UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

LUCAS MARCELO CAVALARI NARDI

**A matematização da eletrostática no século XVIII: de rupturas
epistemológicas a estilos de matematização**

São Carlos
2021

LUCAS MARCELO CAVALARI NARDI

A matematização da eletrostática no século XVIII: de rupturas epistemológicas a
estilos de matematização

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Física Básica
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cibelle Celestino Silva

Versão Corrigida

(versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Nardi, Lucas Marcelo Cavalari

A matematização da eletrostática no século XVIII: de rupturas epistemológicas a estilos de matematização / Lucas Marcelo Cavalari Nardi; orientadora Cibele Celestino Silva - versão corrigida -- São Carlos, 2021.
182 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Física Básica) -- Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2021.

1. História da eletrostática. 2. Século XVIII. 3. Matematização da física. I. Silva, Cibele Celestino, orient. II. Título.

Dedico este trabalho à minha família, sem a qual ele jamais teria sido concluído.

AGRADECIMENTOS

Todo trabalho de História tem sua própria história e neste espaço eu gostaria de agradecer a alguns (dos muitos) que fizeram parte desta. É impossível citar todos, mas mencionarei os principais.

Agradeço primeiro à minha orientadora, Cibelle Celestino Silva, cujos ensinamentos levarei para a vida; entre eles, o já famoso “*ars longa, vita brevis*”. Aprendi com o tempo a ouvir suas críticas com leveza e, por isso, acabei aprendendo mais do que poderia imaginar, não só sobre História da Ciência, mas sobre a vida.

Aos meus colegas e amigos do grupo de História e Ensino de Ciências na USP, o GHTC-São Carlos. Primeiro aos que moram longe, José Guilherme Lício e José Antônio – que me ensinaram a usar o metrô de São Paulo –, e cujas presenças tornaram-se comuns e agradáveis nas reuniões online de 2020 e 2021. Também agradeço aos que frequentavam o IFSC presencialmente: sempre foi muito prazeroso tomar um café no meio da tarde, ou ir jantar no começo da noite para colocar o papo em dia (antes da pandemia, claro). Em especial, Ciro Ferreira e seu fiel escudeiro, Jorge (ou Ricardo, se preferir). Além deles, conheci, em 2020 (online), membros do GHTC todo, espalhados pelo Brasil por diversas universidades, para os quais também deixo o meu agradecimento. As reuniões deste grupo, assim como do situado em São Carlos, são sempre frutíferas e me dão energia, especialmente quando preciso.

Em todos os congressos que fui, conheci professores e pós-graduandos da área com os quais aprendi muito, em vários sentidos. Em particular, registro meu agradecimento ao professor André Assis, que conheci em um desses congressos e que foi certeiro em suas perguntas incisivas, deixando-me com mais vontade de aprofundar minha pesquisa. Também deixo registrado o quão importante foi ter ido ao IHPST de 2019, em Tessalônica, Grécia, onde encontrei pessoas que me ajudaram, não só na pesquisa, mas também na minha compreensão de onde eu queria estar. Lá, tive finalmente certeza do que eu queria fazer.

Além disso, eu também conheci por e-mail alguns professores que marcam a seção de referências bibliográficas deste trabalho. Entre eles, agradeço especialmente ao professor Roderick Weir Home por ser tão pontual e tão cordial ao responder minhas perguntas, sempre interessado em participar. Obrigado, professor!

À banca examinadora da minha Qualificação, composta pelos professores Leonardo Paulo Maia, Ricardo Karam e Ivã Gurgel. Sem as dicas e sugestões deles, especialmente as do professor Ivã, minha tese não seria nada parecida com esta. Meu trabalho deve muito a eles.

Também tomo este espaço para agradecer ao professor Vitor José Leite Barbosa. Quando eu perguntei se ele poderia me ajudar a traduzir “alguns parágrafos, jogo rápido” de um texto em francês em um almoço de sexta-feira, não imaginei o trabalho que aquilo daria. Mesmo assim, ele ajudou, sem se queixar (na minha frente, pelo menos). Obrigado pela ajuda, pela paciência e pelas conversas, que sempre foram interessantes.

Além disso, participaram indiretamente deste trabalho todos os membros do grupo Filosófísica. Nas segundas-feiras à noite sempre havia alguma palestra ou tema de debate interessante. O “Filo” sempre me energizou, fez parte da minha transição da Física para a História da Física. Em especial, menciono aqui Iago e Eduardo, que, com esforços próprios, mantêm o grupo vivo. Peço desculpas se me ausentei demais da coordenação neste ano que passou.

Agradeço também ao IFSC e a Universidade de São Paulo, pelo apoio técnico, além das agências de financiamento de pesquisa. Especialmente a CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Além dessas instituições, agradeço também aos seus funcionários, em especial aos da biblioteca do IFSC, que sempre foram muito solícitos com meus complicados pedidos de livros e textos difíceis de achar. Entre eles, destaco a funcionária Maria Neusa Aguiar, que me ajudou muito a encontrar algumas das referências aqui usadas.

Além disso, várias bibliotecas mundo afora foram gentis com meus pedidos e me responderam prontamente. Em primeiro lugar, destaco o IMPA, no Brasil, além do SINDBAD (*Service d’Information Des Bibliothécaires A distance*) e do *Muséum national d’Histoire Naturelle*, na França. Essas instituições, e seus funcionários, deram-me acesso a documentos e livros que não estavam disponíveis na internet. Para eles, meu muito obrigado (ou *merci beaucoup*).

Por fim, agradeço aos meus pais, Zelina e Luiz Carlos, pelo apoio moral e, muitas vezes, financeiro, e à minha irmã, Patrícia, pelo suporte. Agradeço também à minha namorada, Gabriela, por estar ao meu lado sempre.

