uma sequência didática para dar embasamento à utilização dessas teorias esquecidas. Para fornecer uma argumentação consistente, faz uso da epistemologia de Feyerabend. Defende que o ensino de teorias que estejam fora do consenso científico atual podem ser utilizadas como uma ferramenta de análise crítica das teorias dominantes.

Essa abordagem utilizada por Santos busca fazer com que o estudo da ciência não produza erros na compreensão do fazer científico. Ela também pode auxiliar na desconstrução das visões deturpadas que os alunos já possuem. Essas visões errôneas do processo de produção científica ocorrem, segundo Santos, pela apresentação elitista e linear da história da ciência. Para ele esse modo de apresentação tem de ser mudado para que o cidadão ou cientista, quando solicitado a fazer qualquer tipo de julgamento em relação a uma área científica, o faça de maneira embasada. O trabalho de Santos usa como método uma construção historiográfica baseada em textos originais, constrói uma narrativa forte a respeito da história da ciência e traz a tradução de uma obra de Heaviside.

A nossa dissertação também traz elementos históricos. Porém, diferentemente de Santos, nosso foco foi adicionar a esses elementos históricos os aspectos observacionais dos fenômenos que estão sendo estudados. Ou seja, a reprodução adaptada aos dias atuais de experimentos simples que ilustram as principais características dos fenômenos que estão sendo estudados. Além disso, enquanto Santos concentrou sua análise nas teorias eletromagnéticas do século XIX, nossa ênfase está na teoria gravitacional de Newton, assim como nas interações elétricas e magnéticas desenvolvidas por Coulomb no século XVIII. Ou seja, nossa dissertação concentra-se na fase inicial do estudo dos fenômenos elétricos e magnéticos.

Para resumir os paralelos e as diferenças entre nosso trabalho e o de Santos, podemos dizer que ambos utilizam a história da física no ensino de ciências. O foco metodológico de Santos foi a utilização de fontes primárias no ensino. Podemos sintetizar seu trabalho de pesquisa na solução de uma pergunta: quais os subsídios para o estudo do eletromagnetismo que poderiam surgir da análise da controvérsia entre a ação a distância defendida por André-Marie Ampère e Wilhelm Weber, e a ação por contato através do campo defendida por Faraday, Maxwell e Oliver Heaviside? A partir dessa pergunta ele faz um estudo detalhado e analítico, construindo uma narrativa histórica das ideias centrais ao longo do desenvolvimento do eletromagnetismo no século XIX. Já o foco metodológico do nosso trabalho foi a utilização de experimentos simples descrevendo os principais fenômenos ligados aos primórdios da gravitação, da eletricidade e do magnetismo. Em

seguida analisamos como os mesmos fenômenos são explicados de formas distintas utilizando os conceitos de ação a distância e ação por contato através do campo. Apresentamos também o conceito de campo mostrando suas propriedades.

8. FENÔMENOS GRAVITACIONAIS, ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

Existem inúmeros fenômenos estudados na física. Como não podemos analisar todos eles, vamos nos concentrar aqui em três fenômenos específicos que apresentam graus crescentes de complexidade. Escolhemos também fenômenos que podem ser facilmente observados e reproduzidos no ambiente escolar sem a necessidade de instrumentos complexos ou de um laboratório.

Inicialmente analisamos a queda livre e a interação gravitacional que é puramente atrativa. Em seguida analisamos os fenômenos eletrostáticos que são caracterizados por dois tipos de corpos, a saber, partículas eletrizadas positivamente ou negativamente. As interações elétricas são caracterizadas por dois tipos de força, a saber, forças atrativas e repulsivas. Por últimos consideramos as interações magnéticas. Nesse caso temos corpos polares, ou seja, apresentando um polo Norte e um polo Sul. Como não é possível separar esses polos, ao lidar com a interação entre dois ímãs temos de considerar a interação entre dois dipolos. Temos então quatro interações, a saber, o polo Norte do primeiro ímã interagindo com os polos Norte e Sul do segundo ímã, juntamente com o polo Sul do primeiro ímã interagindo com os polos Norte e Sul do segundo ímã. Nesse caso, além das forças atrativas e repulsivas entre os ímãs, temos também os torques que eles exercem entre si. Esses torques podem girar os ímãs em relação ao laboratório.

8.1 Gravitação

Vamos nos concentrar aqui no fenômeno mais básico da gravitação, a saber, a queda dos corpos. Sempre se observou que ao soltar um corpo tal como uma pedra ou uma maçã em repouso de uma certa altura do solo, ele cai em direção ao chão com uma velocidade crescente. A direção seguida pelo corpo é chamada de vertical, definindo-se a horizontal como sendo a direção perpendicular à vertical. Também era do conhecimento dos antigos que a direção de queda coincide com a direção indicada por um fio de prumo parado em relação ao solo.

Diversos fatores influenciam essa queda tais como a resistência do meio

(ar), o peso e o formato do corpo (uma folha de papel lisa cai de forma diferente no ar em relação a uma folha de papel amassada) etc. Embora esse fenômeno venha sendo pesquisado desde a Grécia antiga com os trabalhos de Aristóteles (384-322 a. C.), é apenas com a obra de Galileu que chegamos às primeiras leis gerais quando ele conseguiu estudar a queda livre eliminando a influência do ar. Apresentou seus resultados em uma das obras fundamentais que dá início à dinâmica moderna, a saber, seu livro *Dois Novas Ciências* publicado originalmente em 1638.¹ Na sua época ainda não havia a bomba de vácuo, já que ela só foi inventada por Otto von Guericke (1602-1686) em 1650, após a morte de Galileu em 1642. Apesar disso, estudando experimentalmente a queda de corpos em meios com densidade e resistência diferentes (tais como ar e água), o deslocamento de esferas descendo através de planos inclinados, assim como a oscilação de pêndulos, Galileu concluiu corretamente diversas características fundamentais da queda livre, ou seja, do que aconteceria com um corpo caindo em direção ao solo livre da resistência do ar. Listamos aqui as propriedades fundamentais que ele descobriu ao analisar a queda livre de um corpo partindo do repouso em relação ao solo:

- Os corpos caem em direção ao solo com uma aceleração constante.
- A velocidade de queda aumenta linearmente com o tempo.
- O espaço percorrido aumenta quadraticamente com o tempo.
- Essa aceleração não depende da altura de queda.
- A aceleração de queda livre não depende das propriedades do corpo tais como seu peso, forma ou composição química.

Ao estudar um pêndulo simples ele concluiu que o período de oscilação era proporcional à raiz quadrada de seu comprimento. Também mostrou que quando podemos desprezar a influência do ar, o período de oscilação do pêndulo não depende das propriedades do corpo que está oscilando, tais como seu peso, forma ou composição química.

Galileu não chegou a um valor numérico da aceleração de queda livre e também não relacionou o período de oscilação de um pêndulo com essa aceleração. Giovanni Battista Riccioli (1598-1671) chegou a fazer diversas experiências de corpos caindo do alto de torres para verificar as conclusões de Galileu.² O cientista holandês Christiaan Huygens (1629-1695) publicou

¹ [Gal85].

² [Gra12b] e [Gra12a].

um trabalho fundamental em 1673 sobre o relógio de pêndulo.³ Ele foi o primeiro a obter uma expressão completa para os períodos de oscilação de pêndulos simples e compostos. Vamos chamar o período de um pêndulo simples de T , sendo ℓ seu comprimento e g a aceleração de queda livre. A expressão obtida por Huygens para as pequenas oscilações de um pêndulo simples pode ser escrita como:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (8.1)$$

Medindo o comprimento do pêndulo e o período de oscilação, Huygens conseguiu chegar então a um valor preciso da aceleração de queda livre. O valor que obteve é equivalente ao valor moderno de $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, embora Huygens não apresentasse seu valor numérico para g no Sistema Internacional de Unidades, que ainda não existia em sua época.

Isaac Newton, Figura 8.1, obteve uma formulação completa da mecânica clássica e da lei da gravitação com sua obra *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, que foi publicada em 1687.⁴

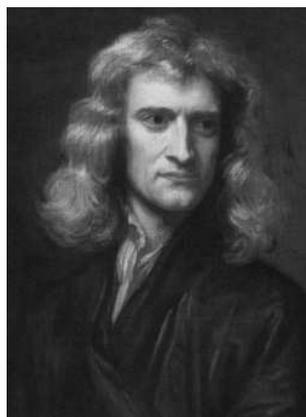


Fig. 8.1: Pintura feita por Godfrey Kneller em 1689 quando Newton estava no auge de sua carreira, dois anos após a publicação do *Principia*. Ele aparece com seu cabelo natural.

Esse livro em geral é conhecido por seu primeiro nome em latim, *Principia*. Na mecânica newtoniana é possível obter não apenas os resultados de Galileu e Huygens, mas também diversas propriedades fundamentais da queda livre que não haviam sido obtidas por Galileu nem por Huygens. Vamos representar a massa da Terra por $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ e um pequeno

³ [Huy86].

⁴ [New12a] e [New12b].

corpo de massa m interagindo gravitacionalmente com ela tal que $M_T \gg m$. Seja r a distância entre o centro da Terra e o centro do corpo. Vamos supor ainda que estejam inicialmente parados em relação ao referencial das estrelas fixas. Vamos considerar o que aconteceria com eles ao serem soltos do repouso. Listamos agora algumas propriedades da queda livre relacionadas com esse caso ideal de acordo com a mecânica clássica:

- A aceleração g de queda livre da massa m não depende do valor de m , mas é proporcional à massa da Terra, M_T .
- Essa aceleração é inversamente proporcional ao quadrado da distância r .
- A Terra também é acelerada em relação ao referencial das estrelas fixas com uma aceleração a_T proporcional ao valor de m .
- No caso da Terra e de um pequeno corpo de massa m vem que $a_T \ll g$.
- A aceleração da Terra também é inversamente proporcional ao quadrado da sua distância r até o corpo m .

Embora para Galileu não houvesse variação da aceleração de queda livre em relação à altura inicial do corpo, Newton concluiu que esse resultado era apenas uma aproximação válida para distâncias d entre o corpo e o solo sendo muito menores do que o raio da Terra $R_T = 6,37 \times 10^6$ m, ou seja, válida quando $d \ll R_T$.

Sendo $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ uma constante de proporcionalidade chamada de constante gravitacional universal, podemos representar esses resultados obtidos com a mecânica newtoniana da seguinte forma:

$$g = G \frac{M_T}{r^2}, \quad (8.2)$$

e

$$a_T = -G \frac{m}{r^2}. \quad (8.3)$$

O sinal negativo nessa equação significa que a Terra é acelerada em direção ao corpo de massa m , enquanto esse corpo é acelerado em direção à Terra. Ou seja, esses dois corpos adquirem acelerações opostas em relação ao referencial das estrelas fixas.

O valor de g coincide com o valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ quando o corpo m está próximo à superfície da Terra, ou seja, quando $r = 6,37 \times 10^6$ m. Já o módulo da aceleração da Terra em relação ao referencial das estrelas fixas

nesse exemplo é muito menor do que o valor de g . Supondo uma maçã com uma massa de 100 gramas, $m = 0,1 \text{ kg}$, teremos: $|a_T| \approx 1,6 \times 10^{-25} \text{ m/s}^2 \ll g$. Esse valor é certamente imperceptível mesmo nos dias de hoje.

Até aqui descrevemos o fenômeno de queda livre, sem tentar explicá-lo. Nos próximos Capítulos analisaremos a atração gravitacional tanto do ponto de vista da ação a distância quanto através da ação por contato.

8.2 Eletricidade

Apresentamos brevemente alguns aspectos históricos ligados à eletricidade.⁵ Desde os antigos gregos sabia-se que o âmbar atritado atraía corpos leves colocados em suas proximidades, tais como palha, fiapos de algodão ou cascas de sementes. Esse fenômeno pode ser reproduzido facilmente hoje em dia atritando uma régua de acrílico ou uma caneta plástica no cabelo e atraindo pedacinhos de papel. Pouco se avançou no estudo da eletricidade nos próximos dois mil anos. William Gilbert (1544-1603) obteve vários outros corpos que tinham a mesma propriedade que o âmbar. Em um livro publicado em 1600 chamou de *elétricos* a esses corpos. Esse termo vem da palavra âmbar em grego. Os corpos que não atraíam corpos leves mesmo ao serem friccionados eram chamados de *não-elétricos*. Stephen Gray (1666-1736) fez descobertas fundamentais em eletricidade, publicando um conjunto de dez artigos sobre o tema que já foram traduzidos para o português.⁶ Em 1731, após a morte de Newton, publicou sua grande descoberta que havia feito dois anos antes. Em particular, Gray descobriu a existência de dois tipos de corpos na natureza que são chamados hoje em dia de *isolantes* e *condutores*, assim como algumas de suas principais propriedades. Entre os isolantes estavam o âmbar, as resinas e alguns tipos de vidro. Entre os condutores estavam os metais, a água e o corpo humano. Os isolantes ficavam eletrizados apenas na região em que eram atritados, ao passo que a eletrização adquirida por um condutor ao ser atritado espalhava-se por toda a superfície do condutor caso ele estivesse isolado do solo, ou então espalhava-se para o solo caso ele estivesse aterrado. Os condutores permitiam o fluxo da eletricidade através deles, sendo que isto não ocorria com os isolantes. Percebeu-se que mesmo os condutores podiam ser eletrizados por atrito, desde que estivessem isolados do solo enquanto estavam sendo atritados. Por esse motivo a denominação de Gilbert foi abandonada. Os corpos que eram chamados de elétricos são hoje em dia chamados de isolantes. Já os não-elétricos são hoje em dia denominados de condutores. Foi essa descoberta que permitiu

⁵ [Ass10] e [Ass18].

⁶ [BAC12].

o controle dos fenômenos elétricos gerando uma quantidade vertiginosa de novas descobertas nos últimos trezentos anos. Seguindo os passos de Gray, o cientista francês Charles Du Fay (1698-1739) propôs em 1733 a existência de dois tipos de eletricidade, chamadas de *vítrea* e *resinosa*, que associou ao material que estava sendo atritado. Ou seja, a eletricidade do primeiro tipo aparecia comumente nos vidros atritados, enquanto a do segundo tipo aparecia nas resinas atritadas. Algumas anomalias começaram a ser observadas e percebeu-se que um mesmo tipo de material (vidro, por exemplo) podia adquirir uma eletrização de qualquer espécie dependendo do material com que era atritado. Desde então passou-se a adotar uma outra denominação para os dois tipos de eletricidade, a saber, eletricidade positiva (em vez de eletricidade vítrea) e eletricidade negativa (em vez de eletricidade resinosa). Outra denominação comum atualmente é chamar as partículas eletrizadas de cargas elétricas. Elas podem ser de dois tipos, a saber, carga positiva, +, e carga negativa, -. O fluxo da eletricidade é associado ao fluxo de partículas eletrizadas através de um corpo, sendo chamado de corrente elétrica. As primeiras séries triboelétricas foram publicadas na década de 1750. Em uma série triboelétrica os corpos são colocadas em uma sequência do tipo +, ..., corpo *a*, ..., corpo *b*, ..., -. Suponha que os corpos *a* e *b* estejam isolados do solo mas que possam ser atritados entre si. Nesse caso o corpo *a* fica positivamente eletrizado ao passo que o corpo *b* fica negativamente eletrizado. Ou seja, ao atritarmos dois corpos neutros, aquele que estiver mais perto do sinal + na série triboelétrica é o que ficará positivamente eletrizado, ao passo que o corpo que estiver mais perto do sinal - é o que ficará negativamente eletrizado. Um exemplo de uma série triboelétrica obtida experimentalmente aparece na Tabela 8.1.

+
cabelo
pele humana
saco plástico
canudo plástico
acrílico rígido
tubo de PVC
-

Tab. 8.1: Série triboelétrica.

Du Fay também descobriu uma propriedade fundamental associada a esses dois tipos de eletricidade, a saber, dois corpos carregados com eletricidade do mesmo tipo se repelem, ao passo que dois corpos carregados com eletricidade

dades de tipos opostos se atraem. Essa regra de Du Fay é expressa hoje em dia da seguinte forma: dois corpos positivamente eletrizados se repelem, dois corpos eletrizados negativamente se repelem, ao passo que há uma atração entre um corpo positivamente eletrizado e um outro corpo negativamente eletrizado.

Essas descobertas que parecem triviais hoje em dia foram publicadas a partir de 1731, ou seja, após a morte de Newton em 1727. Esse fato demonstra o quão recente é a ciência elétrica quando comparada com a astronomia, a estática, a hidrostática ou a óptica, que já eram estudadas sistematicamente desde a Grécia antiga.

Vamos agora descrever um fenômeno elétrico razoavelmente simples de ser observado hoje em dia mas que apresenta algo novo em relação ao fenômeno atrativo da gravitação. Na gravitação temos apenas um tipo de corpo caracterizado por sua massa, sempre positiva. Duas massas sempre se atraem. No caso da eletricidade temos três tipos básicos de corpos, a saber, corpos neutros, aqueles eletrizados positivamente e aqueles eletrizados negativamente. Existem também corpos polarizados eletricamente, sejam eles condutores ou isolantes, isto é, positivos de um lado e negativos de outro lado. Por hora não lidaremos com esses casos. Vamos tratar de corpos polarizados ao lidarmos com o magnetismo na Seção 8.3. Na gravitação temos apenas atração entre corpos. Já na eletricidade podemos ter não apenas atrações, mas também repulsões.

O fenômeno elétrico que vamos estudar nesse trabalho pode ser reproduzido com materiais de baixo custo. Essencialmente prendemos uma tira plástica em um lápis, caneta ou espeto de churrasco.⁷ A tira de plástico pode ter uma largura de uns 5 cm e um comprimento de uns 15 cm. Ela é presa ao lápis com uma fita adesiva, como na Figura 8.2. O plástico escolhido não deve ser muito frágil, pois pode rasgar quando for submetido ao atrito. Esse instrumento será chamado de *tira plástica pendular*.