Ninguém nunca toma nota deles [meus conselhos] porque não é a resposta que eles querem ouvir. O que eles querem ouvir é: 'é assim que se consegue um agente, é assim que se escreve um roteiro'..., mas eu sempre digo 'seja tão bom que ninguém possa te ignorar'.

Steve Martin

Não sei se já servi ao rei – disse o primeiro-ministro do rei. – Ou se algum dia tive a intenção de servi-lo. Não sou servo de ninguém. Um homem deve projetar a própria sombra...

Ursula K. Le Guin. **A mão esquerda da escuridão**. Aleph: São Paulo, 2014, p. 32.

RESUMO

NARDI, L. M. C. **A matematização da eletrostática no século XVIII:** de rupturas epistemológicas a estilos de matematização. 2021. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Nesta tese analisamos o processo de matematização da eletrostática no século XVIII nas perspectivas histórica e filosófica. Para isso, estudamos o processo de matematização da eletrostática no período escolhido, com foco nos trabalhos de Johann Albrecht Euler, Franz Ulrich Theodosius Aepinus e Charles-Augustin Coulomb. Com nossa análise, propomos as noções de estilos de matematização e projetos epistêmicos, em contraposição aos obstáculos e rupturas epistemológicas, de Gaston Bachelard. Com o apoio da concepção inferencial, proposta por Mark Colyvan e Otávio Bueno, descrevemos e analisamos diferentes formas (ou, como chamamos, estilos) de matematização que coexistiram dentro do recorte histórico estudado. A combinação de estilos similares constitui um projeto epistêmico de matematização. Vemos mais de um projeto epistêmico se desenvolvendo a partir do século XVIII nos estudos elétricos e percorrendo o século XIX na óptica e no eletromagnetismo, ajudando a moldar a física dos séculos XVIII, XIX e começo do século XX. Ademais, observamos as diversas maneiras pelas quais a tríade matemática, pressupostos físicos e experimentos interagem e se influenciam mutuamente. Ao final, apresentamos uma tradução comentada do original, em francês, para o português, da obra *Recherches sur la Cause Physique de l'Electricité*, publicada em 1759, e escrita por Johann Euler.

Palavras-chave: História da eletrostática. Século XVIII. Matematização da física.

ABSTRACT

NARDI, L. M. C. **The mathematization of electrostatics in the 18th Century:** from epistemological ruptures to styles of mathematization. 2021. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

In this thesis, we analyze the mathematization process in electrostatics throughout the 18th Century by a historical and a philosophical perspective. As such, we study the process of mathematization in electrostatics with a focus on the works of Johann Albrecht Euler, Franz Ulrich Theodosius Aepinus and Charles-Augustin Coulomb. Thereby, we propose the notions of styles of mathematization and epistemic projects, in contradistinction to the epistemological obstacles and ruptures of Gaston Bachelard's philosophy of science. With the help of the inferential conception, proposed by Mark Colyvan and Otávio Bueno, we describe and analyze different forms (or, as we put it, styles) of mathematization that coexisted in our historical cut. The combination of similar styles constitutes an epistemic project of mathematization. We see more than one epistemic project developing from the 18th Century in the electrical studies and traversing the 19th Century in optics and electromagnetism, contributing to shape the physics of the 18th, 19th, and early-20th Centuries. Furthermore, we look at the ways in which the triad composed of mathematics, physical assumptions, and experiments interact and influence each other. Finally, we present a commented translation from the original, in French, to Portuguese of the work entitled *Recherches sur la Cause Physique de l'Electricité*, published in 1759, and written by Johann Euler.

Keywords: History of electrostatics. 18th Century. Mathematization of physics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – A aplicação da matemática na física segundo a concepção inferencial. No lado esquerdo, a configuração empírica, somada a seu lado teórico. Do lado direito, o modelo que vem a representá-la, dotado de estruturas matemáticas. A linha mais acima é o início do processo de representação, a linha mais abaixo é a parte final, depois da etapa de derivação, aqui representada pela flecha transversal.	42
Figura 3.1 – Uma versão adaptada da primeira figura do trabalho de Johann Euler de 1759. Nele, Johann ilustra um poro de um corpo como um canal, sendo o éter um fluido atravessando-o. Na imagem os ‘A’, ‘B’, ‘P’ e ‘M’ mais à direita deveriam estar com uma apóstrofe cada, senão a construção matemática de Johann não faria sentido. Esse erro tipográfico se encontra na imagem original. Aqui apresentamos a imagem corrigida.	54
Figura 3.2 – Dois corpos, A e B, são apresentados na imagem acima, feita por Johann Albrecht Euler. O corpo A se encontra eletrizado e B, não. O espaço mais curto entre eles é chamado de C e seus pontos de superfície mais próximos um do outro são <i>a</i> e <i>b</i>	59
Figura 4.1 – Um corpo A tem uma partícula de fluido B em sua superfície. O fluido de A repele B, enquanto sua matéria a atrai.	67
Figura 4.2 – Segunda imagem do livro de Aepinus. Nela, um corpo A está próximo de um corpo B.	72
Figura 4.3 – O corpo AD é dividido pelas partes AB, BC e CD. O corpo EH é dividido pelas partes EF, FG e GH. Essas divisões ocorrem sem perda de generalidade, ambos os corpos poderiam ser divididos em mais partes.	79
Figura 4.4 – O corpo eletrizado A, com excesso de fluido elétrico, está próximo do corpo B, que se encontra no seu estado natural. O corpo B está dividido em dois trechos e I é uma partícula de fluido elétrico.	81
Figura 4.5 – O corpo A e o corpo B divididos em partes. A é dividido em LMNO e NOIK, e B é dividido em CDGH e GHEF.	84
Figura 4.6 – Representação da garrafa de Leiden. ABEF é uma placa de vidro, CD e IK são placas de metal. TS é um fio ligado a um gerador e LM é um fio conectado ao globo da Terra.	90
Figura 4.7 – Representação da relação entre o aparato matemático (ou, apenas, matemática), experimentos (ou, apenas, experimentação) e configuração empírico-teórica (ou, como sinônimo aqui, teoria) em um trabalho científico matematizado. Nela, podemos observar que cada uma desses vértices funciona como uma camada, interagindo com as outras de diferentes formas. Além disso, as etapas presentes na concepção inferencial (CI) terminar modeladas aqui como parte de nosso diagrama esquemático.	99

- Figura 5.1** – Imagem ilustrando o experimento de Coulomb sobre a dependência da força de repulsão elétrica para com a distância. Nela, a montagem completa aparece à esquerda, em destaque. Cada pedaço que constitui a montagem aparece em lugares diferentes da imagem: nesse caso, em sequência de cima para baixo e da direita para a esquerda, o micrômetro preso ao fio que é torcido no experimento; a parte inicial do tubo no qual esse fio se encontra; a balança, composta de uma bola eletrizável e um contrapeso; o objeto usado para eletrizar as duas bolas; por último, a bola inserida no buraco não concêntrico do cilindro de vidro. O artigo de Coulomb possui uma imagem ilustrativa semelhante, mas de baixa qualidade, esta imagem foi retirada de outra referência. 106
- Figura 5.2** – Imagem ilustrando o experimento de Coulomb sobre a dependência da força de atração elétrica para com a distância. Nela, um disco proveniente de uma folha dourada, à direita na imagem, é fixado em uma agulha de goma-laca, pendurada por um fio de seda e, assim, servindo como uma balança. A agulha possui um contrapeso também. Um globo, à esquerda, é fixado a uma distância desse disco. Esse globo é isolado eletricamente do chão e eletrizado por uma faísca de uma garrafa de Leiden. O disco na agulha era eletrizado por um contato rápido com um pequeno condutor aterrado (isto é, eletrizado por indução). 112
- Figura 5.3** – Na figura acima temos um tronco de cone com as superfícies circulares e paralelas pm e AB . Há um ponto c minúsculo não-nomeado na figura que está colinear com o centro dos círculos pm e AB . O ponto C está no vértice da projeção completa do troco de cone. 119
- Figura 5.4** – Um corpo condutor $aAFBa$ de formato qualquer é dividido em três partes. Os trechos de igual quantidade de fluido elétrico $adbea$ e $dbeed$, e a parte $dAFBecd$. Este corpo encontra-se eletrizado. A suposição feita é a de que, no início, tal distribuição encontra-se permeando todo o corpo, superfície e interior. 121
- Figura 6.1** – Os polos nas figuras 6.1 (a), (b) e (c) representam os polos matematizado e mecanicista (representando o mecanicismo) de uma explicação em estilos de matematização diferentes. O caso (a) representa o estilo de matematização em Johann Euler. O caso (b) representa o estilo em Franz Aepinus. O caso (c), no final, representa o estilo em Charles Coulomb, no qual não há boa harmonia entre os dois polos. 129-130
- Figura 6.2** – Vemos aqui os estilos de matematização em Franz Aepinus e Coulomb como próximos, sendo somados em um conceito maior – o de projeto newtoniano. O estilo em Johann Euler segue separado, formando outro projeto – o hidrodinâmico. Os círculos referentes à matematização e ao mecanicismo indicam para qual desses dois polos os projetos transitam mais facilmente; isto é, qual desses polos os estilos – com suas explicações e articulações teóricas – priorizam. Alguns estilos priorizam o polo da matematização – como Aepinus e Coulomb – e, assim, esse polo termina encabeçando vários aspectos da teoria, como a articulação de hipóteses e experimentos. Outros, por outro lado, priorizam o polo mecanicista, como o estilo em Johann Euler. 137

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Objetivos e abordagens da pesquisa	17
1.2	Contexto histórico: a eletricidade no século XVIII	20
1.2.1	A eletricidade no começo do século XVIII	20
1.2.2	A garrafa de Leiden	23
1.2.3	O fluido elétrico de Benjamin Franklin	26
1.3	Uma breve biografia de Franz Aepinus	29
2	Caminhos para uma filosofia da matematização	33
2.1	Matematização e mecanicismo	33
2.1	Primeira frente: explicações científicas	37
2.2	Segunda frente: a aplicação da matemática na física	40
2.3	Uma filosofia da matematização	44
3	A matematização em Johann Albrecht Euler	49
3.1	A base física dos trabalhos sobre eletricidade de Johann Euler	49
3.2	As origens da matematização em Johann Euler	52
3.3	A hidrodinâmica do éter, segundo Johann Euler	54
3.4	A atração elétrica, por Johann Euler	58
3.5	A repercussão dos trabalhos de Johann Euler	61
3.6	Conclusões	62
4	A matematização em Franz Ulrich Theodosius Aepinus	65
4.1	A base da teoria eletrostática de Aepinus	65
4.2	Uma hipótese físico-matemática	68
4.3	A interação elétrica entre a matéria comum de dois corpos	71
4.4	Atração elétrica entre dois corpos	77
4.4.1	Expressão geral para a interação elétrica entre dois corpos	79
4.4.2	A atração entre corpos com o mesmo estado elétrico	81
4.5	A matematização da garrafa de Leiden, segundo Aepinus	89
4.6	Uma correção à teoria de Franklin	93
4.7	Conclusões	97
5	O estilo de matematização em Charles-Augustin Coulomb	101
5.1	Uma breve biografia de Charles-Augustin Coulomb	101
5.2	Como o <i>Tentamen</i> chegou na França?	102

5.3	O primeiro trabalho de Coulomb em eletrostática: a repulsão elétrica.....	106
5.3.1	Considerações acerca das medidas de Coulomb	109
5.4	O segundo trabalho de Coulomb sobre eletrostática: a atração elétrica.....	112
5.4.1	A proporção entre força e quantidade de fluidos elétricos.....	115
5.5	A distribuição superficial de fluido elétrico	118
5.6	Um fluido <i>versus</i> dois fluidos.....	122
5.7	Conclusões.....	124
6	Conclusões.....	127
6.1	Os dois polos das explicações científicas	127
6.2	Matemática, teoria e experimentação.....	131
6.3	Projetos epistêmicos	132
6.4	O lugar da matemática: perdas e ganhos.....	138
	Referências.....	141
	Apêndice A.....	149
A.1	Comentários sobre a tradução	149
A.2	Tradução comentada.....	151

1 Introdução

Neste capítulo, apresentaremos o objetivo desta tese; estudar e analisar a matematização dos estudos elétricos no século XVIII. Para tal, explicaremos as questões que motivaram a pesquisa e as abordagens histórica e filosófica que alicerçaram a pesquisa desenvolvida.