O plástico é um material isolante. É fácil eletrizá-lo uniformemente por atrito, seja positivamente ou negativamente. Como é um isolante, as cargas adquiridas por atrito não se deslocam por ele. Logo, o material ao qual é preso tal como um lápis, uma caneta ou espeto de churrasco pode ser um condutor ou isolante. Da mesma forma, podemos segurar esse lápis com a mão sem descarregar a tira plástica. Essa é a grande vantagem desse instrumento.

Para realizar a experiência utilizamos quatro tiras plásticas pendulares como aquelas da Figura 8.2. Começamos com duas tiras neutras ou descarregadas. Quando estão distantes entre si as duas tiras pendem verticalmente abaixo dos lápis, Figure 8.3 (a). Ao serem aproximadas observa-se que con-

⁷ [Ass10, Seção 5.3].

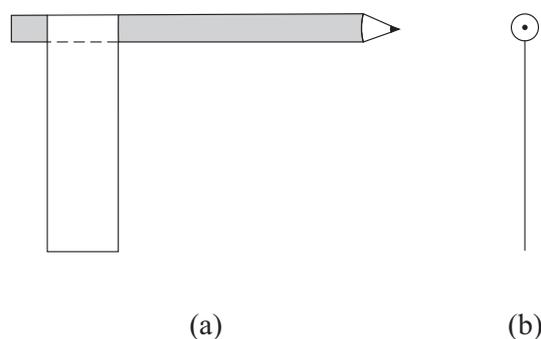


Fig. 8.2: Uma tira fina de plástico flexível presa a um lápis. (a) Vista de perfil. (b) Vista de costas.

tinuam verticais, como mostrado na Figura 8.3 (b).

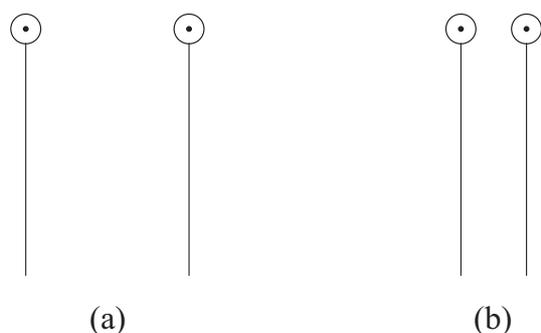


Fig. 8.3: (a) Tiras plásticas neutras afastadas entre si. (b) Ao se aproximarem continuam na vertical.

Agora eletrizamos duas tiras plásticas por atrito contra a pele humana. Pela série triboelétrica dada na Tabela 8.1 sabemos que as tiras plásticas vão ficar negativamente eletrizadas. O procedimento pode ser feito pressionando levemente uma tira plástica entre dois dedos, movendo em seguida os dedos rapidamente de cima para baixo ao longo da tira. Repete-se esse procedimento para uma segunda tira. Quando elas estão afastadas entre si, as tiras pendem verticalmente abaixo dos lápis de cada tira, Figura 8.4 (a). Porém, ao aproximar os dois lápis com essas tiras negativamente eletrizadas, colocando-os lado a lado na mesma altura e com uma pequena separação entre os dois lápis, observa-se que as tiras se afastam da vertical, repelindo-se mutuamente, como indicado na Figura 8.4 (b). Quanto mais próximos estiverem os lápis, com eles até mesmo se tocando, mais inclinadas em relação à vertical ficarão as tiras, Figura 8.4 (c).

Agora eletrizamos duas tiras plásticas por atrito contra tubos de PVC.

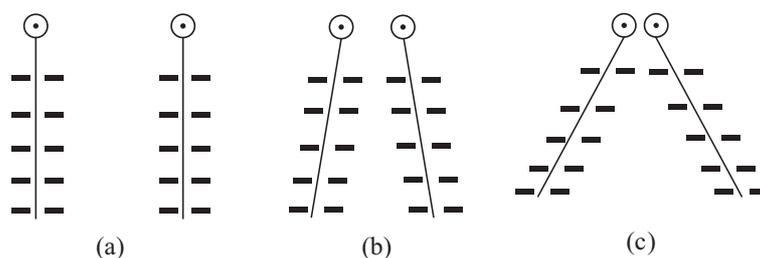


Fig. 8.4: (a) Tiras plásticas negativas com os lápis afastados entre si. As tiras pendem na vertical. (b) Quando os lápis são aproximados, as tiras afastam-se. (c) Quanto mais próximos estiverem os lápis, mais inclinadas em relação à vertical ficarão as tiras.

Pela série triboelétrica dada na Tabela 8.1 sabemos que as tiras plásticas vão ficar positivamente eletrizadas. O procedimento pode ser feito pressionando levemente uma tira plástica entre dois tubos de PVC, movendo em seguida os tubos de PVC rapidamente de cima para baixo ao longo da tira. Repete-se esse procedimento para uma segunda tira. Quando os lápis estão afastados entre si, as tiras pendem verticalmente abaixo dos lápis de cada tira, Figura 8.5 (a). Porém, ao aproximar os dois lápis com essas tiras positivamente eletrizadas, colocando-os lado a lado na mesma altura e com uma pequena separação entre os dois lápis, observa-se que as tiras se afastam da vertical, repelindo-se mutuamente, como indicado na Figura 8.5 (b). Quanto mais próximos estiverem os lápis, com eles até mesmo se tocando, mais inclinadas em relação à vertical ficarão as tiras, Figura 8.5 (c).

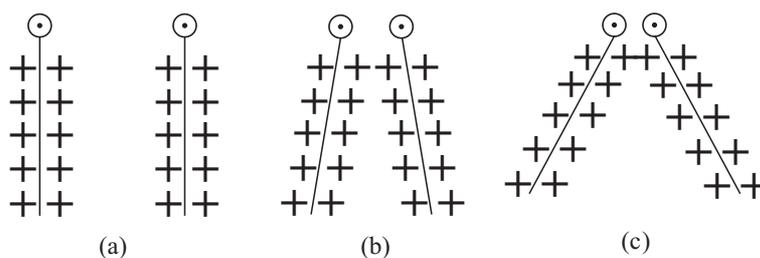


Fig. 8.5: (a) Tiras plásticas positivas com os lápis afastados entre si. As tiras pendem na vertical. (b) Quando os lápis são aproximados, as tiras afastam-se. (c) Quanto mais próximos estiverem os lápis, mais inclinadas em relação à vertical ficarão as tiras.

Seguramos agora com uma mão um lápis com uma tira positivamente eletrizada e com a outra mão seguramos um outro lápis com uma tira negativamente eletrizada. Colocamos os dois lápis na mesma altura. Quando os lápis estão afastados entre si, elas pendem na vertical, Figura 8.6 (a). Porém,

ao aproximarmos os dois lápis, observamos que as duas fitas inclinam-se em relação à vertical, aproximando-se devido a uma atração mútua, como indicado na Figura 8.6 (b). Novamente, quanto mais próximos estiverem os lápis, mais inclinadas em relação à vertical ficarão as tiras.

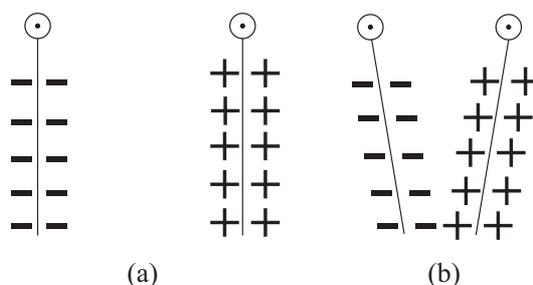


Fig. 8.6: (a) Uma tira negativa e uma positiva com os lápis afastados entre si. As tiras pendem na vertical. (b) Quando os lápis são aproximados, as tiras aproximam-se.

Nos próximos Capítulos analisaremos esses fenômenos de atração e repulsão elétrica tanto do ponto de vista da ação a distância quanto através da ação por contato.

8.3 Magnetismo

Apresentamos brevemente alguns aspectos históricos ligados ao magnetismo.⁸ A palavra magnetismo vem de uma região chamada Magnésia onde os gregos antigos encontravam a magnetita, um minério natural que tinha a propriedade de atrair pedacinhos de ferro. O ímã natural é também chamado de pedra-ímã ou de magneto. A bússola tem sua origem comprovada na China, tendo sido usada em práticas de adivinhação e na navegação. Existem trabalhos atuais que mostram que as civilizações americanas pré-colombianas já faziam utilização de fenômenos magnéticos com finalidade de orientação, ou seja, utilizando o princípio da bússola, bem antes dos chineses. Utilizavam corpos naturalmente magnetizados para orientar algumas construções, embora não se tenha conhecimento que tenham sido utilizados na navegação. Foram encontrados por arqueólogos materiais magnéticos com cerca de 3.000 anos utilizados na fabricação de espelhos Olmecas. Os Olmecas foram a primeira civilização americana, tendo se desenvolvido onde hoje é o México. Excelentes discussões sobre o magnetismo e a óptica pré-colombiana encontram-se, por exemplo, nos trabalhos de Carlson, Guimarães e Lunazzi.⁹ Inicial-

⁸ [Ass10] e [Mar17].

⁹ [Car75], [Gui04], [Gui05], [Gui11], [Lun00], [Lun96], [Lun13], [Lun15] e [Lun16].

mente aparelhos construídos com a agulha magnética não tinham a finalidade de orientar na navegação, sendo que a agulha imantada era utilizada na antiga China como um instrumento místico para determinação da sorte das pessoas. É provável que apenas por volta do século X essas agulhas tenham sido empregadas na navegação.¹⁰

O conhecimento sobre a bússola e seu uso na navegação parece ter chegado à Europa partindo da China entre o final do século XII e o início do século XIII. Um trabalho fundamental sobre o magnetismo apareceu em 1269, sendo uma carta escrita por Petrus Peregrinus, também chamado de Pierre de Maricourt: “Carta de Petrus Peregrinus, de Maricourt, ao cavaleiro Sieger de Foucaucourt, sobre o magneto.” Essa carta já encontra-se totalmente traduzida para o português, com um introdução e comentários.¹¹ Parece ser nessa obra que surgem pela primeira vez os conceitos de polos magnéticos. Ou seja, cada ímã ou pedra magnética possui dois pontos opostos nos quais seu poder de atração é mais forte. Esses pontos são qualitativamente diferentes um do outro. Ele também chegou às leis qualitativas de atração entre polos opostos e de repulsão entre polos de mesmo tipo. Ele estudou o que acontece quando uma pedra magnética é quebrada ao meio. Mostrou que cada metade torna-se uma nova pedra magnética contendo dois polos opostos devido ao surgimento de novos polos magnéticos na região de ruptura em cada pedra. Esses novos polos que haviam surgido na região de ruptura desapareciam quando a pedra era colada ou reconstituída.

Vamos agora descrever os fenômenos magnéticos estudados nesse nosso trabalho. Vamos lidar com ímãs permanentes e com bússolas. Cada ímã ou bússola será considerado um corpo rígido contendo dois polos opostos, chamados de polo Norte e polo Sul, representados pelas letras N e S , respectivamente. Para saber onde estão esses polos basta tentar atrair limalha de ferro por diferentes lados do ímã. Observa-se que dois lados opostos atraem uma maior quantidade de limalhas de ferro. Esses são os polos do ímã. Quando um ímã é produzido no formato retangular, em geral os polos estão nos lados opostos da direção mais longa do paralelepípedo. Quando um ímã é produzido no formato cilíndrico, em geral os polos estão nas faces circulares. Usaremos esses fatos nas figuras que apresentaremos.

Na Figura 8.7 (a) apresentamos um ímã de comprimento L em forma de barra com um polo N e outro S . Ao quebrar o ímã no meio são obtidos dois novos ímãs, tendo cada um deles um comprimento $L/2$, um polo N e outro S , Figura 8.7 (b). Ou seja, até hoje não encontrou-se nenhum corpo que contenha apenas um tipo de polo magnético.

¹⁰ [Gui11, págs. 41-45].

¹¹ [Mar17].

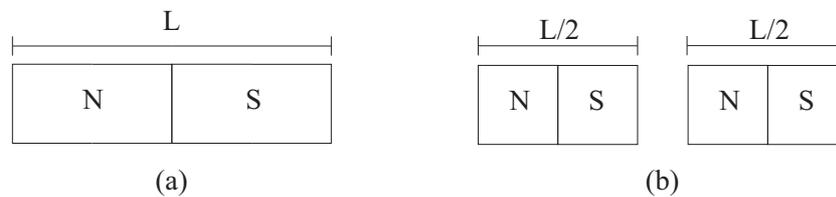


Fig. 8.7: (a) Um ímã de barra contendo um polo Norte, N , e um polo Sul, S .
 (b) Ao quebrar o ímã ao meio, são formados dois novos ímãs, com cada metade contendo um polo Norte e um polo Sul.

Inicialmente adquirimos ímãs de ferrite ou de neodímio. Eles podem ser obtidos no comércio ou como sucatas de aparelhos caseiros (ímãs obtidos da borracha localizada na porta de geladeiras e freezers, ímãs de fechos magnéticos usados para fechar portas de armários, ímãs obtidos de discos rígidos de computadores etc.)¹² Nas oficinas de conserto de geladeiras consegue-se gratuitamente borrachas velhas usadas nas portas de geladeiras. As tiras magnetizadas podem ser facilmente cortadas com estiletos. Os ímãs de neodímio são mais adequados do que os ímãs de ferrite para a visualização dos fenômenos, já que são mais potentes. Vamos usar aqui ímãs em forma de pastilha, cilíndricos ou em forma de roscas. As pastilhas são paralelepípedos com dimensões que podem ser de $0,5\text{ cm} \times 1,0\text{ cm} \times 2,0\text{ cm}$. As roscas de ferrite são cilindros com raio interno de $2,0\text{ cm}$, raio externo de $4,0\text{ cm}$ e altura de $0,5\text{ cm}$. Os ímãs de neodímio são cilindros maciços com um raio de $0,5\text{ cm}$ ou $1,0\text{ cm}$ e uma altura de $0,5\text{ cm}$ ou $1,0\text{ cm}$.

Em geral os ímãs não apresentam distinções aparentes entre os dois polos. Ou seja, ao pegar um ímã cilíndrico ou de barra não percebemos nenhuma diferença visual entre seus lados opostos. Inicialmente precisamos descobrir e classificar quais são os polos opostos de cada ímã, isto é, encontrar de que lado está o polo Norte e de que lado está o polo Sul. Essa distinção pode ser obtida por um processo experimental razoavelmente simples. Vamos lidar aqui com quatro ou mais ímãs de barra. Sejam os polos opostos do primeiro ímã representados pelas letras A e B , do segundo ímã por C e D , do terceiro ímã por E e F , ao passo que do quarto ímã são representados por G e H . Colocamos esses ímãs sobre uma mesa lisa com pouco atrito, tal que eles consigam girar e deslocar-se quando interagem entre si.

Na Figura 8.8 (a) mostramos o primeiro e o segundo ímãs, AB e CD , afastados entre si. Eles ficam parados. Seguramos o primeiro ímã e o aproximamos do segundo ímã. Observa-se que esse gira e gruda no primeiro ímã. Vamos supor que o lado D liga-se ao lado A , Figura 8.8 (b).

¹² [Gas03, Cap. 7].

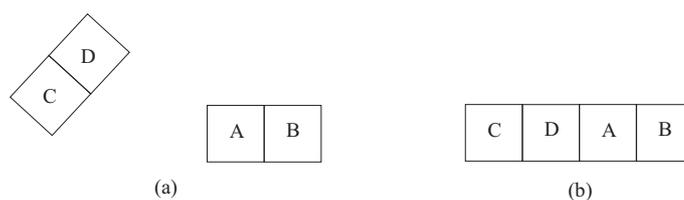


Fig. 8.8: (a) Ímã AB longe do ímã CD . Eles ficam parados sobre a mesa. (b) Ao aproximarmos o ímã AB do ímã CD , esse gira e seu lado D gruda no lado A .

Repetimos o procedimento com o primeiro e terceiro ímãs, AB e EF . Na Figura 8.9 (a) mostramos esses ímãs afastados entre si. Na Figura 8.9 (b) mostramos o que acontece ao aproximar o primeiro ímã do terceiro supondo que o lado E grude no lado A .

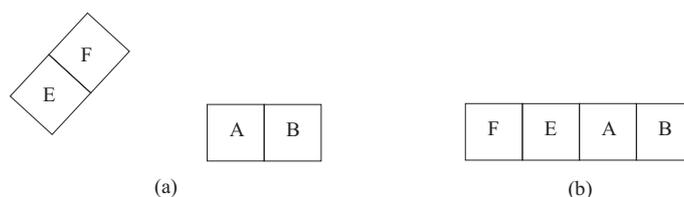


Fig. 8.9: (a) Ímã AB longe do ímã EF . Eles ficam parados sobre a mesa. (b) Ao aproximarmos o ímã AB do ímã EF , esse gira e seu lado E gruda no lado A .

Repetimos o procedimento com o primeiro e quarto ímãs, AB e GH . Na Figura 8.10 (a) mostramos esses ímãs afastados entre si. Na Figura 8.10 (b) mostramos o que acontece ao aproximar o primeiro ímã do quarto supondo que o lado H grude no lado A .

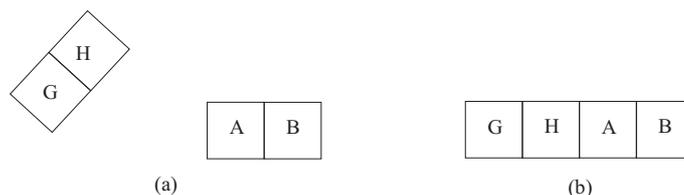


Fig. 8.10: (a) Ímã AB longe do ímã GH . Eles ficam parados sobre a mesa. (b) Ao aproximarmos o ímã AB do ímã GH , esse gira e seu lado H gruda no lado A .

Podemos agora separar os polos em dois grupos. Chamamos de polo do tipo I aos polos que grudaram no lado A , ou seja, aos polos D , E e H . Não

conseguimos grudar o lado A nos lados C , F e G , sendo esses últimos lados chamados de polos do tipo II.