Aproveitaremos este capítulo introdutório para mostrar o contexto histórico que envolveu as pesquisas e teorias sobre os fenômenos elétricos no século XVIII.

1.1 Objetivos e abordagens da pesquisa

A partir da metade do século XVIII, os estudos dos fenômenos elétricos passaram a ser matematizado por alguns filósofos naturais. Esse processo histórico deve ser estudado e analisado criticamente respeitando seu ambiente de constituição. Isto é, deve-se realizar um estudo diacrônico da matematização dos estudos em eletrostática no século XVIII. Assim, esta tese consiste em estudar e ampliar a compreensão sobre esse processo, analisando, com o auxílio da filosofia – mas sem esquecer a pesquisa histórica –, os diversos usos da matemática nos estudos elétricos por diferentes linhas de pesquisa, com diferentes teorias e pressupostos físicos.

A metodologia empregada nesta pesquisa envolve uma abordagem histórica e uma filosófica. Primeiramente, a parte histórica consiste no estudo das obras originais dos atores históricos em destaque. Além dessas fontes primárias, fontes secundárias, tais como artigos e livros de historiadores da ciência, foram utilizados quando relevantes. Com isso, este estudo visa uma compreensão tão próxima quanto possível da linguagem, problemática, pressupostos, métodos e conhecimentos gerais da época abordada.

Devido ao nosso objetivo, procuramos assim obter uma visão diacrônica que caracteriza um trabalho histórico que não deturpe as fontes históricas de maior relevância; no caso, os textos e livros publicados na época. Dessa forma, sendo condizente com nosso objetivo de pesquisa, priorizamos as obras públicas dos atores históricos sob análise¹. Uma delas – de Johann Euler – foi traduzida do original, francês, para o português nesta tese². A

¹ Nota-se aqui que tentamos ter acesso às notas individuais de trabalho e estudo de alguns atores históricos – em especial, Franz Aepinus –, mas não as obtivemos.

² No apêndice A, pode-se encontrar tal tradução comentada, da obra *Recherches sur la Cause Physique de l'Electricité*, escrita por Johann Albrecht Euler, e realizada no bojo deste projeto. Além disso, todas as traduções de trechos de textos de livros foram feitas pelo autor, exceto quando explicitado o contrário.

obra mais importante de Franz Aepinus para nosso propósito, o *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi*, foi traduzida do original (latim) para o inglês por Roderick Weir Home e Peter J. Connor em 1979. Por falta de familiaridade do autor com o latim, essa tradução foi usada neste trabalho.

Na abordagem filosófica, atentamo-nos a dois conjuntos de estudos filosóficos sobre aspectos que se mostraram essenciais a esta tese. O primeiro trata da filosofia subjacente às explicações científicas. Nele, observamos que há liberdade em tratar argumentos bastante diferentes pelo termo “explicação”. Usamos tal liberdade implicitamente ao longo desta tese. O segundo é o referencial filosófico conhecido como concepção inferencial para analisar como acontece a aplicação da matemática nas ciências. Esses dois conjuntos somados, entretanto, não formam por si só o arcabouço filosófico necessário para analisar criticamente a matematização da eletrostática no século XVIII. Portanto, desenvolvemos dois conceitos próprios – estilo de matematização e projeto epistêmico. Para defini-los, usamos os conceitos de ruptura e obstáculo epistemológicos do filósofo Gaston Bachelard como contraponto.

Portanto, por meio dessas abordagens usadas concomitantemente procuramos responder (ou pelo menos esclarecer) às seguintes questões:

- Como se deu o desenvolvimento da matematização nos estudos elétricos ao longo do século XVIII? Quem foram alguns dos responsáveis por esse processo?
- Quais foram os papéis e usos da matemática em diferentes teorias elétricas nesse período histórico? Havia semelhanças e diferenças? Se sim, quais?
- Como eram as relações entre pressupostos físicos, experimentos e aparatos matemáticos nessas diferentes teorias (matematizadas)?
- Caso haja diferentes matematizações em diferentes teorias, haveria alguma forma de compreender os prós e contras delas de forma diacrônica?

Ao longo deste trabalho, apontamos três atores históricos com maior importância no desenvolvimento da matematização dentro do recorte histórico considerado – Johann Euler, Franz Aepinus e Charles Coulomb. Além disso, em suas linhas de pesquisa, mostramos uma forma – ou, como chamaremos, *estilo* – de matematização. Em nossa análise, vemos que havia várias formas de matematizar uma teoria. Nossa análise também nos permite observar relações entre pressupostos físicos, experimentos e aparato matemático, além de ganhos e perdas epistêmicas de uma teoria relacionadas ao estilo de matematização.

A tese está dividida em 6 capítulos. Neste capítulo, apresentamos a estrutura geral da tese, o contexto histórico dos estudos em eletricidade no século XVIII e, ao final, uma breve biografia de Franz Aepinus.

O segundo capítulo delineia a abordagem filosófica usada e construída no estudo histórico. Lá, definimos o que entendemos por “matematização” e “mecanicismo”, dois conceitos que funcionam como polos, orientando nossas análises. Adiante, aprofundamos nos dois aspectos mencionados, sobre explicações científicas e aplicação da matemática, indicando suas respectivas importâncias e usos neste trabalho. Ao final, tecemos nossos próprios conceitos (estilo de matematização e projeto epistêmico) para analisar filosoficamente a matematização nas diferentes teorias. Eles são definidos em contraponto aos conceitos de obstáculo e ruptura epistemológicos, do filósofo Gaston Bachelard.

No capítulo 3, apresentamos a matematização presente no *Recherches sur la Cause Physique de l'Electricité* de Johann Albrecht Euler, publicado em 1759. Nele, analisamos o estilo de matematização guiado pelo mecanicismo da teoria etérea de J. Euler, nomeando-o de estilo mecanicista de matematização. Com isso, temos um exemplo de como os dois polos, matematizado e mecanicista – definidos no capítulo 2 –, não são dicotômicos, funcionando como uma gradação às teorias matematizadas apresentadas.

No capítulo 4, apresentamos aspectos da teoria elétrica de Franz Aepinus. A obra de Aepinus é uma rica fonte de estudo a respeito das diferentes características que envolvem a matematização de uma teoria. Lá, temos um estilo de matematização guiado pela matemática; isto é, a teoria e os experimentos são guiados primeiramente pelos resultados de seus cálculos. O estilo de matematização em Aepinus se mostra construtivo, pois há uma interação harmoniosa entre os polos matematização-mecanicismo. Além disso, analisamos as relações entre pressupostos físicos, experimentos e matemática na obra dele.

No capítulo 5, apresentamos a matematização presente nas obras de Coulomb. Primeiro, notamos que ela se relaciona com os experimentos que ele realiza para encontrar a relação entre força elétrica e distância. Nesse caso, os resultados experimentais embasam, na percepção de Coulomb, a lei de função que Coulomb sustentara – que a força elétrica que um corpo eletrizado imprime em outro varia com o inverso do quadrado da distância. Todavia, apresentamos críticas e resultados contrários ao experimento de Coulomb com a balança de torção no começo do século XIX. Quando apresentamos o estilo de matematização em Coulomb, diferente dos presentes nos capítulos 3 e 4, vemos uma interação antagônica e conflituosa entre matematização e mecanicismo. Em particular, em sua dedução para a distribuição do fluido elétrico em um condutor, na qual ele demonstrara que o fluido elétrico

deve sempre tender a superfície do condutor, pois tal dedução não se adequa à base teórica que Coulomb era adepto (dois fluidos elétricos). O francês não nota essa fragilidade em seu raciocínio porque privilegiou demais a prioridade da matemática frente a aspectos mecanicistas de sua teoria. Portanto, o estilo de matematização ali presente é caracterizado como antagônico.

Por fim, no capítulo 6, concatenamos todas essas conclusões em um conjunto coerente com o intuito principal de definir claramente nossos dois conceitos, apresentados primeiro no capítulo 2, e criticar os conceitos bachelardianos mencionados. Como ficará claro, há diferentes formas (ou, como nomeamos, *estilos*) de matematização. Portanto, podemos investigar possíveis prós e contras relacionados a eles. Assim, apresentamos uma discussão sobre isso em termos de perdas e ganhos epistêmicos nos estilos propostos ao longo dos capítulos 3, 4 e 5.

Apresentado os objetivos e estrutura desta tese, passamos agora ao contexto histórico³, focado na eletricidade no século XVIII.

1.2 Contexto histórico: a eletricidade no século XVIII

1.2.1 A eletricidade no começo do século XVIII

Até o começo do século XVIII, o conhecimento compartilhado por filósofos naturais sobre os fenômenos elétricos dizia respeito aos objetos que tinham a propriedade de atrair corpos leves quando atritados. Esses objetos eram chamados de corpos elétricos *per se*. Aqueles que não atraíam nenhum objeto quando atritados eram conhecidos como corpos não-elétricos (ou, não-elétricos *per se*). O termo “elétrico” veio de *electrica*, que significava âmbar em grego, um material que havia sido usado na descoberta dessa atração. Alguns filósofos gregos, em especial Platão (c. 428-348 A.E.C), já haviam descrito a atração de corpos depois de atritar um pedaço de âmbar. A divisão entre elétricos *per se* e não-elétricos parece ter surgido na obra *De Magnete*, de William Gilbert (1544-1603). (1-2, p. 15-35) Durante a primeira metade do século XVIII, novos fenômenos foram incluídos no rol dos

³ No final deste capítulo há uma breve biografia de Franz Aepinus, pois este é o ator histórico mais analisado neste trabalho e, consequentemente, o mais importante. Também há uma pequena digressão biográfica no capítulo 5, sobre Coulomb. No caso de Johann Euler, por não haver muitos trabalhos históricos a respeito dele, há apenas informações básicas sobre sua biografia.

fenômenos elétricos. Como os trabalhos em eletricidade até o século XVIII eram poucos e, em geral, pontuais, podemos começar nosso recorte histórico⁴ em F. Hauksbee e S. Gray.