Repetimos o procedimento com o segundo e terceiro ímãs, CD e EF . Na Figura 8.11 (a) mostramos esses ímãs afastados entre si. Ao aproximar o ímã CD do ímã EF observa-se que esse gira e que seu lado E gruda no lado C , Figura 8.11 (b).

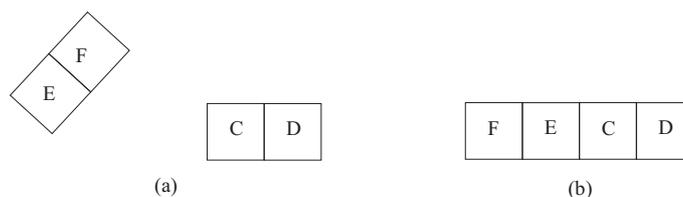


Fig. 8.11: (a) Ímã CD longe do ímã EF . Eles ficam parados sobre a mesa. (b) Ao aproximarmos o ímã CD do ímã EF , esse gira e seu lado E gruda no lado C .

Repetimos o procedimento com o segundo e quarto ímãs, CD e GH . Na Figura 8.12 (a) mostramos esses ímãs afastados entre si. Ao aproximar o ímã CD do ímã GH observa-se que seu lado H gruda no lado C , Figura 8.12 (b).

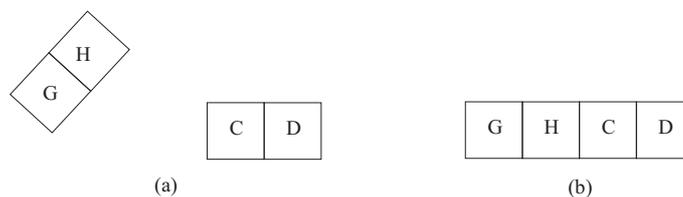


Fig. 8.12: (a) Ímã GH longe do ímã CD , com seu lado H voltado para CD . Eles ficam parados sobre a mesa. (b) Ao aproximarmos o ímã CD do ímã GH , seu lado H gruda no lado C .

Experiências como essas podem ser repetidas com um número qualquer de ímãs. Elas sempre mostram que cada ímã é composto por dois polos opostos.

Concluimos então que polos de tipos opostos se atraem e que polos do mesmo tipo se repelem. Além disso, essas forças aumentam quando diminui a distância entre os polos que estão interagindo.

Para saber se o polo do tipo I é um polo Norte ou Sul, temos de fazer uma experiência análoga utilizando um ímã ou bússola que já tenha seus polos N e S identificados. Para isso usamos o fato de que, por definição, o lado da bússola que aponta aproximadamente para o Norte geográfico terrestre é chamado de polo Norte. Deixamos então o ímã CD longe dessa bússola tal

que o polo Norte da bússola aponte aproximadamente para o Norte geográfico terrestre. Vamos supor que ao aproximar dessa bússola o lado C do ímã, o polo Norte da bússola aproxime-se do lado C . Concluímos então que nesse caso o lado C e todos os polos do tipo II serão polos Sul. Já o lado D e todos os polos do tipo I serão polos Norte.

Por outro lado, caso ao aproximar da bússola o lado C do ímã aconteça de o polo Norte da bússola se afastar de C e seu polo Sul se aproximar de C , concluiremos que o lado C e todos os polos do tipo II serão polos Norte. Nesse caso o lado D e todos os polos do tipo I serão polos Sul.

Uma experiência análoga pode ser feita com ímãs cilíndricos. Vamos supor que já identificamos os polos N e S de cada ímã. Ao colocar dois ímãs afastados sobre uma mesa eles ficam parados. Seguramos então um dos ímãs e o aproximamos do segundo ímã. Nesse caso observa-se que o segundo ímã vai se afastar do primeiro ímã caso suas polaridades coincidam, isto é, caso os dois polos N estejam acima dos dois polos S ou caso os dois polos S estejam acima dos dois polos N . Por outro lado, caso eles estejam com suas polaridades invertidas (um dos ímãs com seu polo N acima do seu polo S enquanto o outro ímã tem seu polo N abaixo de seu polo S), o segundo ímã vai se aproximar do primeiro ímã quando a distância entre eles diminuir, até que os dois ímãs fiquem grudados.

Nos próximos Capítulos veremos como explicar esses fenômenos gravitacionais, elétricos e magnéticos com ação a distância e usando o conceito de força. Veremos também como explicar esses mesmos fenômenos supondo ação por contato e usando o conceito de campo.

9. EXPLICAÇÕES DAS INTERAÇÕES POR AÇÃO A DISTÂNCIA

9.1 Gravitação

9.1.1 Newton e a Lei da Gravitação Universal

A explicação da queda livre e dos outros fenômenos de interação gravitacional apresentada por Isaac Newton foi baseada no conceito de ação a distância. Seu livro *Principia* é baseado em diversos conceitos, entre eles a suposição de uma força atuando diretamente entre os corpos que estão interagindo. Ele também utilizou os conceitos de massa (ou de quantidade de matéria), espaço absoluto e tempo absoluto. O tempo, o espaço e o movimento absolutos foram definidos da seguinte maneira:¹

I - O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração [...]

II - O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. [...]

III - Lugar é uma parte do espaço que um corpo ocupa, e de acordo com o espaço, é ou absoluto ou relativo. [...]

IV - Movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro [...]

Hoje em dia representamos o movimento dos corpos em relação a um referencial inercial. Um referencial inercial pode ser o espaço absoluto de Newton ou um referencial que tenha uma velocidade constante em relação ao espaço absoluto. Em geral a Terra pode ser usada como um bom referencial inercial para o estudo da queda livre, do lançamento de projéteis ou para a colisão entre duas bolas de bilhar. Ou seja, para casos de movimentos de amplitude espacial pequena comparada com o raio da Terra e que tenham uma duração pequena comparada com um dia sideral (tempo para uma rotação relativa

¹ [New12a, págs. 6-8].

entre a Terra e o conjunto das chamadas estrelas fixas que compõem a nossa galáxia). Por outro lado, se quisermos analisar movimentos de grande amplitude espacial e temporal (como o pêndulo de Foucault) ou então o próprio movimento da Terra (como sua rotação diária ao redor de seu eixo ou sua translação anual em volta do Sol) podemos usar o referencial das estrelas fixas como sendo um bom referencial inercial.

Newton definiu a massa de um corpo nas seguintes palavras:²

Definição I: A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente a partir de sua densidade e volume.

[...] É essa quantidade que doravante sempre denominarei pelo nome de corpo ou massa.

Embora Newton tenha trabalhado apenas com um conceito de massa, hoje em dia falamos da massa inercial (aquela que aparece no momento linear, na energia cinética e na segunda lei de Newton) e da massa gravitacional (aquela que aparece no peso de um corpo, na energia potencial gravitacional e na lei de Newton da gravitação). Não vamos discutir a distinção entre essas duas massas nessa dissertação.

A quantidade de movimento foi assim definida:³

Definição II: A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria.

Newton definiu a força inata da matéria da seguinte maneira:⁴

Definição III: A vis insita, ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, estando em um determinado estado, mantém esse estado, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta.

Newton definiu ainda a força imprimida e a força centrípeta como segue:⁵

Definição IV: Uma força imprimida é uma ação exercida sobre um corpo, a fim de alterar seu estado, seja de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta.

² [New12a, pág. 1].

³ [New12a, pág. 2].

⁴ [New12a, pág. 2].

⁵ [New12a, pág. 3].

Definição V: Uma força centrípeta é aquela pela qual os corpos são dirigidos ou impelidos, ou tendem de qualquer maneira, para um ponto como centro.

São forças desse tipo: a gravidade, pela qual os corpos tendem para o centro da Terra; o magnetismo, pelo qual o ferro tende para a magnetita; [...]

Em seguida Newton apresentou seus famosos axiomas ou leis do movimento:⁶

Axiomas ou Leis do Movimento

Lei I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.

[...]

Lei II: A mudança de movimento é proporcional a força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.

[...]

Lei III: A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.

[...]

Podemos expressar as leis de Newton vetorialmente representando a massa do corpo por m , sua velocidade e aceleração em relação a um referencial inercial por \vec{v} e \vec{a} , respectivamente, assim como a força atuando sobre o corpo por \vec{F} . Nesse caso, supondo uma massa constante em relação ao tempo, sua segunda lei do movimento pode ser expressa como

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\vec{a} . \quad (9.1)$$

Representando a força exercida por um corpo j sobre um corpo i por \vec{F}_{ji} e a força exercida pelo corpo i sobre j por \vec{F}_{ij} vem que sua terceira lei pode ser escrita como:

$$\vec{F}_{ji} = -\vec{F}_{ij} . \quad (9.2)$$

⁶ [New12a, págs. 15-23].

No *Principia* Newton apresentou também sua famosa lei da gravitação universal. Hoje em dia diríamos que cada partícula de matéria atrai qualquer outra partícula com uma força variando diretamente como o produto de suas massas e inversamente como o quadrado da distância entre elas. Embora Newton não tenha apresentado a lei com essas palavras, podemos encontrar afirmações similares nas seguintes passagens do *Principia*: Livro I, Proposições 72 a 75 e Proposição 76, especialmente Corolários 1 a 4; Livro III, Proposições 5, 7 e 8 e no Escólio Geral ao fim do Livro III. No Livro I, Proposição 76, Corolários 1 a 4, por exemplo, Newton afirmou, referindo-se a esferas 1 e 2 com distribuições isotrópicas de matéria (ou seja, com densidades de massa do tipo $\rho_1(r)$ e $\rho_2(r)$), nas quais cada ponto atrai com uma força que varia inversamente com o quadrado da distância:⁷

Corolário 1. Assim, se muitas esferas deste tipo, semelhantes em todos os aspectos, atraem-se mutuamente, as atrações acelerativas de qualquer uma com relação as outras, a quaisquer distâncias dos centros, serão como as esferas atrativas.

Corolário 2. E; a quaisquer distâncias desiguais, serão como as esferas atrativas divididas pelos quadrados das distâncias entre os centros.

Corolário 3. As atrações motoras, ou os pesos das esferas uma em direção a outra, a iguais distâncias dos centros, serão conjuntamente como as esferas atrativa e atraída; isto é, como os produtos resultantes da multiplicação das esferas uma pela outra.

Corolário 4. E, a distâncias desiguais, serão diretamente como aqueles produtos e inversamente como o quadrado das distâncias entre os centros.

Na Proposição 7 do Livro III, Newton afirmou:⁸

Que há um poder da gravidade pertencente a todos os corpos, proporcional às várias quantidades de matéria que eles contêm.

Provamos antes que todos os planetas gravitam em direção uns aos outros, assim como que a força da gravidade em direção a cada um deles, considerado separadamente, é inversamente como o quadrado das distâncias dos lugares aos centros do planeta. E,

⁷ [New12a, pág. 228].

⁸ [New12b, págs. 203-204], [Chi13].

portanto, (pela Proposição 69, Livro I, e seus Corolários) segue-se que a gravidade tendendo em direção a todos os planetas é proporcional à matéria que eles contêm.

Além disto, como todas as partes de qualquer planeta A gravitam em direção a qualquer outro planeta B , e a gravidade de toda parte está para a gravidade do todo assim como a matéria da parte está para a matéria do todo, e (pela Lei III) para cada ação corresponde uma reação igual, o planeta B , por sua parte, irá gravitar em direção a todas as partes do planeta A , e sua gravidade em direção a qualquer uma das partes estará para a gravidade em direção ao todo assim como a matéria da parte está para a matéria do todo. *Q.E.D.*

No Escólio Geral no final do livro lemos:⁹

Explicamos até aqui os fenômenos dos céus e do nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não designamos a causa deste poder. Isto é certo, que ele tem de proceder de uma causa que penetra até os centros do Sol e dos planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; que não opera de acordo com a quantidade das superfícies das partículas sobre as quais atua (como as causas mecânicas fazem usualmente), mas de acordo com a quantidade de matéria sólida que elas contêm, propagando sua virtude para todos os lados a distâncias imensas, diminuindo sempre como o inverso do quadrado das distâncias.

No *Sistema do Mundo* escrito por Newton, publicado pela primeira vez em 1728, também podemos ver a importância da lei da ação e reação para a dedução do fato de que a força gravitacional é proporcional ao produto das massas. Esta obra também já está totalmente traduzida para a língua portuguesa. Citamos aqui a Seção 20 do livro de Newton, logo após a Seção onde Newton discutiu as experiências com o pêndulo que mostraram a proporcionalidade entre o peso e a massa inercial:¹⁰

Uma vez que a ação da força centrípeta sobre os corpos atraídos é, a distâncias iguais, proporcional às quantidades de matéria nesses corpos, a razão requer que ela também seja proporcional à quantidade de matéria no corpo atraente.

⁹ [New12b, pág. 331].

¹⁰ [New08, Seção 20, pág. 354].

Pois toda ação é mútua e (pela terceira Lei do Movimento) faz com que os corpos aproximem-se um do outro e, portanto, deve ser a mesma em ambos os corpos. É verdade que podemos considerar um corpo como atraente e outro como atraído, mas esta distinção é mais matemática do que natural. A atração reside, de fato, em cada corpo na direção do outro, sendo, portanto, do mesmo tipo em ambos.

9.1.2 Cotes e a Ação a Distância

Roger Cotes (1682-1716) escreveu um prefácio na segunda edição do *Principia* de 1713 no qual defendeu abertamente a ação a distância entre corpos que não estavam se tocando. Citamos aqui algumas partes desse prefácio:¹¹

Que o atributo da gravidade fosse encontrado em todos os corpos, outros sustentaram antes dele [isto é, antes de Newton], ou imaginaram, mas ele foi o único e primeiro filósofo que pode demonstrá-lo a partir das aparências e torná-lo uma base sólida para as especulações mais nobres. [...] Além disso, como todos os corpos gravitam em direção à Terra, da mesma forma a Terra gravita em direção a todos os corpos. Que a ação da gravidade é mútua e igual em ambos os lados está, então, provada. [...] Assim, o Sol gravita em direção a todos os planetas e todos os planetas em direção ao Sol. [...] Chegamos a um tal ponto onde é necessário admitir que o Sol e a Terra, e todos os corpos celestes que acompanham o Sol, atraem-se mutuamente. [...] Uma vez, então, que todos os corpos, quer na Terra ou nos céus, são pesados, até o ponto em que podemos realizar quaisquer experimentos ou observações com eles, devemos certamente admitir que a gravidade é encontrada em todos os corpos, universalmente. [...] Em resumo, ou a gravidade deve ter um lugar entre as qualidades primárias de todos os corpos, ou extensão, mobilidade e impenetrabilidade não devem ter este lugar.

9.1.3 Força Gravitacional nos Livros Didáticos

Apresentamos aqui a força gravitacional como aparece tipicamente em diversos livros didáticos modernos utilizando a notação vetorial. Seja uma partícula de massa m_1 localizada no vetor posição \vec{r}_1 em relação à origem O

¹¹ [New12a, págs. IV-XVII].

de um sistema de referência inercial S e uma partícula de massa m_2 localizada em \vec{r}_2 . A lei de Newton da gravitação universal pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{F}_{21} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} = -\vec{F}_{12} . \quad (9.3)$$

Nesta equação \vec{F}_{21} é a força exercida por 2 sobre 1, G é uma constante de proporcionalidade, $r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|$ é a distância entre os corpos pontuais, \hat{r} é o vetor unitário apontando de 2 para 1, ao passo que \vec{F}_{12} é a força exercida por 1 sobre 2, Figura 9.1.

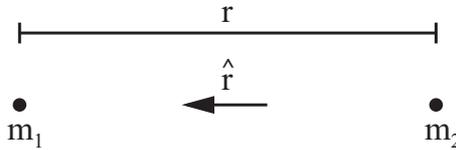


Fig. 9.1: Dois corpos separados por uma distância r .

No Sistema Internacional de Unidades a grandeza G , chamada de constante de gravitação universal, é dada por:

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg s^2} . \quad (9.4)$$

9.1.4 Explicação da Queda Livre com o Conceito de Força

A explicação da queda livre de um corpo utilizando o conceito de força é imediata. Basta supor que a Terra exerce uma força gravitacional sobre qualquer corpo em suas proximidades. Combinando as Equações (9.1) e (9.3) vem que a aceleração \vec{a} de queda livre de um corpo de massa m quando está interagindo gravitacionalmente com a Terra de massa M_T é dada por:

$$\vec{a} = -G \frac{M_T}{r^2} \hat{r} . \quad (9.5)$$

Essa aceleração aponta radialmente para o centro da Terra. Substituindo os valores numéricos de G , M_T e sendo $r = R_T$ o raio da Terra obtemos $a = g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Por ação e reação vem que esse corpo m exerce sobre a Terra uma força igual e oposta à força que a Terra exerce sobre ele. Já a aceleração a_T sofrida pela Terra em relação a um referencial inercial é dada por (combinando a segunda e terceira leis de Newton):

$$a_T = -\frac{m}{M_T}g \approx -1,6 \times 10^{-25} \text{ m/s}^2 . \quad (9.6)$$

Aqui estamos usando $m = 0,1 \text{ kg}$ como sendo a massa típica de uma maçã. O módulo dessa aceleração é muito menor do que g .

Na Figura 9.2 (a) indicamos as forças iguais e opostas exercidas entre esses dois corpos de massas $m \ll M$. Na Figura 9.2 (b) mostramos as acelerações bem diferentes adquiridas por esses corpos em relação ao referencial das estrelas fixas.