O inglês Francis Hauksbee (1660-1713) inventou, no começo do século XVIII, um aparato capaz de eletrificar vidro por atrito de maneira mais fácil e rápida; essa é uma das primeiras formas do que hoje entendemos como gerador triboelétrico. Hauksbee entendia que a atração ocorria devido ao movimento de *effluvia* (plural de *effluvium*, que significa emanção⁵) proveniente dos objetos elétricos depois de atritados. Hauksbee parece ter se interessado pela eletricidade graças ao fenômeno do barômetro luminescente; isto é, efeitos luminosos que aparecem no tubo de Torricelli⁶, descritos por Jean Picard (1620-1682) em 1675 na França. (4) Hauksbee não identificou, em um primeiro momento, esse fenômeno como sendo elétrico, pois era adepto à teoria corpuscular da luz; logo, não havia motivos para desconfiar de uma relação entre luz e fenômenos elétricos. Eventualmente, em torno de 1706, o inglês começou a delinear sua teoria elétrica do *effluvia*. (3, p. 229-249)

Por influência de Hauksbee, o astrônomo Stephen Gray (1666-1736) interessou-se pelos fenômenos elétricos. Enquanto estudava a atração produzida entre uma pena e um cilindro oco de vidro com bases de chumbo e tampado com rolhas nas extremidades, Gray notou que a pena era atraída não só pelo vidro eletrizado, mas também pela rolha, que não havia sido atritada. Após diversas modificações experimentais, o filósofo natural observou um novo fenômeno elétrico: a comunicação da virtude elétrica, hoje entendida como condução elétrica. Gray publicou seus achados nesse assunto em 1731/2⁷. No caso descrito, a base de chumbo comunicava a propriedade de atração presente no vidro à rolha⁸. (2, p. 239-265; 3, p. 229-249; 5)

⁴ Para um estudo histórico mais aprofundado, detalhado e abrangente sobre a história da eletricidade até o fim do século XVIII, ver a seguinte referência: (3).

⁵ O *Effluvium* seria uma emanção proveniente dos corpos atritados. Teorias referentes a ele (ou ao seu plural, *effluvia*) eram bastante comuns na Europa até o século XVIII. Sua provável origem pode ser traçada em William Gilbert, já mencionado, e no *De Subtilitate* de Girolamo Cardano (1501-1576). (1; 3, p. 229-249)

⁶ O uso de um tubo de Torricelli e do vácuo em experimentos elétricos se tornara comum graças a Academia Italiana do Experimento (conhecida como: *Accademia del Cimento*) no século XVII. Em partes, a Academia procurava determinar se a teoria elétrica de Niccolò Cabeo (1586-1650), que dependia da movimentação do ar para explicar a atração elétrica, estava correta. (3, p. 193-208)

⁷ A Inglaterra utilizou o calendário juliano até o ano de 1752, quando a passagem de ano se deu em 25 de março. Mas, parte da Europa já havia adotado o gregoriano. Logo, para datas até 25 de março, os ingleses representavam o ano com uma barra, “1731/2”, por exemplo, com 1731 sendo o ano de publicação segundo o calendário juliano e o 2 (*i.e.*, 1732), o ano de publicação pelo calendário gregoriano.

⁸ Stephen Gray já havia estudado a eletricidade antes dos anos de 1720 e 1730. Ele havia enviado, por exemplo, em janeiro de 1707/8 uma carta a Academia de Ciências de Londres, a famosa *Royal Society of London*, um trabalho sobre experimentos elétricos. Porém, esse texto só foi publicado em 1954. (6) Provavelmente, Francis Hauksbee ficou encarregado de dar um aval sobre o trabalho de Gray, pois ele já era um nome reconhecido em pesquisas elétricas, e, assim, pôde engavetar essa publicação, evitando que Gray roubasse a cena. Em seguida, Hauksbee copiava as contribuições de Gray (antes dos anos de 1720), publicando-as como se fossem

A partir dos anos de 1730, as pesquisas elétricas reconheceram⁹ um novo fenômeno: a repulsão elétrica. Charles François de Cisternay Dufay (ou Du Fay) (1698-1739), francês, reconheceu-a como um fenômeno novo e, em 1733, escreveu:

Corpos Elétricos [isto é, que estejam eletrizados] atraem todos aqueles que não estão desta forma, e os repelem assim que se tornam eletrizados, pela Proximidade ou pelo Contato com o corpo elétrico. (8, p. 262)

Dufay postulou aí uma construção teórica para explicar os fenômenos elétricos: “existem duas Eletricidades distintas, muito diferentes uma da outra, uma delas eu [Dufay] chamo de *Eletricidade vítrea*, e a outra, *Eletricidade resinosa*”¹⁰. (8, p. 263-264)

Para o autor, os materiais elétricos podiam ser encaixados em duas categorias de eletricidade: vítrea e resinosa. Existiriam, portanto, duas *qualidades* dos corpos elétricos, o que torna sua teoria essencialmente qualitativa. A vítrea era a presente em materiais como vidro, pedras preciosas, pelo de animal, lã etc. A resinosa era típica de materiais como âmbar, goma-laca, papel etc. (9) Em resumo, a teoria de Dufay defendia que

a Característica dessas duas Eletricidades é que um Corpo de *Eletricidade vítrea*, por Exemplo, repele todos aqueles que possuem a mesma Eletricidade, e ao contrário, atrai todos aqueles de *Eletricidade resinosa*. (8, p. 264)

Outro importante eletricista da época foi o habilidoso experimentador francês, Jean-Antoine Nollet (1700-1770). Ele explicava os fenômenos elétricos como fruto de correntes (ou jatos) de matéria elétrica (que ele chamava de fogo elétrico) que atravessavam os poros de um corpo para dentro ou para fora. Para o autor, a corrente que saía do corpo era chamada de *efluente* e a que saía dos objetos (e do ar) ao redor do corpo para adentrá-lo era chamada de *affluente*. Essas correntes, por sua vez, eram capazes de explicar uma miríade de fenômenos. Por exemplo, dependendo dos materiais envolvidos em um experimento, as correntes possuíam fluxos diferentes que determinavam se o movimento seria de atração ou repulsão; isto é, qual corrente de fogo elétrico era mais intensa. Nesse sentido, a teoria das duas correntes era capaz de explicar faíscas como colisões violentas entre fluxos opostos. (10-11)

descobertas próprias. Outros fatores, como a posição social de Gray, devem ter contribuído para isso também. (7)

⁹ A repulsão elétrica havia sido observada no século XVII por Otto von Guericke (1602-1686). Ele relatou, em um livro publicado em 1672, experimentos onde pode-se observar o que vemos hoje como repulsão elétrica. Porém, ele não reconheceu o fenômeno descrito como intrinsecamente elétrico. (2, p. 66-71)

¹⁰ Todos os itálicos nesta tese são usados de maneira a manter os itálicos ou negritos das fontes citadas.