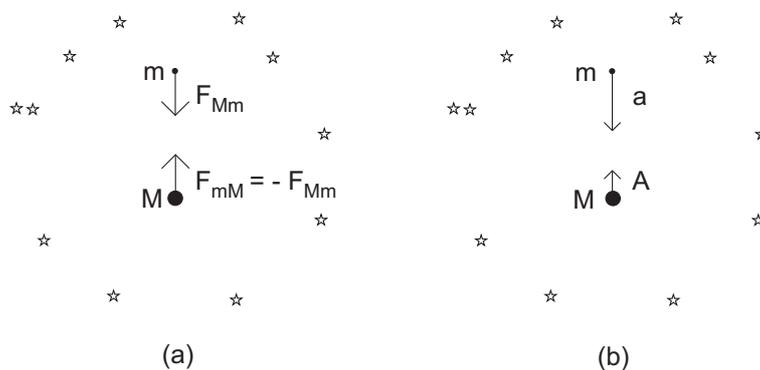


Fig. 9.2: (a) Forças iguais e opostas exercidas entre m e M supondo $m \ll M$. (b) Acelerações a e A adquiridas por m e M , respectivamente, em relação ao referencial das estrelas fixas. Elas possuem direções opostas e intensidades bem diferentes.

9.2 Eletricidade

9.2.1 Coulomb e a Força Elétrica

Charles Augustin Coulomb (1738-1806), Figura 9.3, obteve em 1785 a lei de força entre duas cargas pontuais q_1 e q_2 .

Ele apresentou seu resultado em dois artigos de 1785, publicados em 1788.¹² Ele denominava as cargas de “massas elétricas,” “moléculas eletrizadas,” ou “densidades dos fluidos elétricos.”¹³

No caso de cargas de mesmo sinal, Coulomb expressou-se nas seguintes palavras:¹⁴

¹² [Cou85a], [Cou85b], [Pot84] e [Cou35a].

¹³ [Gil71b] e [Gil71a, págs. 190-192].

¹⁴ [Cou85a, pág. 572], [Pot84, pág. 110] e [Cou35a].

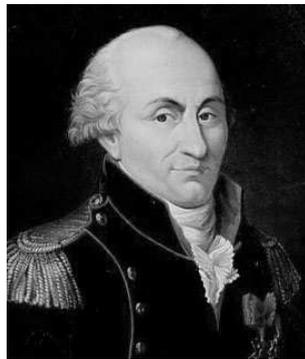


Fig. 9.3: Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806).

Lei fundamental da eletricidade.

A força repulsiva entre dois pequenos globos eletrizados com o mesmo tipo de eletricidade, está na razão inversa do quadrado da distância entre os centros dos dois globos.

No caso de cargas de sinais opostos, Coulomb expressou-se nas seguintes palavras:¹⁵

Chegamos assim, por um método totalmente diferente do primeiro método, a um resultado similar; desta forma podemos concluir que a atração recíproca do fluido elétrico denominado *positivo*, sobre o fluido elétrico denominado comumente *negativo*, está na razão inversa do quadrado das distâncias; da mesma forma que havíamos obtido, em nossa primeira Memória, que a ação recíproca de um fluido elétrico de mesma natureza, está na razão inversa do quadrado das distâncias.

Até aqui Coulomb apenas mencionou como a força elétrica varia com a distância entre as cargas. Foi apenas no final de sua segunda Memória que ele mencionou que esta força também é proporcional ao produto entre as cargas:¹⁶

Recapitulação dos assuntos contidos nesta Memória.

Das pesquisas precedentes, resulta:

¹⁵ [Cou85b, pág. 572], [Pot84, pág. 123] e [Cou35a].

¹⁶ [Cou85b, pág. 611] e [Pot84, pág. 146].

1º. Que a ação, seja repulsiva, seja atrativa entre dois globos eletrizados e, conseqüentemente, entre duas moléculas elétricas, está na razão composta das densidades do fluido elétrico das duas moléculas, e na razão inversa do quadrado das distâncias.

Gillmor apontou corretamente que Coulomb não chegou a demonstrar experimentalmente que a força entre duas cargas era proporcional ao produto entre elas.¹⁷ Ele simplesmente supôs esta proporcionalidade, não considerando que fosse importante tentar demonstrá-la experimentalmente.

9.2.2 Força Elétrica nos Livros Didáticos

Discutimos aqui como a força elétrica é apresentada em diversos livros didáticos. Vamos usar notação vetorial e o Sistema Internacional de Unidades. Vamos supor cargas pontuais em repouso mútuo, separadas por uma distância r , sendo \hat{r} o versor unitário apontando de 2 para 1, Figura 9.4.

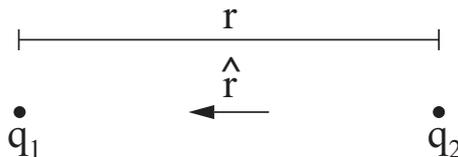


Fig. 9.4: Duas cargas separadas por uma distância r .

A força \vec{F}_{21} exercida por q_2 em q_1 é escrita atualmente da seguinte forma:

$$\vec{F}_{21} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r} = -\vec{F}_{12} . \quad (9.7)$$

Aqui $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \text{ s}^4 / \text{kgm}^3$ é uma constante chamada de permissividade do vácuo e \vec{F}_{12} é a força exercida por q_1 em q_2 .

Esta força é muito similar à lei de Newton para a gravitação, equação (9.3). Ambas estão direcionadas ao longo da linha reta ligando os corpos, seguem a lei da ação e reação e variam com o inverso do quadrado da distância entre os corpos. Além do mais, ela depende do produto de duas cargas, ao passo que na força gravitacional temos o produto de duas massas gravitacionais. Parece que Coulomb foi levado a esta expressão mais por analogia com a lei de Newton para a gravitação do que como resultado de suas poucas experiências.¹⁸

¹⁷ [Gil71b] e [Gil71a, págs. 190-192].

¹⁸ [Hee92].

A similaridade entre a força eletrostática entre duas cargas, equação (9.7), e a força de Newton para a gravitação, equação (9.3), mostra que as massas gravitacionais têm o mesmo papel que as cargas elétricas: ambas geram e sofrem a ação de algum tipo de interação com corpos equivalentes, sejam eles gravitacionais ou elétricos. Ou seja, a carga q_2 gera uma força sobre uma carga q_1 , acelerando-a em relação a um referencial inercial se ela estiver livre para se deslocar. Da mesma forma, a carga q_1 gera uma força sobre a carga q_2 , acelerando-a em relação a um referencial inercial. O mesmo acontece com as massas gravitacionais m_2 e m_1 , que exercem forças mútuas e tendem a acelerar-se em relação a um referencial inercial devido a uma interação gravitacional entre elas. A forma da interação, ou a expressão algébrica desta força, é essencialmente a mesma tanto para as forças gravitacionais quanto para as forças elétricas.

9.2.3 Explicação da Interação Elétrica Utilizando o Conceito de Força

Apresentamos agora a explicação da atração e repulsão entre as tiras eletrizadas supondo uma força elétrica exercida entre elas. Uma situação na qual as contas ficam razoavelmente simples é aquela na qual substituímos as duas tiras eletrizadas por pêndulos elétricos nos quais as cargas estão concentradas em pequenas regiões. Nesse caso supomos que cada pêndulo é composto de uma pequena esfera de isopor, papel ou cortiça suspenso por um fio ou linha de seda (material isolante). Vamos supor que os dois pêndulos possuem o mesmo comprimento L , o mesmo peso P e que são eletrizados com cargas q_1 e q_2 de mesmo sinal. Quando os pêndulos estão afastados entre si as linhas pendem na vertical. Quando os pêndulos são aproximados, seus fios inclinam-se de um ângulo θ em relação à vertical, Figura 9.5 (a). Seja r a distância entre as esferas nessa situação. Existem três forças atuando em cada pêndulo, a saber, seu peso P apontando para baixo, a força elétrica horizontal F fazendo com que as esferas se afastem, juntamente com a força T de tração do fio de seda, Figura 9.5 (b).

Pela Figura 9.5 e pela Equação (9.7) vem que, chamando $|F_{21}| = |F_{12}| = F$:

$$T \operatorname{sen} \theta = F , \quad (9.8)$$

$$T \operatorname{cos} \theta = P . \quad (9.9)$$

Dividindo-se essas duas equações e usando a relação (9.7) para o módulo da força elétrica F entre as duas cargas de mesmo sinal obtém-se:

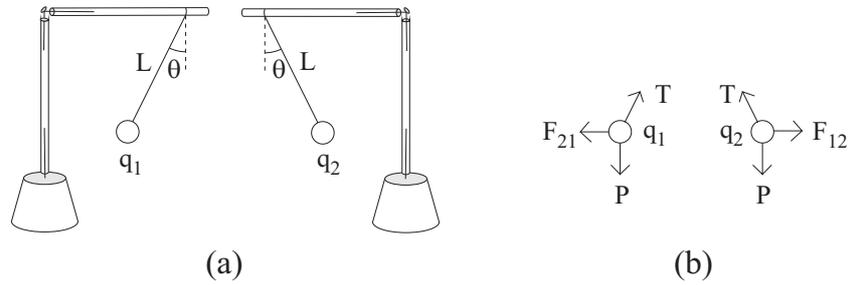


Fig. 9.5: (a) Dois pêndulos eletrizados com cargas de mesmo sinal. (b) Forças atuando em cada carga.

$$\tan \theta = \frac{F}{P} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{1}{P}. \quad (9.10)$$

Dessa equação vem que podemos alterar o ângulo θ aumentando a eletrização das esferas (ou seja, aumentando q_1 ou q_2), diminuindo a distância r entre elas, assim como diminuindo seus pesos P . Uma conta análoga pode ser feita no caso da atração entre dois pêndulos eletrizados com cargas de sinais opostos.

É simples fazer as contas para esse caso. Por outro lado, não é tão trivial realizar uma experiência concreta na qual a inclinação dos fios dos pêndulos seja razoavelmente grande para ser facilmente visualizada. Por esse motivo preferimos apresentar como fenômeno elétrico a atração e repulsão entre duas tiras plásticas eletrizadas. Esse fenômeno é muito simples de reproduzir experimentalmente e com ele fica fácil perceber o aumento da força elétrica com o aumento da eletrização de cada uma das tiras, assim como pela diminuição da distância entre elas. Nesses casos o aumento da força elétrica é indicado por um ângulo crescente da inclinação de cada tira em relação à vertical.

9.3 Magnetismo

9.3.1 Coulomb e a Força Magnética

Para descrever a interação magnética entre ímãs, ou a interação magnética entre um ímã e a Terra, Coulomb propôs em 1785 uma expressão descrevendo a força entre polos magnéticos pontuais.¹⁹ Coulomb denominava estes polos magnéticos de “fluidos magnéticos” ou de “densidades magnéticas.”²⁰

¹⁹ [Cou85b], [Pot84] e [Cou35b].

²⁰ [Gil71b] e [Gil71a, págs. 190-192].

Atualmente estes polos são denominados de polo Norte e polo Sul, com o polo Norte sendo considerado positivo e o polo Sul negativo, por convenção. Coulomb expressou-se nas seguintes palavras:²¹

O fluido magnético age por atração ou repulsão, seguindo a razão composta diretamente da densidade do fluido, e a razão inversa do quadrado das distâncias entre suas moléculas.

A primeira parte desta proposição não precisa ser provada; vamos passar para a segunda [parte]. [...]

Gillmor apontou corretamente que Coulomb não chegou a demonstrar experimentalmente que a força entre dois polos magnéticos era proporcional ao produto das intensidades destes polos magnéticos, assim como não provou que a força entre duas cargas elétricas era proporcional ao produto entre elas.²² De acordo com as palavras de Coulomb que acabamos de citar, ele considerava que não era necessário provar que a força entre os polos magnéticos era proporcional ao produto da densidade destes fluidos magnéticos. Não nos parece correta esta conclusão de Coulomb. Esta parte fundamental da força entre polos magnéticos teria de ser verificada experimentalmente antes que se pudesse afirmar que é uma lei da natureza. O mesmo acontece com a proporcionalidade da força elétrica em relação ao produto das cargas.

9.3.2 Força Magnética nos Livros Didáticos

Apresentamos agora como a força magnética entre polos é apresentada em alguns livros didáticos. Usaremos a notação vetorial e o Sistema Internacional de Unidades. A unidade de polo magnético no Sistema Internacional de Unidades é *Am*. Sejam p_1 e p_2 dois polos magnéticos separados por uma distância r , com \hat{r} sendo o vetor unitário apontando de 2 para 1, Figura 9.6.

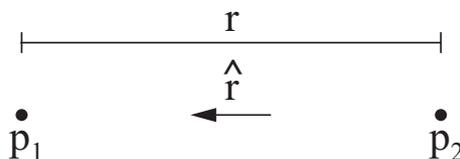


Fig. 9.6: Dois polos magnéticos separados por uma distância r .

A força \vec{F}_{21} exercida por um polo magnético p_2 sobre um polo magnético p_1 é expressa atualmente da seguinte forma:

²¹ [Cou85b, pág. 593], [Pot84, pág. 130] e [Cou35b].

²² [Gil71b] e [Gil71a, págs. 190-192].

$$\vec{F}_{21} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{p_1 p_2}{r^2} \hat{r} = -\vec{F}_{12} . \quad (9.11)$$

Aqui $\mu_o \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ kgm}/(\text{A}^2 \text{ s}^2)$ é uma constante chamada de permeabilidade do vácuo e \vec{F}_{12} é a força exercida pelo polo 1 sobre o polo 2.

O conceito de polo magnético é uma idealização, já que até hoje não foi possível isolar um polo magnético. Ou seja, ainda não foi encontrado um corpo que contenha apenas um polo Norte. Da mesma forma ainda não foi encontrado um corpo que contenha apenas um polo Sul. A estrutura magnética básica com a qual se podem fazer medidas é o chamado dipolo magnético. Ele pode ser entendido como um polo Norte pontual, p_N , separado por uma distância fixa ℓ de um polo Sul pontual de mesma intensidade, $p_S = -p_N$. Seja $\hat{\ell}$ um vetor de módulo unitário apontando do polo Sul para o polo Norte deste dipolo, Figura 9.7.

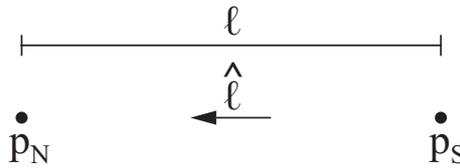


Fig. 9.7: Dipolo magnético.

Define-se o momento magnético \vec{m} deste dipolo pela seguinte expressão:

$$\vec{m} \equiv p_N \ell \hat{\ell} . \quad (9.12)$$

Vamos considerar dois dipolos magnéticos de comprimentos ℓ_1 e ℓ_2 com seus centros separados por uma distância r , Figura 9.8.

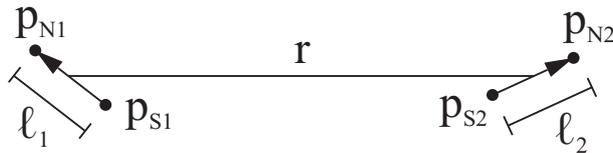


Fig. 9.8: Dois dipolos magnéticos separados por uma distância r .

Suponha que o centro do dipolo 1 esteja localizado no vetor posição $\vec{r}_1 = x_1 \hat{x} + y_1 \hat{y} + z_1 \hat{z}$ em relação à origem O de um sistema de referência inercial S , ao passo que o centro do dipolo 2 esteja localizado no vetor posição $\vec{r}_2 = x_2 \hat{x} + y_2 \hat{y} + z_2 \hat{z}$, Figura 9.9.

A força entre dois dipolos magnéticos, assim como o torque exercido entre eles, pode ser obtida a partir da Equação (9.11) levando em conta as forças

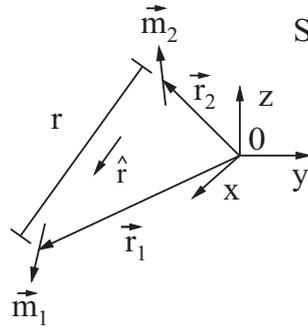


Fig. 9.9: Dipolos magnéticos 1 e 2 com seus centros localizados em \vec{r}_1 e \vec{r}_2 com relação à origem O de um sistema de referência S e separados por uma distância r . Seus momentos magnéticos são \vec{m}_1 e \vec{m}_2 , respectivamente, ao passo que \hat{r} é o vetor unitário apontando de 2 para 1.

entre cada um dos polos magnéticos de um dipolo e cada um dos polos magnéticos do outro dipolo. Por exemplo, a força resultante exercida pelo dipolo 2 sobre o dipolo 1, \vec{F}_{21} , é a soma vetorial de quatro termos, a saber, a força de p_{N2} em p_{N1} , de p_{N2} em p_{S1} , de p_{S2} em p_{N1} , e de p_{S2} em p_{S1} . A soma dessas quatro forças para a situação da Figura 9.9 é dada por:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{21} &= \frac{3\mu_0}{4\pi r^4} [(\vec{m}_1 \cdot \hat{r})\vec{m}_2 + (\vec{m}_2 \cdot \hat{r})\vec{m}_1 + (\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2)\hat{r} - 5(\vec{m}_1 \cdot \hat{r})(\vec{m}_2 \cdot \hat{r})\hat{r}] \\ &= -\vec{F}_{12} . \end{aligned} \quad (9.13)$$

Nessa expressão r é a distância entre os centros dos dois dipolos, $\hat{r} = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)/r$ é o vetor unitário apontando do centro do dipolo 2 para o centro do dipolo 1, ao passo que \vec{F}_{12} é a força resultante exercida pelo dipolo 1 sobre o dipolo 2. Essa relação é válida quando a distância r entre os centros dos dipolos é muito maior do que seus comprimentos, isto é, quando $r \gg \ell_1$ e $r \gg \ell_2$.

A força entre duas massas varia com o inverso do quadrado da distância entre elas. Da mesma forma, a força entre duas cargas elétricas varia com o inverso do quadrado da distância entre elas. Por outro lado, observa-se pela Equação (9.13) que a força entre dois dipolos varia com o inverso da quarta potência da distância entre eles. Além disso, nem sempre essa força entre os dois dipolos vai estar ao longo da linha reta que une seus centros.

Da mesma forma é possível obter o torque exercido entre dois dipolos ao somar os quatro torques exercidos por seus polos, a saber, o torque de p_{N2} em p_{N1} , de p_{N2} em p_{S1} , de p_{S2} em p_{N1} , e de p_{S2} em p_{S1} . Também é possível obter a força e o torque magnético exercido pela Terra sobre uma bússola

ao considerar separadamente as forças magnéticas exercidas pela Terra sobre cada um dos polos magnéticos que compõem a bússola, assim como os torques exercidos pela Terra sobre os dois polos da bússola.

9.3.3 Explicação da Interação entre Dois Ímãs Utilizando o Conceito de Força

Vamos explicar aqui a interação entre dois ímãs supondo que interagem diretamente entre si. Um caso simples visto na Seção 8.3 é aquele no qual os eixos magnéticos de dois ímãs estão alinhados ao longo da reta que une seus centros e apontando nessa mesma direção, Figura 9.10 (a). Nesse caso observa-se uma atração entre eles. Essa situação pode ser modelada utilizando a Equação (9.13) supondo que os dipolos \vec{m}_1 e \vec{m}_2 apontam na direção do eixo z , $\vec{m}_1 = m_1\hat{z}$ e $\vec{m}_2 = m_2\hat{z}$, sendo essa também a direção unindo os centros dos dipolos 1 e 2. Supondo o dipolo 1 na origem e o dipolo 2 ao longo do eixo z a uma distância r da origem, vem da Figura 9.10 (b) que o vetor unitário apontando de 2 para 1 está na direção negativa do eixo z , isto é, $\hat{r} = -\hat{z}$.

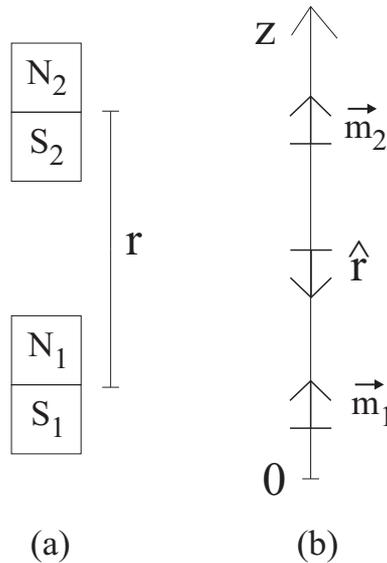


Fig. 9.10: (a) Dois ímãs alinhados entre si e com a reta que une seus centros. (b) Dipolos magnéticos alinhados entre si e com a reta que une seus centros.

Nesse caso vem da Equação (9.13) que a força exercida pelo dipolo 2 atuando sobre o dipolo 1, \vec{F}_{21} , é dada por:

$$\vec{F}_{21} = \frac{3\mu_0 m_1 m_2}{2\pi r^4} \hat{z} = -\vec{F}_{12} . \quad (9.14)$$

Ou seja, é uma força atrativa que é proporcional ao produto dos momentos magnéticos e que varia com o inverso da quarta potência da distância entre os dipolos. Invertendo a orientação de apenas um dos dipolos faz com que a força entre eles fique repulsiva. Porém, se invertermos a orientação dos dois dipolos (fazendo com que seus momentos magnéticos apontem na direção $-\hat{z}$), a força entre eles continuará atrativa.

Uma outra situação que apresentamos na Seção 8.3 foi aquela de dois ímãs cilíndricos sobre uma mesa. Nesse caso temos seus eixos magnéticos paralelos, mas com cada eixo magnético ortogonal à reta unindo os centros dos dois ímãs, Figura 9.11 (a). Essa situação pode ser modelada utilizando a Equação (9.13) supondo que os dipolos 1 e 2 apontam na direção do eixo z , $\vec{m}_1 = m_1\hat{z}$ e $\vec{m}_2 = m_2\hat{z}$, sendo que seus centros estão localizados ao longo do eixo x . Supondo o dipolo 1 na origem e o dipolo 2 ao longo do eixo x a uma distância r da origem, vem da Figura 9.11 (b) que o vetor unitário apontando de 2 para 1 está na direção negativa do eixo x , isto é, $\hat{r} = -\hat{x}$.

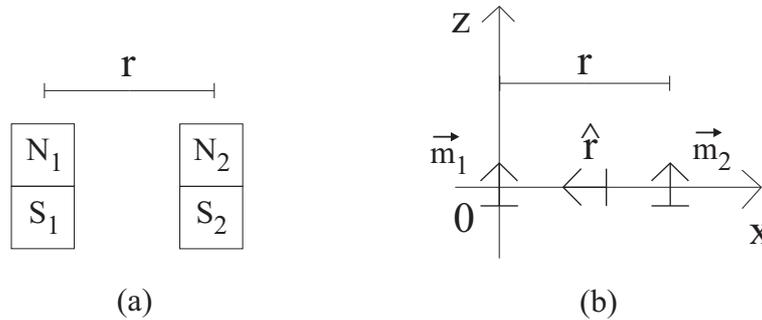


Fig. 9.11: (a) Dois ímãs paralelos entre si e ortogonais à reta que une seus centros. (b) Dipolos magnéticos paralelos e ortogonais à reta que une seus centros.

Nesse caso vem da Equação (9.13) que a força exercida pelo dipolo 2 sobre o dipolo 1, \vec{F}_{21} , é dada por:

$$\vec{F}_{21} = -\frac{3\mu_0 m_1 m_2}{4\pi r^4} \hat{x} = -\vec{F}_{12} . \quad (9.15)$$

Ou seja, é uma força repulsiva que é proporcional ao produto dos momentos magnéticos e que varia com o inverso da quarta potência da distância entre os dipolos. Invertendo a orientação de apenas um dos dipolos faz com que a força entre eles fique atrativa. Porém, se invertermos a orientação dos dois dipolos (fazendo com que seus momentos magnéticos apontem na direção $-\hat{z}$), a força entre eles continuará repulsiva.

Supondo a mesma distância r no caso das Figuras 9.10 e 9.11 e as mesmas intensidades de dipolo magnético nos dois casos, vem que a intensidade da

força atrativa entre dois dipolos alinhados é o dobro da força repulsiva entre dois dipolos paralelos.

10. EXPLICAÇÕES DAS INTERAÇÕES ATRAVÉS DA AÇÃO POR CONTATO

Hoje em dia a maior parte dos autores e livros didáticos são contrários à concepção de uma ação direta a distância entre os corpos. Em vez desse conceito de ação a distância, admitem que existe apenas ação através de contato. Supõe-se atualmente que o contato ocorre através de um campo (campo gravitacional, campo elétrico ou campo magnético). Os corpos que estão interagindo são chamados de corpo fonte e corpo de prova. O corpo fonte é aquele que gera a força ou o campo, sendo o corpo de prova aquele que sente a força exercida pelo campo gerado pelo corpo fonte. Em geral supõe-se que o chamado corpo fonte (massa gravitacional, carga elétrica ou polo magnético) gera ou produz no espaço ao seu redor uma entidade chamada campo. Esse campo viajaria tipicamente na velocidade da luz. Quando esse campo atinge o chamado corpo de prova (uma segunda massa gravitacional, carga elétrica ou polo magnético), esse corpo de prova sentiria a ação desse campo que está em contato com ele. Essa ação sobre o corpo de prova seria uma força exercida pelo campo sobre ele, sendo então acelerado em relação a um referencial inercial caso esteja livre para se deslocar no espaço. O campo que atua sobre o corpo de prova não seria gerado por ele próprio, mas sim pelo corpo fonte. Nessa concepção de ação por contato não há mais interação direta entre corpos de mesma natureza (como a interação entre duas massas gravitacionais, entre duas partículas eletrizadas, entre dois ímãs ou entre dois fios conduzindo corrente elétrica). Em vez disso supõe-se que o corpo fonte gera um ente ou entidade ao seu redor, o campo, sendo esse campo que vai atuar sobre o corpo de prova quando entrar em contato com ele. A ampla maioria dos físicos considera a interação por campos como sendo a explicação para os processos de ação a distância.

10.1 Gravitação

O campo gravitacional \vec{g} em geral é definido nos livros didáticos como a força gravitacional por unidade de massa. Em particular, o campo gravitacional em um certo ponto é obtido colocando uma massa de prova m nesse ponto,

calculando-se a força gravitacional \vec{F} exercida por todas as outras massas sobre m , dividindo então essa força pela massa m . Vamos dar um exemplo desse campo utilizando a força dada pela Equação (9.3). Vamos supor que temos duas partículas com massas m_1 e m_2 localizadas nos vetores posição \vec{r}_1 e \vec{r}_2 interagindo gravitacionalmente. O campo gravitacional $\vec{g}_2(\vec{r}_1)$ gerado pela massa m_2 e atuando no ponto \vec{r}_1 onde encontra-se m_1 é então definido por:

$$\vec{g}_2(\vec{r}_1) = \frac{\vec{F}_{21}}{m_1} = -G \frac{m_2}{r^2} \hat{r}. \quad (10.1)$$

Nessa equação r é a distância entre as partículas 1 e 2, sendo \hat{r} o vetor unitário apontando de 2 para 1. Por essa expressão vem que o campo gravitacional de uma massa m_2 é proporcional ao valor dessa massa, diminui a partir dessa massa com o inverso do quadrado da distância, apontando radialmente para ela. Na Figura 10.1 apresentamos uma representação gráfica desse campo.

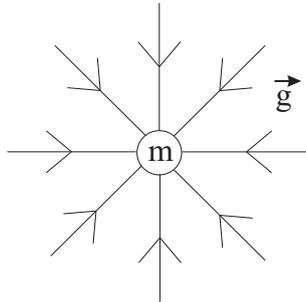


Fig. 10.1: Campo gravitacional \vec{g} devido a uma massa gravitacional m .

A força gravitacional sobre uma massa m em um campo gravitacional \vec{g} é então dada por $\vec{F} = m\vec{g}$. Nessa expressão considera-se que é o campo gravitacional \vec{g} que está atuando sobre a massa de teste m , sendo esse campo gravitacional devido a outras massas.

Consideramos agora a explicação da queda livre de uma maçã de acordo com o conceito de campo. Nesse ponto de vista não há uma interação direta entre a Terra e a maçã. Na ação por contato admite-se que a Terra gera um campo gravitacional ao seu redor que vai existir independente da presença ou não de um corpo de prova como a maçã que vá sofrer a ação desse campo. O campo gravitacional aponta para o centro da Terra, diminui sua intensidade a partir da superfície da Terra com o inverso do quadrado da distância entre o ponto onde está sendo calculado e o centro da Terra, tendo o valor de $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ na superfície da Terra, Figura 10.2 (a). Quando uma maçã

ou outro corpo de prova de massa m é colocado em uma região na qual há um campo gravitacional \vec{g} ela vai sofrer uma força gravitacional $\vec{F} = m\vec{g}$, Figura 10.2 (b). Pela segunda lei de Newton, Equação (9.1), se essa massa estiver livre ela vai então sofrer uma aceleração \vec{a} dada por: $\vec{a} = \vec{F}/m = \vec{g}$. A aceleração de queda livre em um certo ponto terá o mesmo valor que o campo gravitacional nesse ponto, Figura 10.2 (c).

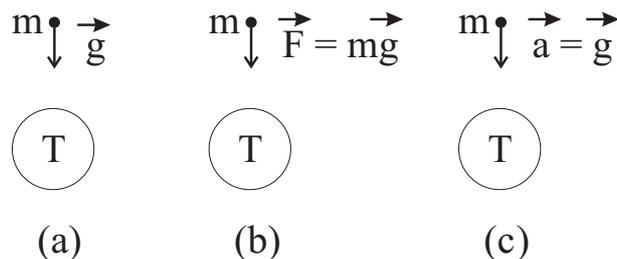


Fig. 10.2: (a) Campo gravitacional \vec{g} ao redor da Terra. (b) Força exercida pelo campo sobre uma massa m . (c) Aceleração sofrida pela massa m .

10.2 Eletricidade

O campo elétrico \vec{E} é definido em muitos livros didáticos como sendo a força elétrica por unidade de carga. Vamos supor que temos duas partículas eletrizadas com cargas q_1 e q_2 localizadas nos vetores posição \vec{r}_1 e \vec{r}_2 interagindo entre si. O campo elétrico $\vec{E}_2(\vec{r}_1)$ produzido pela carga q_2 e atuando no ponto \vec{r}_1 no qual encontra-se a partícula 1 pode então ser obtido pela Equação (9.7):

$$\vec{E}_2(\vec{r}_1) = \frac{\vec{F}_{21}}{q_1} = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}. \quad (10.2)$$

Nessa equação r é a distância entre 1 e 2, sendo \hat{r} o vetor unitário apontando de 2 para 1. Esse versor \hat{r} aponta radialmente para fora a partir da carga 2. Pela Equação (10.2) vem que o campo elétrico é proporcional ao valor da carga q_2 do corpo fonte e diminui com o inverso do quadrado da distância a partir desse ponto. Se a carga 2 for positiva, esse campo aponta radialmente para fora a partir dela, Figura 10.3 (a). Caso a carga 2 seja negativa, então seu campo elétrico apontará radialmente para ela.

Se temos uma carga de prova q na presença de um campo elétrico \vec{E} vem que a força elétrica atuando sobre a carga é dada por $\vec{F} = q\vec{E}$. Nessa expressão considera-se que é o campo elétrico que está atuando sobre o corpo de prova, sendo esse campo elétrico originado por outras cargas fonte.

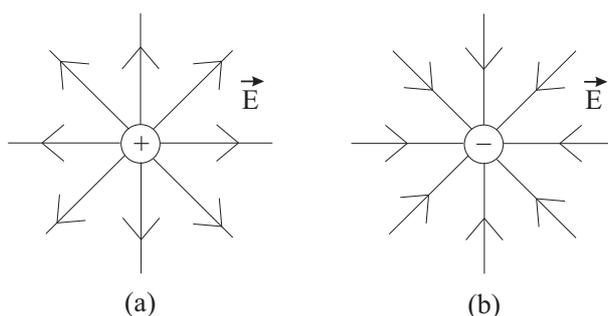


Fig. 10.3: (a) Campo elétrico \vec{E} devido a uma carga pontual positiva. (b) Campo elétrico de uma carga pontual negativa.

Apresentamos agora, utilizando o conceito de campo, a explicação da repulsão entre dois pêndulos eletrizados mostrada na Figura 10.4 (a). Supondo cargas q_1 e q_2 positivas, vem que q_2 cria um campo elétrico radial \vec{E}_2 se afastando da carga 2. Da mesma forma a carga q_1 cria um campo elétrico radial \vec{E}_1 afastando-se radialmente dela. Supondo $q_2 > q_1$ vem que \vec{E}_2 tem uma intensidade maior do que \vec{E}_1 , Figura 10.4 (b). Como a carga q_1 está em contato com o campo \vec{E}_2 devido à carga 2, ela sente uma força elétrica $\vec{F}_{21} = q_1\vec{E}_2$ apontando de 2 para 1. Da mesma forma, a carga 2 sente uma força $\vec{F}_{12} = q_2\vec{E}_1$ por estar em contato com o campo elétrico \vec{E}_1 devido à carga 1. Essa força \vec{F}_{12} aponta de 1 para 2, sendo da mesma intensidade que a força de 2 em 1, Figura 10.4 (c).

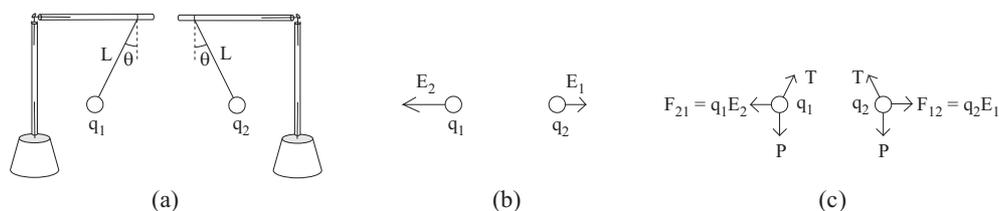


Fig. 10.4: (a) Cargas positivas q_1 e q_2 repelindo-se, com $q_2 > q_1$. (b) Campos elétricos \vec{E}_1 e \vec{E}_2 devidos às cargas 1 e 2, respectivamente. (c) Forças elétricas $\vec{F}_{21} = q_1\vec{E}_2$ e $\vec{F}_{12} = q_2\vec{E}_1$ atuando sobre as cargas 1 e 2, respectivamente.

10.3 Magnetismo

Assim como nos casos da gravitação e da eletricidade, a explicação moderna da interação magnética utiliza o conceito de campo. Como até hoje não se encontrou nenhum material contendo apenas um polo Norte ou apenas

um polo Sul, temos de lidar com a interação entre dipolos magnéticos. Seja então um dipolo magnético 2 contendo um polo Norte p_{N2} e um polo Sul p_{S2} separados por uma distância ℓ_2 . Seu momento de dipolo é dado por $\vec{m}_2 = p_{N2}\ell_2\hat{\ell}_2$, no qual o versor $\hat{\ell}_2$ tem módulo unitário apontando do polo Sul para o polo Norte. Vamos supor que esse dipolo esteja localizado na origem O de um sistema de referência inercial e queremos saber o campo magnético que ele produz no ponto \vec{r}_1 localizado a uma distância r da origem. Mostra-se na maioria dos livros didáticos que o campo magnético $\vec{B}_2(\vec{r}_1)$ devido a esse dipolo é dado por:

$$\vec{B}_2(\vec{r}_1) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\vec{m}_2 \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{m}_2}{r^3}. \quad (10.3)$$

Nessa equação r é a distância entre o ponto de observação e o dipolo magnético \vec{m}_2 , sendo \hat{r} o vetor de módulo unitário apontando do dipolo magnético até o ponto de observação.

A intensidade do campo magnético varia com o inverso da terceira potência da distância. Já o campo gravitacional de uma massa m e o campo elétrico devido a uma carga q variam com o inverso do quadrado da distância, Equações (10.1) e (10.2).