1.2.2 A garrafa de Leiden

Até 1745, vários fenômenos já haviam sido categorizados como de natureza elétrica. Uma verdadeira lista de possibilidades experimentais estava posta a quem se interessasse pelo tema, entre os quais estava Ewald Jürgen von Kleist (1700-1748). As comunicações mais antigas de Kleist, a respeito do que hoje chamamos de garrafa de Leiden, datam de 4 de novembro e 16 de dezembro (de 1745) e eram endereçadas a Johann Nathanael Lieberkühn (1711-1756). Kleist também escreveu sobre seus experimentos para Johann Gottlob Krüger (1715-1759) em 19 de dezembro do mesmo ano e 17 de março do ano seguinte.

Em abril de 1746, Krüger reimprimiu duas cartas de Kleist em sua monografia intitulada “História da Terra nos tempos muito antigos” (no original: *Geschichte der Erde in den allerältesten Zeiten*). A primeira carta descrevia oito experimentos que historiadores veem como uma primeira versão do que atualmente entendemos como garrafa de Leiden¹¹. Kleist iniciava o experimento inserindo um carretel de madeira dentro de um pequeno tubo de vidro. Quando este era eletrificado, pequenos efeitos luminosos eram observados. Posto que o aspecto visual dos efeitos era o principal interesse de Kleist, este inseriu um prego de ferro no carretel e efeitos luminosos apareceram, agora, devido ao carretel e ao ferro. Em seguida, Kleist abandonou a madeira e introduziu o prego em um frasco de remédio vazio. Quando o prego foi eletrificado e separado do condutor principal (que inseria a eletricidade), efeitos luminosos apareceram. Kleist notou que se o prego estava bastante eletrizado, era possível incendiar álcool (espírito do vinho). Além disso, um choque severo era sentido quando um objeto, um dedo ou uma barra de metal era trazido para perto durante a eletrificação. Kleist ainda realizou algumas modificações no experimento, até inserir um instrumento metálico dentro de uma esfera de vidro contendo algum líquido e eletrizá-lo; neste caso, um choque muito forte foi sentido. (12)

Os destinatários de Kleist tiveram dificuldades ao tentar reproduzir os resultados. Daniel Gralath (1708-1768), após diversos insucessos, pediu mais detalhes sobre o experimento a Kleist. Finalmente, em 5 de março de 1746, Gralath e Gottfried Reyger (1704-1788) obtiveram sucesso: Reyger segurou com uma de suas mãos a pequena garrafa com o prego na direção do condutor eletrificado e, com a outra mão, aproximou-se do prego, produzindo faíscas. Ainda assim, os experimentadores discordavam sobre as condições experimentais envolvidas no fenômeno. Quando Gralath conseguiu reproduzir os resultados,

¹¹ Sobre as fontes históricas ainda existentes acerca dos experimentos de Kleist, e uma descrição de cada modificação experimental em seus estudos que culminaram na garrafa de Leiden, ver: (12).

uma nova descrição de um experimento similar já circulava o meio acadêmico: a de Musschenbroek. (12)

Pieter (ou Petrus) van Musschenbroek (1692-1761) obteve uma posição como professor na Universidade de Leiden em 1742. Musschenbroek e seu assistente Jean Nicolas Sebastien Allamand se interessaram pela ideia de produzir fogo elétrico (faíscas) a partir da água em experimentos elétricos, seguindo os trabalhos de Georg Matthias Bose (1710-1761). (13) Em carta endereçada a René A. F. de Réaumur (1683-1757) – seu correspondente na Academia Real de Ciências (*Académie Royale des Sciences*) parisiense – em 20 de janeiro de 1746, Musschenbroek descreveu o famoso experimento. Conforme o experimentador, um condutor (geralmente um cano de arma) conecta um gerador de eletricidade por fricção a uma quantidade de água que preenchia parcialmente uma garrafa de vidro. Se o experimentador segurasse a vasilha de vidro em uma mão, seria possível produzir faíscas com a outra mão apenas aproximando-a do condutor. Um forte choque podia ser sentido quando se encostava a mão livre no condutor.

Segundo o historiador John L. Heilbron, a garrafa provocou uma revolução na ciência elétrica, pois violava a regra de Dufay.¹² De acordo com Heilbron, a questão central do experimento era a de que o recebedor do choque deveria estar aterrado para realizá-lo. Conforme Heilbron, “ninguém que aceitava a regra de Dufay – como faziam todos os eletricitas experientes – poderia, intencionalmente, ter inventado a garrafa de Leiden”. (3, p. 253) Com um dos pilares para apoiar essa afirmação, Heilbron usou o fato de que não foi Musschenbroek quem sofreu o primeiro choque em Leiden, mas sim Andreas Cunaeus – advogado sem instrução experimental, mas que se interessara pelos fenômenos elétricos –, após visitar o laboratório do professor.

No entanto, em um artigo, Silva e Heering (12) apontam que nas primeiras investigações sobre o tema o aterramento não era uma dificuldade que desafiava os acadêmicos interessados da época. De fato, levando-se em conta que o objetivo do experimento era eletrizar a água, o fenômeno respeitaria a regra de Dufay¹³, já que a água estaria contida em um material elétrico (*i.e.*, isolante): o vidro. A questão inicial levantada na época parecia ser a necessidade de conectar o interior e o exterior da garrafa por um corpo

¹² Dufay, como experimentalista, deixou um ditame à comunidade de filósofos interessados em eletricidade. A regra versava que, para um corpo ser eletrificado, ele deveria estar apoiado por um material elétrico espesso. Na linguagem atual, a regra nos faz mais sentido: o corpo precisa estar isolado. (3, p. 250-255)

¹³ Alguns filósofos naturais, como Galath, entenderam que o experimento violava a regra de Dufay. (3, p. 315) Porém, outros, como o britânico William Watson, discordavam dessa conclusão. (3, p. 322; 12, p. 18-19)

externo – geralmente o corpo do experimentador; o problema central era, inicialmente, o conceito de circuito elétrico.