Na Figura 10.5 (a) mostramos as linhas de campo magnético devidas a esse dipolo, ao passo que na Figura 10.5 (b) mostramos as linhas de campo magnético devidas a um ímã uniformemente magnetizado em forma de barra.

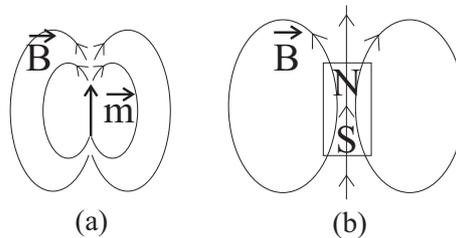


Fig. 10.5: (a) Linhas de campo magnético \vec{B} devidas a um dipolo magnético. (b) Linhas de campo devidas a um ímã.

Já a força exercida pelo dipolo magnético \vec{m}_2 sobre o dipolo \vec{m}_1 é dada por:

$$\vec{F}_{21} = (\vec{m}_1 \cdot \nabla_1) \vec{B}_2(\vec{r}_1). \quad (10.4)$$

Essa expressão coincide com a Equação (9.13). Mas agora a interpretação é completamente diferente. Na Subseção 9.3.2 tínhamos uma força entre dois dipolos magnéticos vindo de uma interação direta a distância entre eles. Já na interação por contato vem que o dipolo 2 gera um campo magnético ao

seu redor. É esse campo magnético que vai atuar sobre o dipolo 1 quando entra em contato com ele.

No Capítulo 11 apresentaremos outras propriedades do conceito de campo.

11. PROPRIEDADES DO CONCEITO DE CAMPO

O conceito de campo evoluiu de significado ao longo do tempo, como ocorreu também com outros conceitos na história da ciência.

Os livros de física básica, que constituem o currículo dos primeiros semestres dos cursos universitários de ciências exatas, possuem um estilo de apresentação sobre o conceito de campo no qual pouco discutem sobre sua conceituação física. Permanecem algumas definições originais que não são consideradas atuais para esse conceito.

O conceito de campo é devido principalmente a Michael Faraday (1791-1867), James Clerk Maxwell (1831-1879) e Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), tendo sido também desenvolvido por outros pesquisadores. Ele foi introduzido inicialmente para descrever as interações elétricas e magnéticas, sendo depois utilizado também na gravitação. Vamos aqui englobar todos esses três tipos de interação no conceito de campo em geral.

O conceito de campo é historicamente polissêmico, ou seja, tem vários significados. Estes múltiplos sentidos associados ao mesmo conceito de campo aparecem nos trabalhos originais de Faraday e Maxwell, e também em alguns livros didáticos modernos. Alguns trabalhos apontam a existência destes vários significados associados à palavra campo:¹

11.1 Alguns Aspectos Históricos Ligados ao Conceito de Campo

A definição original de campo apresentada por Faraday e Maxwell é de que o campo é uma região do espaço ao redor dos corpos fonte que geram as forças, isto é, ao redor de massas gravitacionais, de cargas elétricas, de polos magnéticos, de ímãs, e de fios com corrente.

O aspecto importante a ser enfatizado nessa definição é o de que, em vez de admitir que o campo é algo (alguma entidade, substância ou ente material) que está no espaço ao redor do corpo fonte, esses autores definiram que o campo era o próprio espaço vazio ao redor do corpo fonte.

¹ [Gar04], [KS05], [SK07], [KS08], [Rib08], [RVA08], [ARV09], [AC11], [Ass13, Seção 2.9] e [AC15].

Faraday utilizou a palavra “campo” pela primeira vez em 7 de novembro de 1845, em seu Diário.² Mas muito antes desta época já utilizava expressões análogas tais como “curvas magnéticas,” “linhas magnéticas,” “linhas de força magnética,” ou “linhas de força” como pode ser visto em seus trabalhos.³ Ele começou a mencionar o “campo magnético” nas suas publicações apresentadas à Royal Society em 1845 e publicadas em 1846.⁴

Em um artigo publicado em 1851 ele definiu o *campo* como sendo a *região do espaço* ao redor dos corpos que estavam interagindo (os números entre parênteses referem-se aos parágrafos da obra de Faraday, nossa ênfase em itálico):⁵

2806. Tentarei agora considerar qual é a influência que os corpos paramagnéticos e diamagnéticos, considerados como condutores (2797), exercem sobre as linhas de força em um campo magnético. *Qualquer porção do espaço atravessada por linhas de força magnética, pode ser considerada como um tal campo*, e provavelmente não existe espaço sem elas. A condição do campo pode variar em intensidade de potência, de lugar para lugar, seja ao longo das linhas ou através delas; mas será melhor assumir na consideração atual um campo por toda parte de força igual, e já descrevi anteriormente como isso pode ser produzido para um certo espaço limitado (2465).

O campo para Faraday era a própria região do espaço, isto é, um campo magnético pode ser considerado como qualquer região do espaço atravessada por linhas de potência magnética (ou por linhas de força, outra expressão utilizada por ele). Para Faraday, essas linhas de potência magnética poderiam ser visualizadas por meio de limalhas de ferro.⁶

Maxwell adotou as concepções de Faraday e expressou-as matematicamente. Em um artigo de 1864, intitulado “Uma teoria do campo eletromagnético”, apresentou a seguinte definição, ênfase do próprio Maxwell:⁷

(3) Portanto, a teoria que proponho pode ser chamada de uma teoria do *Campo Eletromagnético*, já que ela lida com o espaço nas redondezas dos corpos elétricos e magnéticos, e pode ser chamada de uma

² [Ner89, Nota 17].

³ [Far52, p. 281, §114], [Far52, p. 595, §2149], [Far52, p. 758, §3071] e [Far11, pág. 193].

⁴ [Far52, p. 608, §2247] e [Far52, p. 608, §2252].

⁵ [Far52, §2806, pág. 690].

⁶ [Far52, p. 281, §114] e [Far52, p. 758, §3071].

⁷ [Max65] e [Max65, p. 527]. Os números (3) e (4) fazem parte da numeração do artigo de Maxwell.

Teoria *Dinâmica*, já que ela assume que neste espaço existe matéria em movimento, por meio da qual são produzidos os fenômenos eletromagnéticos.

(4) O campo eletromagnético é aquela região do espaço que contém e circunda os corpos em condições elétricas e magnéticas.

Em sua obra principal, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, de 1873, encontramos a mesma definição de “campo elétrico” como uma região do espaço circundando corpos eletrizados.⁸

44.] O campo elétrico é a porção do espaço na vizinhança dos corpos eletrizados, considerado com referência aos fenômenos elétricos.

Maxwell apresentou uma definição similar de campo magnético ao interpretar a descoberta de Oersted da deflexão de uma bússola colocada nas proximidades de um longo fio com corrente:⁹

476.] Portanto, parece que no espaço ao redor de um fio transmitindo uma corrente elétrica agem forças sobre um ímã que dependem da posição do fio e da intensidade da corrente. Portanto, o espaço no qual agem estas forças pode ser considerado como um campo magnético, e podemos estudá-lo da mesma forma como já estudamos o campo na vizinhança dos ímãs comuns, ao traçar o curso das linhas de força magnética, e medindo a intensidade da força em cada ponto.

Esta definição também foi seguida por J. J. Thomson (1856-1940):¹⁰

A região na qual atrações e repulsões [elétricas] são observadas é chamada de campo elétrico.

James Jeans (1877-1946) também seguiu as definições de Faraday e Maxwell:¹¹

O espaço na vizinhança de cargas de eletricidade, considerado com referência aos fenômenos elétricos ocorrendo neste espaço, é denominado de campo elétrico.

⁸ [Max54, Vol. 1, §44, pág. 47].

⁹ [Max54, Vol. 2, §476, pág. 139].

¹⁰ [Tho21, pág. 1].

¹¹ [Jea41, pág. 24].

Heilbron resumiu essas definições nos seguintes termos:¹²

Campo em geral significa uma região do espaço considerado com relação ao comportamento potencial de corpos de prova que se movem nessa região.

Essa definição de campo como sendo uma região do espaço ao redor dos corpos que geram as forças permanece em alguns livros didáticos modernos. Gaspar, por exemplo, expressou-se nas seguintes palavras:¹³

Uma região do espaço onde atuam forças magnéticas é um campo magnético.

Ela pode ser encontrada também em um manual de introdução à eletricidade e ao magnetismo de um grande físico brasileiro, professor Roberto Salmeron:¹⁴

Chama-se campo elétrico de uma carga à região que envolve essa carga e dentro da qual a carga consegue exercer ações elétricas.

A mesma definição aplicada ao campo gravitacional, ou seja, como sendo a região do espaço na qual uma massa sofre a ação de uma força gravitacional, encontra-se em Jefimenko, por exemplo.¹⁵ Ou ainda no manual do professor Salmeron:¹⁶

Todos sabem que existe uma região vastíssima ao redor da Terra, que tem a propriedade seguinte: todo corpo colocado nessa região é atraído para a Terra [...]. Essa região é um campo de forças chamado campo gravitacional da Terra.

Salmeron faz uma extensão para uma definição geral da ideia de campo como região do espaço:¹⁷

Em Física, chama-se campo de força a qualquer região tal que, se dentro dela for colocado um corpo, ele fica sujeito a forças.

Outra concepção para o conceito de campo que aparece na história da física é a de que ele é algo material que preenche o espaço ao redor do corpo fonte. Essa ideia já aparece nos escritos de Faraday e Maxwell, principalmente relacionada com os conceitos de “linhas de força” e de “éter”. Maxwell, por exemplo, expressou-se da seguinte maneira:¹⁸

¹² [Hei81, pág. 187].

¹³ [Gas03, pág. 265].

¹⁴ [Sal61, pág. 42].

¹⁵ [Jef06, pág. 12].

¹⁶ [Sal61, pág. 43].

¹⁷ [Sal61, pág. 42].

¹⁸ [Max54, pág. viii].

Por exemplo, Faraday visualizava linhas de força atravessando todo o espaço onde os matemáticos viam centros de força atraindo-se a distância. Faraday visualizava um meio onde eles nada viam, somente distância. Faraday procurava a base dos fenômenos em ações que se processavam num meio, eles se satisfaziam ao tê-las achado num poder de ação a distância exercido sobre os fluidos elétricos.

David Griffiths apresentou recentemente um ponto de vista similar:¹⁹

O que é, exatamente, um campo elétrico? Comecei, deliberadamente, com o que se pode chamar de interpretação ‘mínima’ de \mathbf{E} [campo elétrico], como passo intermediário no cálculo das forças elétricas. Mas recomendo que pense no campo como uma entidade física ‘real’ que preenche o espaço em torno de qualquer carga elétrica. [...] (É até possível, embora excessivamente trabalhoso, formular a eletrodinâmica clássica como uma teoria de ‘ação a distância’ e dispensar, totalmente, a noção de campo.) Não posso, portanto, dizer o que é um campo, mas apenas como calculá-lo e o que ele pode fazer por você uma vez que você o calculou.

Em outro trecho ele afirma algo semelhante:²⁰

[...] dizemos que o espaço em torno de uma carga elétrica é permeado por **campos** elétricos e magnéticos [...]

Uma definição semelhante aparece no livro de Serway:²¹

Nesta abordagem, diz-se que um **campo elétrico** existe na região do espaço em torno de um objeto carregado, a **carga fonte**.

Maxwell apresentou sua teoria eletromagnética da luz no Capítulo 20 de seu livro *Tratado de Eletricidade e Magnetismo*. Ele defendia a existência de um meio material, o éter, existindo entre os corpos materiais. Este meio seria elástico e teria uma densidade finita de matéria. A luz seria uma perturbação eletromagnética neste meio, propagando-se em relação a ele:²²

¹⁹ [Gri11, págs. 43–44].

²⁰ [Gri11, pág. xiv].

²¹ [SJ15, pág. 12].

²² [Max54, Vol. 2, §781, pág. 431].

781.] Em várias partes deste tratado tem sido feita uma tentativa de explicar os fenômenos eletromagnéticos por meio da ação mecânica transmitida de um corpo para outro através de um meio ocupando o espaço entre eles. A teoria ondulatória da luz também assume a existência de um meio. Temos agora de mostrar que as propriedades do meio eletromagnético são idênticas às propriedades do meio luminífero.

[...]

Mas as propriedades dos corpos são passíveis de medida quantitativa. Portanto, obtemos o valor numérico de alguma propriedade do meio, tal como a velocidade com a qual uma perturbação é propagada através dele, que pode ser calculada a partir das experiências eletromagnéticas, e também observada diretamente no caso da luz. Se for encontrado que a velocidade de propagação das perturbações eletromagnéticas é a mesma que a velocidade da luz, e isto não apenas no ar, mas [também] em outros meios transparentes, teremos fortes motivos para acreditar que a luz é um fenômeno eletromagnético, e a combinação da evidência óptica com a evidência elétrica produzirá uma convicção sobre a realidade do meio similar à convicção que obtemos, no caso dos outros tipos de matéria, a partir da evidência combinada dos sentidos.

Faraday, Maxwell e Lorentz acreditavam que o espaço entre as cargas e os ímãs estivesse preenchido por um meio material. Eles acreditavam que fosse por intermédio desse meio material que ocorreriam as interações entre as cargas e os ímãs. Esse meio material era denominado éter. Mas o conceito de éter como mediador das interações eletromagnéticas, encontrado nas concepções de Maxwell e de Lorentz, o qual embasava suas equações matemáticas, foi considerado inconsistente dentro da nova epistemologia advinda dos trabalhos de Albert Einstein (1879-1955). Assim, o mediador material das interações eletromagnéticas passou a ser considerado supérfluo e foi abandonado na física.²³

11.2 O Campo Propagando-se no Espaço Vazio

O campo eletromagnético propaga-se no espaço vazio de acordo com Einstein.

Em seu artigo de 1905 introduzindo a teoria da relatividade restrita, Einstein tornou o éter supérfluo e passou a considerar que a luz e as ondas ele-

²³ [Ein78, pág. 48].

tromagnéticas propagam-se no espaço vazio, nossa ênfase:²⁴

Exemplos deste gênero, assim como o insucesso das experiências feitas para constatar um movimento da Terra em relação ao meio luminífero (“Lichtmedium”) levam à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Eletrodinâmica os fenômenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à ideia de um repouso absoluto. Pelo contrário em todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da mecânica, também são igualmente válidas leis ópticas e eletrodinâmicas da mesma forma — o que, até a primeira ordem de aproximação, já está demonstrado. Vamos erguer a categoria de postulado esta nossa suposição (a cujo conteúdo chamaremos daqui em diante “Princípio da Relatividade”); e, além disso, vamos introduzir o postulado — só aparentemente incompatível com o primeiro — de que *a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada*, independente do estado de movimento da fonte luminosa. Estes dois postulados são suficientes para chegar a uma eletrodinâmica de corpos em movimento, simples e livre de contradições, baseada na teoria de Maxwell para corpos em repouso. *A introdução de um “éter luminífero” revelar-se-á supérflua*, visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um “espaço em repouso absoluto”, nem de atribuir um vetor velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo eletromagnético.

No manual do professor Salmeron encontra-se a seguinte passagem em uma seção sobre ondas eletromagnéticas.²⁵

Concluimos então que uma carga elétrica em movimento produz ao seu redor dois campos: o elétrico, que existe sempre, e o magnético, que ela produz pelo fato de estar em movimento.

[...] Quando a carga Q se desloca esses dois campos também se deslocam: [...] Isso nos dá a primeira ideia de como um campo elétrico e um magnético podem propagar-se juntos pelo espaço: basta que uma carga elétrica entre em movimento.

[...] Definição — Chama-se onda eletromagnética ao conjunto dos campos elétricos e magnéticos propagando-se pelo espaço.

²⁴ [Ein78, pág. 48].

²⁵ [Sal61, págs. 381-383].

[...] Vemos por aí que nas ondas eletromagnéticas não existem partículas materiais em movimento ondulatório, como por exemplo no caso das ondas sonoras ou das ondas que se formam na superfície da água.

11.3 O Campo Definido a Partir da Força

O campo é em geral definido como sendo uma grandeza ou função vetorial (com módulo, direção e sentido). O campo gravitacional é normalmente representado por \vec{g} , o campo elétrico por \vec{E} , ao passo que o campo magnético é representado por \vec{B} . Hoje em dia, em vez do campo ser definido como uma região do espaço ao redor dos corpos fonte, ele é definido através da força atuando sobre os corpos de prova. Essa é a definição atual, presente na ampla maioria dos livros didáticos.

O campo gravitacional é definido como a força gravitacional por unidade de massa, o campo elétrico como a força eletrostática por unidade de carga e o campo magnético como a força magnetostática por unidade de polo magnético. Nesse caso a grandeza fundamental ainda é a força que atua sobre o corpo, sendo o campo um conceito secundário definido a partir da força.

Essa é a definição de campo gravitacional apresentada por Tipler e Mosca:²⁶

O **campo gravitacional** no ponto P é determinado colocando-se uma partícula pontual de massa m em P e calculando-se a força gravitacional \vec{F}_g exercida por todas as outras partículas sobre ela. A força gravitacional \vec{F}_g , dividida pela massa m , é o campo gravitacional \vec{g} em P :

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m} \quad 11 - 23$$

Definição — campo gravitacional

Uma definição análoga de campo gravitacional encontra-se em diversos livros didáticos.²⁷

Halliday, Resnick e Walker, por exemplo, definem o campo elétrico da seguinte maneira:²⁸

²⁶ [TM09a, pág. 387].

²⁷ [Sym82, pág. 293], [KG97, pág. 165] e [SJ04a, pág. 167].

²⁸ [HRW09, pág. 24].

O campo elétrico é um *campo vetorial*, constituído por uma distribuição de *vetores*, um para cada ponto de uma região em torno de um objeto eletricamente carregado, como um bastão de vidro. Em princípio, podemos definir o campo elétrico em um ponto nas proximidades de um objeto carregado, como o ponto P da Fig. 22-1a, da seguinte forma: colocamos no ponto P uma carga positiva q_0 , chamada *carga de prova*, medimos a força eletrostática \vec{F} que age sobre a carga q_0 e definimos o campo elétrico \vec{E} produzido pelo objeto através da equação

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \text{ (campo elétrico)}. \quad (22 - 1)$$

Uma definição análoga encontra-se em diversos livros didáticos.²⁹

O conceito de força, apesar de estar presente nas duas concepções de interação física discutidas nessa dissertação, possui papel diverso em cada uma delas. Para a visão de ação a distância, para a qual existem apenas os corpos em interação direta, toda a informação sobre o estado de movimento dos corpos pode ser adquirida a partir da expressão da força entre eles. Já no caso da interação por contato, o campo é o agente que deve ser analisado para se obter as informações sobre o movimento dos corpos. Em outras palavras, a força tem primazia na interação por ação a distância, ao passo que na interação por contato o campo passa a ter primazia conceitual.

11.4 O Campo como Intermediário na Interação entre Corpos

O campo é o agente intermediário para a ação entre massas gravitacionais, entre cargas elétricas, entre polos magnéticos, entre ímãs, assim como é o agente intermediário para a interação entre correntes elétricas.

Um exemplo dessa ideia aparece no livro de Griffiths:³⁰

A formulação de campo da eletrodinâmica

O problema fundamental que uma teoria eletromagnética espera resolver é o seguinte: se eu segurar uma porção de cargas elétricas *aqui* (e talvez as chacoalhe um pouco) — o que vai acontecer com as outras cargas elétricas, que estão *ali*? A solução clássica toma a forma de uma **teoria de campo**: dizemos que o espaço em

²⁹ [Jac75, pág. 28], [Gri11, pág. 43], [RMC82, pág. 39], [CS02, pág. 437], [YF04, pág. 199], [SJ04b, pág. 684], [TM09b, págs. 11-12].

³⁰ [Gri11, pág. xiv].

torno de uma carga elétrica é permeado por **campos** elétricos e magnéticos (o ‘odor’ eletromagnético, por assim dizer, da carga). Uma segunda carga, na presença desses campos, sente uma força; os campos, então, transmitem a influência de uma carga para a outra — eles intermedeiam a interação.

Hecht apresenta ideias similares a essas.³¹

Com Faraday, o conceito de campo generalizou-se e passou a ser conveniente assumir que uma carga estabelecia um campo elétrico **E** no espaço, e que qualquer outra carga, imersa em tal campo, com ela interagia (e vice-versa) sendo o campo o mediador de tal interação.

Também em livros de divulgação científica essas ideias são apresentadas, como no caso da obra de Muller.³²

Pensava-se que uma carga elétrica exercia uma força diretamente sobre outra carga elétrica. Atualmente sabemos que existe alguma coisa intermediária acontecendo. A carga elétrica cria algo que chamamos de um *campo elétrico* que preenche o espaço. É este campo que exerce força sobre a segunda carga.

É aceito na descrição elementar das teorias gravitacionais e eletromagnéticas que o campo gerado por corpos fontes atua sobre outros corpos chamados de corpos de prova ou de corpos de teste. O campo gerado ou produzido pelos corpos fonte atua sobre os corpos de prova (ou seja, não haveria uma interação direta entre um corpo fonte e um corpo de prova).

O campo gravitacional gerado por uma massa, por exemplo, atua sobre outras massas gravitacionais. O campo elétrico gerado por um corpo eletrizado atua sobre outros corpos eletrizados. Já o campo magnético gerado por um certo corpo (como um polo magnético, um ímã, uma corrente elétrica ou um corpo eletrizado em movimento) atua sobre outros corpos (como outros polos magnéticos, outros ímãs, outras correntes elétricas ou outros corpos eletrizados em movimento).

Essa interpretação é trazida por praticamente todos os livros atuais que se ocupam da discussão um pouco mais detalhada sobre o conceito de campo. Um exemplo encontra-se no tradicional livro de óptica de Hecht:³³

³¹ [Hec02, pág. 109].

³² [Mul10, pág. 216].

³³ [Hec02, pág. 60].

Sabe-se experimentalmente que cargas, mesmo no vazio, interagem mutuamente. Recorde-se aquela experiência clássica na qual uma pequena esfera de medula de sabugueiro sente a presença de uma barra carregada sem entrar em contato com ela. Uma explicação admissível seria a de que cada carga emite (e absorve) partículas (*fotoes virtuais*). A permuta destas partículas entre cargas pode ser encarada como uma forma de interação. Uma explicação alternativa é dada pela teoria clássica, associando a cada carga um campo elétrico que a rodeia, sendo então suficiente, neste caso, admitir que cada carga interage diretamente com o campo em que está imersa.

11.5 As Teorias Modernas de Campo

Ainda que não seja o objetivo deste trabalho discutir o significado da ideia de campo para as teorias contemporâneas, mencionamos aqui brevemente essas novas abordagens sobre o que alguns físicos entendem por campo na atualidade. Indicamos aqui três referências para aqueles que se interessarem por essa abordagem:

- Os capítulos 3 e 4 da obra *Óptica* de Eugene Hecht, já traduzida para o português.³⁴ A abordagem é introdutória e necessita-se de pouca matemática para acompanhar o texto. Para aqueles que não possuem interesse técnico, ou não possuem qualificações matemáticas do cálculo diferencial, as seções 3.7 e 4.11 são suficientes. Nos próximos dois parágrafos apresentamos sucintamente algumas ideias da seção 3.7 dessa obra de Hecht.
- Para aqueles que possuem interesse técnico e habilidades matemáticas em cálculo tensorial, sugerimos a obra *Teoria Quântica de Campos* de Marcelo O. C. Gomes.³⁵
- Para os que possuem interesse filosófico e dominam o inglês indicamos o texto *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory*, editado por Harvey Brown e Rom Harré.³⁶

Nessa abordagem, situada no paradigma da mecânica quântica, os campos são entidades fundamentais. Este é o ponto de vista da teoria quântica de

³⁴ [Hec02].

³⁵ [Gom02].

³⁶ [BHE90].

campos. A visão de campo deixa de ser uma espécie de contínuo que exerce forças nas partículas que nele estão imersas. Agora campos e partículas são entendidos como aspectos distintos de uma mesma entidade fundamental. Ou seja, cada partícula elementar existente possui um campo associado a ela de maneira inseparável. Alguns cientistas dizem que a entidade fundamental é o campo e que uma partícula seria um tipo de ‘quanta’ que traduz a quantificação da energia do campo. Outros cientistas defendem que as partículas é que são fundamentais e que o campo seria uma extensão da partícula em estados coerentes.

A teoria quântica de campos admite que todos os campos são quantizados e que as quatro interações fundamentais da natureza (gravitacional, eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte) são mediadas por um tipo especial de partículas, os chamados bósons. Esses bósons seriam emitidos e absorvidos o tempo inteiro pelas partículas em interação. Por exemplo, a partícula mediadora do campo elétrico (ou da interação elétrica) é chamada de fóton virtual. Um elétron que se aproxima de outro elétron, ou de um pósitron, emitiria fótons virtuais que não possuem massa, mas que transportam energia e momento. Esses fótons virtuais seriam absorvidos pela outra partícula em interação e vice-versa. Os fótons são chamados de virtuais pois só existiriam na interação, não podendo escapar para o espaço ou ser detectados por instrumentos de medida.

É interessante citar aqui as palavras de Hecht sobre esse tema:³⁷

Actualmente, a compreensão da misteriosa acção à distância passa pela não menos misteriosa permuta de partículas virtuais, no âmbito de uma teoria matemática com um poder preditivo tremendo, e que se tem vindo a consolidar ao longo do tempo.

³⁷ [Hec02, pág. 111].

12. A COMPARAÇÃO DE MODELOS COMO UMA ESTRATÉGIA DE ENSINO

A polissemia do conceito de campo pode acarretar confusão na cabeça do aluno e fazer com que ele não assimile a ideia que está querendo ser passada. A apresentação de peças de modelos diferentes como se fossem indistintamente cunhadas sobre o mesmo paradigma é extremamente prejudicial ao pensamento. A partir dessa concepção só conseguiremos enxergar sob o prisma de um único modelo ao ponto de não conseguirmos distinguir entre o que são fenômenos e o que são interpretações sob a égide de modelos teoricamente concebidos.

Além de ser atrofiador do aparato cognitivo e não permitir o raciocínio crítico, essa confusão, que mescla tópicos de modelos que possuem premissas distintas, também transmite uma visão errônea do processo de produção científica. Essa indistinção de modelos transmite a ideia de que a construção do conhecimento científico é linearmente contínua e feita de forma pacífica. Essa é uma imagem deturpada do fazer científico, que pode ser corrigida fazendo o confronto de modelos.

Existem outras imagens deturpadas do processo de produção do conhecimento científico que, embora não tenham necessariamente sido geradas por essa forma de apresentação mas por outros vícios do ensino de ciências, seguramente podem ser amenizados adotando-se o confronto de modelos. Essas imagens estão presentes na concepção dos alunos porque também se encontram na concepção dos professores.

Uma pesquisa do professor Daniel Gil-Perez juntamente com alguns pesquisadores colaboradores, classificou sete visões sobre o processo científico que destoam daquilo que é consensual sobre como se faz a ciência:¹

1. Imagem **empírico-indutivista e ateórica**. É uma concepção que acredita na não interferência de qualquer coisa a priori sobre a conclusão dos dados. Os dados são neutros e as conclusões sobre eles só podem ser aquelas. Uma vez observados os dados, a conclusão científica proferida é a própria voz dos dados.

¹ [Gil01].

2. Imagem **rígida (algorítmica, exata, infalível, ...)**. É a visão que acredita que o método científico é uma receita infalível e que uma vez aplicado aos dados dará a única conclusão que pode ser tirada, sendo correta e infalível.
3. A Imagem **aproblemática e ahistórica**. É a concepção que se dá pela forma de como os conhecimentos são transmitidos. A transmissão é feita partindo dos conhecimentos já elaborados, sem mostrar os problemas que lhe deram origem, quais foram os seus desenvolvimentos, as dificuldades encontradas etc. Nessa concepção não são apresentadas as limitações do conhecimento científico atual nem as perspectivas que se abrem.
4. Imagem **exclusivamente analítica**. Enxerga o caráter de redução, separação e simplificação, necessário para o desenvolvimento científico. No entanto, esquece o caráter sintético e integrador da ciência que deve juntar várias especificidades para resolver um problema complexo. Essa visão deformada da ciência poderia ser resumida como o culto da especialização particularizada em detrimento da junção cooperadora.
5. Imagem **acumulativa de crescimento linear**. Essa é a concepção que acredita que o conhecimento é transmitido de forma contínua, sem rupturas, sem mudanças, como foi discutido há pouco.
6. Imagem **individualista e elitista**. É a visão que se transmite de que a ciência é feita por gênios isolados que seriam totalmente diferentes dos seres humanos normais, esquecendo das dificuldades enfrentadas pelos próprios cientistas e o caráter colaborativo da atividade científica.
7. Imagem **socialmente neutra da ciência**. Essa é a concepção que advoga que a ciência acontece isolada das influências externas, tanto em coisas que interfiram na origem do processo de construção do conhecimento, bem como no efeito causado por seus produtos.

Essas imagens deturpadas do fazer científico podem ser consideravelmente reduzidas se expostas a um método de ensino que utiliza o confronto de modelos como base de aprendizagem. O simples ato de colocar dois modelos em oposição já é suficiente para colocar por terra as visões (1), (2), (3), (5) e (7). Ao expor a atividade científica dessa maneira ficarão evidentes algumas considerações sobre a formação do conhecimento científico:

- A simples interpretação dos dados, por distintos cientistas competentes utilizando métodos fortemente consolidados, pode levar a conclusões diferentes dependendo das concepções que eles adotem previamente.

- Os modelos podem ser bons mas possuem problemas, limitações. Embora haja precisão em alguns pontos, os sistemas de explicações científicas possuem aqui e ali contradições, imprecisões e problemas que necessitam ser contornados.
- Existem rupturas na maneira de fazer ciência, os paradigmas estão em disputas constantes. Alguns fenômenos ou conceitos que são fundamentais para certos paradigmas, não são essenciais para outros.
- Não é apenas a estrutura teórica de um modelo que o faz ser mais aceito que outro.

Para corrigir as imagens deturpadas (4) e (6), deve-se focar mais no tratamento histórico. A discussão de diferentes modelos teóricos para a explicação dos mesmos fenômenos também propicia essa correção de uma visão simplista mas deturpada da ciência. Com algum cuidado ao expor os tópicos históricos é possível deixar claro que os cientistas não são seres de outro mundo. Além disso, essa abordagem mais abrangente mostra que existe uma colaboração entre o trabalho de várias pessoas. Esse trabalho conjunto é absolutamente fundamental para a construção completa do conhecimento científico.

Por qual motivo deve-se abordar, sempre que possível, a oposição de modelos? Apresentamos aqui três razões para se adotar essa abordagem.

Em primeiro lugar, porque resolve questões de aprendizado se tomarmos como razoável a extensão da teoria da aprendizagem significativa para incluir o caso de oposição esclarecedora, como discutido na Seção 5.2. No caso do ensino de ciências, principalmente no ensino de física, o nó de oposição entre o subsunção e o conhecimento a ser significado será sempre o fenômeno. Os fenômenos simples discutidos nessa dissertação foram: a queda livre de um corpo em direção ao solo, a atração e a repulsão de duas fitas plásticas eletrizadas, juntamente com as interações entre dois ímãs. Mostramos que esses fenômenos podem ser explicados por mais de uma interpretação. Ou seja, há mais de um mecanismo que pode ser responsável por esses fenômenos. De qualquer forma, é sempre importante partir dos fenômenos para as explicações, em vez de partir de um arcabouço teórico cheio de conceitos abstratos para então ilustrar essa teoria com os fenômenos. Simplesmente apresentar o fato de haver pelo menos duas interpretações distintas para um mesmo fenômeno já representará um ganho enorme para o ensino.

Em segundo lugar, essa proposta de abordagem previne ou reduz a formação de imagens deturpadas do processo de construção do conhecimento. O ensino de ciências não é puramente o ensino da técnica. É necessário que haja uma razão de ser para o surgimento da ciência. Deve-se ensinar sua estrutura e como ela se integra com a sociedade.

A terceira razão é que essa estratégia de abordagem trás implicitamente a visão mais aceita atualmente sobre a filosofia da ciência. Ao explicar os fenômenos utilizando a oposição de modelos, estamos na essência enxergando o processo de formação do conhecimento científico com a visão paradigmática de Kuhn, como foi discutido no Capítulo 3. A iniciativa de considerar que a ciência se move muitas vezes pela discussão de propostas opostas é uma das grandes compreensões sobre o trabalho científico que a filosofia da ciência do século XX nos legou e que deve chegar aos estudantes. Os estudantes que tiverem acesso sobre discussões tão importantes serão pessoas com o pensamento mais amplo e com o nível cultural mais refinado. Essas discussões podem ser sofisticadas, contudo são relativamente simples de assimilar.

13. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou traduzir uma concepção epistemológica em uma metodologia prática. A maneira de apresentá-lo segue o nosso entendimento a respeito da própria estrutura da ciência. Ou seja, uma componente baseada nos fatos, outra relacionada à linguagem, juntamente com uma componente que segue os princípios epistemológicos mais abstratos. A primeira parte desse trabalho representa a parte epistemológica, apresenta as premissas teóricas e faz ligação com as outras duas partes. A segunda parte apresenta os fatos empíricos. Mostra ainda os modelos para explicar esses fatos. A terceira parte mostra a transformação das observações em mecanismos linguísticos.

Apresentamos uma discussão comparando as maneiras de se entender os fenômenos de interação na física. Essa é uma discussão muito importante para a física. Essa questão motivou o debate entre vários de seus grandes expoentes ao longo de sua história. Essa discussão permeia as questões mais profundas sobre o entendimento da natureza, assim como o limite entre a física e a metafísica. Esses pontos sempre foram questões centrais da curiosidade do ser humano em relação ao funcionamento do universo. A nosso ver, elas devem ser expostas aos alunos para que eles entendam a física não só como um conjunto complexo de equações sem qualquer significado, mas sim como uma área do conhecimento que auxilia a humanidade a evoluir. Dessa forma também conseguimos aguçar a curiosidade dos alunos, fazendo-os olhar a natureza com outros olhos, com a vontade de querer aprender mais.

Esse trabalho também discutiu a utilização de um instrumento de ensino que consideramos eficaz e que pode ser de grande valia para aqueles que desejem aplicá-lo. Propomos a apresentação no ensino de uma discussão de paradigmas diferentes para analisar o mesmo conjunto de fenômenos. Seguimos uma fundamentação teórica baseada nas ideias de Ausubel e Thomas Kuhn. Esse enfoque traz uma série de benefícios para o ensino. Entre eles podemos citar o próprio entendimento mais claro dos conceitos. A introdução da história e da filosofia da ciência na sala de aula, além de ser necessária para o correto entendimento das teorias físicas, é um atrativo a mais para a aprendizagem.

Essa dissertação também discutiu outros trabalhos com o mesmo tema, mas com enfoques distintos. Nosso objetivo foi o de oferecer suporte ade-

quado para aqueles que desejam discutir o tema de maneira mais sólida em sala de aula, ou que desejem utilizá-lo como linha de pesquisa.

Com essas contribuições esperamos auxiliar na discussão e na busca de respostas inovadoras para o ensino de ciências, em particular, na área de física.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [AC11] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. Editora da Unicamp, Campinas, 2011.
- [AC15] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamical Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Apeiron, Montreal, 2015. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [ARV09] A. K. T. Assis, J. E. A. Ribeiro, and A. Vannucci. The field concepts of Faraday and Maxwell. In M. S. D. Cattani, L. C. B. Crispino, M. O. C. Gomes, and A. F. S. Santoro, editors, *Trends in Physics: Festschrift in Homage to Prof. José Maria Filardo Bassalo*, pages 31–38. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2009.
- [Ass92a] A. K. T. Assis. *Curso de Eletrodinâmica de Weber*. Setor de Publicações do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, 1992. Notas de Física IFGW Número 5. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis e www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=60362.
- [Ass92b] A. K. T. Assis. Teorias de ação a distância — uma tradução comentada de um texto de James Clerk Maxwell. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 7:53–76, 1992.
- [Ass99] A. K. T. Assis. Arguments in favour of action at a distance. In A. E. Chubykalo, V. Pope, and R. Smirnov-Rueda, editors, *Instantaneous Action at a Distance in Modern Physics — “Pro” and “Contra”*, pages 45–56, Commack, 1999. Nova Science Publishers.
- [Ass06] A. K. T. Assis. Interações na física — ação à distância versus ação por contato. In C. C. Silva, editor, *Estudos de História e Filosofia*

- das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino*, pages 87–102. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006.
- [Ass10] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2010. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass13] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional*. Apeiron, Montreal, 2013. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass15] A. K. T. Assis. *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da Unicamp, Campinas, 2015. Segunda edição. e-ISBN: 978-85-268-1240-6.
- [Ass18] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volume 2. Apeiron, Montreal, 2018. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Aus00] D. P. Ausubel. *Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva*. Plátano Edições Técnicas, Lisboa, 2000. Tradução de L. Teopisto.
- [Bac75] F. Bacon. *Scritti Filosofici di Francesco Bacone*. Unione Tipografico i Editrice Torinese, Torino, 1975. Coleção “Classici della Filosofia” de N. Abbagnano. Traduzido e comentado por P. Rossi.
- [Bac79] F. Bacon. *Novum Organum ou Verdadeiras Indicações Acerca da Interpretação da Natureza; Nova Atlântica*. Abril Cultural, São Paulo, 1979. 2ª edição. Coleção Os Pensadores. Tradução e Notas de J. A. Andrade.
- [BAC12] S. L. B. Boss, A. K. T. Assis, and J. J. Caluzi. *Stephen Gray e a Descoberta dos Condutores e Isolantes: Tradução Comentada de Seus Artigos sobre Eletricidade e Reprodução de Seus Principais Experimentos*. Editora Cultura Acadêmica da Unesp, São Paulo, 2012. Disponível em: www.culturaacademica.com.br/catalogo/stephen-gray-e-a-descoberta-dos-condutores-e-isolantes/.
- [BHE90] H. R. Brown and R. Harré (Editors). *Foundations of Quantum Field Theory*. Clarendon, 1990.

-
- [Car75] J. B. Carlson. Lodestone compass: Chinese or Olmec primacy? *Science*, 189:753–670, 1975. Doi: 10.1126/science.189.4205.753.
- [Chi13] S. S. Chibeni. As posições de Newton, Locke e Berkeley sobre a natureza da gravitação. *Scientiae Studia*, 11:811–839, 2013.
- [Cou85a] C. A. Coulomb. Premier mémoire sur l’électricité et le magnétisme: Construction et usage d’une balance électrique, fondée sur la propriété qu’ont les fils de métal, d’avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l’angle de torsion. Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les élémens des corps électrisés du même genre d’électricité, se repoussent mutuellement. *Mémoires de l’Académie royale des Sciences de l’Institut de France*, 88:569–577, 1785. Published in 1788.
- [Cou85b] C. A. Coulomb. Second mémoire sur l’électricité et le magnétisme, où l’on détermine, suivant quelles loix de fluide magnétique, ainsi que le fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction. *Mémoires de l’Académie royale des Sciences de l’Institut de France*, 88:578–611, 1785. Published in 1788.
- [Cou35a] A. Coulomb. First memoir on electricity and magnetism. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 408–413, New York, 1935. McGraw-Hill. Publicação original de 1785 em francês.
- [Cou35b] A. Coulomb. Second memoir on electricity and magnetism. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 413–420, New York, 1935. McGraw-Hill. Publicação original de 1785 em francês.
- [CS02] R. W. Chabay and B. A. Sherwood. *Matter & Interactions*, volume 2: Electric and Magnetic Interactions. Wiley, New York, 2002.
- [Ein78] A. Einstein. Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento. In A. Einstein, H. Lorentz, H. Weyl e H. Minkowski, *O Princípio da Relatividade*, Lisboa, 2^a edição, 1978. Fundação Calouste Gulbenkian. Págs. 47-86. Tradução de M. J. Saraiva.
- [Euc09] Euclides. *Os Elementos*. Editora da Unesp, São Paulo, 2009. Tradução e introdução de I. Bicudo.
- [Far52] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volume 45, pp. 253-898 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.

- [Far11] M. Faraday. Pesquisas experimentais em eletricidade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28:152–204, 2011. Tradução de A. K. T. Assis e L. F. Haruna. DOI: 10.5007/2175-7941.2011v28n1p152.
- [Fey11] P. Feyerabend. *Contra o Método*. Editora da UNESP, São Paulo, 2011. 2ª edição. Tradução de C. A. Mortari.
- [Gal85] Galileu Galilei. *Dois Novas Ciências*. Ched Editorial, Instituto Italiano di Cultura e Nova Stella, São Paulo, 1985. Tradução e Notas: L. Mariconda e P. R. Mariconda.
- [Gar04] D. Gardelli, 2004. Concepções de interação física: subsídios para uma abordagem histórica do assunto no ensino médio. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo.
- [Gar14] D. Gardelli, 2014. Experimento de Ørsted: subsídios para uma abordagem histórica do assunto no ensino médio. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá.
- [Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. Ática, São Paulo, 2003.
- [GG93] P. Graneau and N. Graneau. *Newton Versus Einstein — How Matter Interacts with Matter*. Carlton Press, New York, 1993.
- [GG96] P. Graneau and N. Graneau. *Newtonian Electrodynamics*. World Scientific, London, 1996.
- [Gil71a] C. S. Gillmor. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*. Princeton University Press, Princeton, 1971.
- [Gil71b] C. S. Gillmor. Coulomb, Charles Augustin. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 3, pages 439–447. Charles Scribner’s Sons, New York, 1971.
- [Gil01] D. Gil-Pérez *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência e Educação*, 7(2):125–153, 2001.
- [Gom02] M. O. C. Gomes. *Teoria Quântica de Campos*. Edusp, São Paulo, 2002.

-
- [Gra12a] C. M. Graney, 2012. Beyond Galileo: A translation of Giovanni Battista Riccioli's experiments regarding falling bodies and "air drag", as reported in his 1651 *Almagestum Novum*. Eprint arXiv:1205.4663.
- [Gra12b] C. M. Graney. Anatomy of a fall: Giovanni Battista Riccioli and the story of g. *Physics Today*, 65:36–40, 2012.
- [Gri11] D. J. Griffiths. *Eletrodinâmica*. Pearson, São Paulo, 2011. 3ª edição. Tradução de H. C. Souza.
- [Gui04] A. P. Guimarães. Mexico and the early history of magnetism. *Revista Mexicana de Física E*, 50:51–53, 2004.
- [Gui05] A. P. Guimarães. *From Lodestone to Supermagnets*. Wiley, Berlin, 2005.
- [Gui11] A. P. Guimarães. *A Pedra com Alma: A Fascinante História do Magnetismo*. Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 2011.
- [Hec02] E. Hecht. *Óptica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002. 2ª edição. Tradução J. M. N. V. Rebordão.
- [Hee92] P. Heering. On Coulomb's inverse square law. *American Journal of Physics*, 60:988–994, 1992.
- [Hei81] J. L. Heilbron. The electrical field before Faraday. In G. N. Cantor and M. J. S. Hodge, editors, *Conceptions of Ether: Studies in the History of Ether Theories 1740-1900*, pages 187–213. Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
- [Hes55] M. B. Hesse. Action at a distance in classical physics. *Isis*, 46:337–353, 1955.
- [Hes61] M. B. Hesse. *Forces and Fields: A Study of Action at a Distance in the History of Physics*. Thomas Nelson and Sons, London, 1961.
- [HRW09] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker. *Fundamentos de Física*, volume 3: Eletromagnetismo. LTC, Rio de Janeiro, 8ª edição, 2009. Tradução de R. S. Biasi.
- [Huy86] C. Huygens. *The Pendulum Clock or Geometrical Demonstrations Concerning the Motion of Pendula as Applied to Clocks*. The Iowa State University Press, Ames, 1986. Translated with Notes by R. J. Blackwell. Introduction by H. J. M. Bos.

-
- [Jac75] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, second edition, 1975.
- [Jea41] J. Jeans. *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 1941. Reprint of the 5th edition of 1925.
- [Jef06] O. D. Jefimenko. *Gravitation and Cogravitation: Developing Newton's Theory of Gravitation to Its Physical and Mathematical Conclusion*. Electret Scientific Company, Star City, 2006.
- [Kan94] E. Kant. *Crítica da Razão Pura*. Ediouro, Rio de Janeiro, 1994. Coleção Universidade. Tradução de J. Mareje.
- [KG97] J. F. Keller and W. E. Gettys. *Física*, volume 1. Pearson, São Paulo, 1997.
- [KR13] F. Kneubil and M. Rubilotta, 2013. Massa: o conceito de Newton a Higgs. Notas de Aula do Curso de Extensão do 5º Encontro USP Escola.
- [KS05] S. Krapas and M. C. Silva. Forças que atuam a distância: representações em livros didáticos do ensino médio e a história da ciência. In M. A. Moreira, C. C. Sahelices, and J. M. Villagrà, editors, *Actas do II Encuentro Iberoamericano sobre Investigación Básica em Educación em Ciências*, pages 351–366. Servicios de Publicaciones de la Universidad de Burgos, Burgos, 2005.
- [KS08] S. Krapas and M. C. Silva. O conceito de campo: polissemia nos manuais, significados na física do passado e da atualidade. *Ciência & Educação*, 14:15–33, 2008.
- [Kuh82] T. S. Kuhn. *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Editora Perspectiva, São Paulo, 1982. Volume 115 da Coleção Debates. Tradução de B. V. Boeira e N. Boeira.
- [LA01] M. S. S. P. Leite and M. J. B. M. Almeida. Compreensão de termos científicos no discurso da ciência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23:458–470, 2001.
- [Laz18] D. Lazarovici. Against fields. *European Journal for Philosophy of Science*, 8:145–170, 2018. Doi: 10.1007/s13194-017-0179-z.

-
- [Lun92] C. Lungarzo. *O Que é Ciência, O Que é Lógica, O Que é Matemática*, volume 20. Círculo do Livro, São Paulo, 1992. Coleção Primeiros Passos.
- [Lun96] J. J. Lunazzi. Olmec mirrors: an example of archaeological american mirrors. In A. Consortini, editor, *Trends in Optics*, pages 411–421. Academic Press, London, 1996.
- [Lun00] J. J. Lunazzi, 2000. http://www.geocities.ws/prof_lunazzi/Olmecas/referencias.htm.
- [Lun13] J. J. Lunazzi, 2013. Óptica arqueológica como reforço da identidade americana e exemplo de desinformação. I Semana de Arqueologia da Unicamp, IFCH-Unicamp, Campinas, SP, 19-21/03/2013.
- [Lun15] J. J. Lunazzi. Como os nativos americanos teriam utilizado seus espelhos? *Revista Arqueologia Pública*, 9:134–146, 2015. Atas da II Semana de Arqueologia da Unicamp.
- [Lun16] J. J. Lunazzi. On how mirrors would have been employed in the ancient americas. In M. Blainey and E. Gallaga, editors, *Manufactured Light: Mirrors in the Mesoamerican Realm*, chapter 6, pages 162–182. University Press of Colorado, Boulder, 2016.
- [Mar17] R. A. Martins. O estudo experimental sobre o magnetismo na Idade Média, com uma tradução da carta sobre o magneto de Petrus Peregrinus. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39:e1601–1 — e1601–30, 2017. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0181.
- [Max65] J. C. Maxwell. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions*, 155:459–512, 1865. Doi: 10.1098/rstl.1865.0008.
- [Max73] J. C. Maxwell. On action at a distance. *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, 7:44–54, 1873. Reprinted in W. D. Niven (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, Cambridge, 1890), Vol. 2, pp. 311-323.
- [Max75] J. C. Maxwell. *Theory of Heat*. Longmans, London, 4th edition, 1875.
- [Max54] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954.

-
- [Max65] J. C. Maxwell. A dynamical theory of the electromagnetic field. In W. D. Niven, editor, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, pages 526–597 (vol. 1), New York, 1965. Dover. Article originally published in 1865.
- [McM02] E. McMullin. The origins of the field concept in physics. *Physics in Perspective*, 4:13–39, 2002.
- [MK06] P. Mishra and M. J. Koehler. Technological pedagogical content knowledge: a framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108:1017–1054, 2006.
- [Mor12] M. A. Moreira. *Aprendizagem Significativa: A Teoria e Textos Complementares*. Livraria da Física, São Paulo, 2012.
- [Mul10] R. A. Muller. *Physics and Technology for Future Presidents: An Introduction to the Essential Physics Every World Leader Needs to Know*. Princeton University Press, New Jersey, 2010.
- [Ner89] N. J. Nersessian. Faraday’s field concept. In D. Gooding and F. A. J. L. James, editors, *Faraday Rediscovered*, pages 175–187. Macmillan Press, Basingstoke, 1989.
- [New08] I. Newton. *O Sistema do Mundo*. Edusp, São Paulo, 2008. Tradução de F. D. Joly.
- [New12a] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Edusp, São Paulo, 2012. Livro I: O Movimento dos Corpos. Tradução de T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring e M. H. C. Célia.
- [New12b] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Edusp, São Paulo, 2012. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Tradução de A. K. T. Assis.
- [Pop75] K. R. Popper. *A Lógica da Pesquisa Científica*. Cultrix e Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975. Traduzido por L. Heinberg e O. Mota.
- [Pot84] A. Potier. *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volume 1: *Mémoires de Coulomb*. Gauthiers-Villars, Paris, 1884.

- [Rib08] J. E. A. Ribeiro, 2008. Sobre a Força de Lorentz, os Conceitos de Campo e a “Essência” do Eletromagnetismo Clássico. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo.
- [RMC82] J. R. Reitz, F. J. Milford, and R. W. Christy. *Fundamentos da Teoria Eletromagnética*. Editora Campus, Rio de Janeiro, 3^a ed., 1982. Tradução de R. B. Sander e C. Duarte.
- [Roc09] J. F. M. Rocha. O conceito de “campo” em sala de aula - uma abordagem histórico-conceitual. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31:1604–1617, 2009.
- [Ros89] P. Rossi. *Os Filósofos e as Máquinas*. Companhia das Letras, São Paulo, 1989. Tradução de F. Carotti.
- [RPA18] A. C. Raicik, L. O. Q. Peduzzi, and J. A. P. Angotti. A estrutura conceitual e epistemológica de uma controvérsia científica: implicações para o ensino de ciências. *Experiências em Ensino de Ciências*, 13:42–62, 2018.
- [RVA08] J. E. A. Ribeiro, A. Vannucci, and A. K. T. Assis. The multiple definitions of ‘field’ in the context of Electromagnetism. In M. G. P. Batista, editor, *Proceedings of the VI Taller Internacional “ENFI-QUI 2008” — La Enseñanza de la Física y la Química*, pages 1–4, Matanzas, Cuba, 2008. Universidad Pedagógica “Juan Marinello”.
- [Sal61] R. A. Salmeron. *Introdução à Eletricidade e ao Magnetismo*. D. Salmeron C. Gomes, São Paulo, 1961. 4^a edição.
- [San18] H. S. T. d. Santos, 2018. Controvérsias entre a ação a distância e a ação por campos — subsídios para o uso da história do eletromagnetismo em sala de aula. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.
- [Sas10] C. Sasaki. *Introdução à Teoria da Ciência*. Edusp, São Paulo, 2010. Traduzido por T. Takeomi.
- [SJ04a] R. A. Serway and J. W. Jewett Jr. *Princípios de Física*, volume 1, Mecânica Clássica. Thomson, São Paulo, 2004. Tradução de A. K. T. Assis.
- [SJ04b] R. A. Serway and J. W. Jewett Jr. *Princípios de Física*, volume 3, Eletromagnetismo. Thomson, São Paulo, 2004. Tradução de L. F. Mello e T. M. V. F. Mello; revisão técnica de A. K. T. Assis.

-
- [SJ15] R. A. Serway and J. W. Jewett Jr. *Princípios de Física*, volume 3, Eletromagnetismo. Cengage Learning, São Paulo, 2015.
- [SK07] M. C. Silva and S. Krapas. Controvérsia ação a distância/ação mediada: abordagens didáticas para o ensino das interações físicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:471–479, 2007.
- [Sym82] K. R. Symon. *Mecânica*. Editora Campus, Rio de Janeiro, 5^a ed., 1982. Tradução de G. B. Batista.
- [TCA04] A. C. Tort, A. M. Cunha, and A. K. T. Assis. Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre a ação a distância. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 26:273–282, 2004.
- [Tho21] J. J. Thomson. *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 5th edition, 1921.
- [TM09a] P. A. Tipler and G. Mosca. *Física para Cientistas e Engenheiros*, volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica. LTC, Rio de Janeiro, 6^a edição, 2009. Tradução de P. M. Mors.
- [TM09b] P. A. Tipler and G. Mosca. *Física para Cientistas e Engenheiros*, volume 2: Eletricidade e Magnetismo, Óptica. LTC, Rio de Janeiro, 6^a edição, 2009. Tradução de N. M. Balzaretti.
- [WF49] J. A. Wheeler and R. P. Feynman. Classical electrodynamics in terms of direct interparticle action. *Reviews of Modern Physics*, 21:425–433, 1949.
- [YF04] H. D. Young and R. A. Freedman. *Física*, volume 3. Pearson, São Paulo, 2004.
- [Zil03] E. Zilsel. *The Social Origins of Modern Science*, volume 200. Spring Science and Business Media, Boston, 2003. Coleção: Boston Studies in the Philosophy of Science. Editores: R. Cohen e M. Wartofsky.