Os membros da Academia de Ciências de Paris rapidamente se interessaram pelo experimento, em especial Jean Nollet. Ele alterou diversos materiais no experimento, trocando a água por outros líquidos e metais e até mesmo trocando o vidro por porcelana. Demonstrou também que o formato da garrafa não era relevante. (3, p. 316-321) Conforme Nollet, a matéria elétrica ficava retida em um dos lados da garrafa e apenas atravessava o vidro (ou porcelana) quando a outra mão encostava (ou se aproximava) do condutor.¹⁴ (14) Nesse sentido, os diferentes paradigmas elétricos que existiam precisavam explicar a razão pela qual seu componente teórico (*effluvia*, por exemplo) atravessa o corpo humano em vez de atravessar o interior do vidro.

Os membros da Academia de Ciências de Londres (*Royal Society*) souberam do novo fenômeno (o choque da garrafa) por uma comunicação de Abraham Trembley (1710-1784) datada de 4 de fevereiro de 1746 e lida perante a academia de Londres em 13 de fevereiro. Poucos comunicados a academia londrina trataram dos novos resultados até o final de outubro, quando ali foi lida uma carta do inglês John Turberville Needham (1713-1781). Nessa carta, eram descritos diversos experimentos envolvendo a garrafa de Leiden. Um conceito aparentemente novo ali presente é o uso da palavra “*augmented*” (“aumentado”, em português) como uma nova qualidade dos resultados experimentais. (12)

Uma semana depois, em 30 de outubro, uma carta de William Watson foi lida na academia de Londres nesse assunto. Nela, ele demonstrou interesse nos resultados dos experimentos com a garrafa. O eletricista britânico postulou cinco condições necessárias para a realização do experimento: (I) o ar estar seco; (II) o vidro da garrafa ser fino; (III) o lado externo da garrafa estar bem seco; (IV) o maior número de pontos de contato possível com o objeto não-elétrico (a mão, nesse caso), e; (V) a água de dentro da garrafa estar aquecida. Ele também descreveu que após diversos experimentos ficara claro que “a força elétrica sempre descreve um circuito”. (15) De tal modo, se um homem segurasse a garrafa com uma mão e encostasse no cano da arma (condutor) com a outra, ele sentiria o choque especificamente nos braços e no peito. Watson utilizou o conceito de circuito, e explicou o funcionamento da máquina triboelétrica geradora de eletricidade – e não a garrafa de Leiden – pelo conceito de aterramento. Ainda assim, o aterramento, que alguns historiadores consideraram essencial no desenvolvimento do experimento da garrafa, apenas passou a ser considerado como

¹⁴ John L Heilbron afirma que essa explicação não compreendia o fenômeno por completo. (3, p. 321)

essencial¹⁵ à eletrificação da garrafa quando foi explicitado como tal por Benjamin Franklin (1706-1790). Em suma, o problema girava em torno do conceito de circuito inicialmente. Depois, com a dominância das descrições experimentais e da explicação de Franklin para a garrafa de Leiden, o aterramento da garrafa foi percebido como uma questão central. (12)

1.2.3 O fluido elétrico de Benjamin Franklin

O novo fenômeno era um importante ponto de discussão entre os filósofos eletricitistas da época. Entre esses interessados estava Benjamin Franklin. Em sua autobiografia, Franklin menciona Adam Spencer como o primeiro a apresentá-lo aos experimentos elétricos. Todavia, ele apenas começou a se interessar pela eletricidade após Peter Collinson (1694-1768) enviar-lhe um tubo de vidro e alguns trabalhos sobre experimentos elétricos em 1746. (14)

Em 28 de março de 1747, Franklin comunicou a Collinson que já estava realizando alguns experimentos elétricos. (16) A partir disso, Franklin começou a delinear sua teoria elétrica, segundo a qual partículas de fluido elétrico se repeliam mutuamente e eram atraídas pela matéria comum. Conforme o autor, Franklin, o fluido elétrico permeava toda a matéria em uma quantidade natural. Portanto, qualquer corpo que não apresentasse fenômenos elétricos ainda sim estaria submetido ao fluido; o movimento das partículas em um corpo explicaria a condução. Em resumo, o fluido elétrico poderia acumular em partes de um sistema (ou corpo), o que resultaria em um excesso (“*plus*”) em relação à quantidade natural de fluido. O fluido poderia também se dispersar das partes de um sistema (ou corpo), o que resultaria em uma falta (“*minus*”) em relação à quantidade natural. A teoria de Franklin será chamada aqui de teoria de um fluido elétrico (em contraste com a de dois fluidos, que veremos a seguir). A partir desse ponto de vista teórico, Franklin escreveu sua explicação para a garrafa de Leiden. (14)

Tão maravilhosamente são esses dois Estados de Eletricidade, o *mais* e o *menos* combinados e balanceados nesta garrafa milagrosa! Situados e relacionados uns aos outros de uma maneira que eu não posso compreender de forma alguma! Se fosse possível que uma garrafa em uma parte contivesse uma quantidade de ar fortemente comprida, e em outra parte um vácuo perfeito, nós sabemos que o Equilíbrio seria instantaneamente restaurado no interior. Mas aqui temos uma garrafa, contendo ao mesmo tempo um *Pleno* de fogo elétrico e um *Vácuo* do mesmo fogo; e mesmo assim o Equilíbrio não é restaurado entre eles se não por uma comunicação *externa*! Apesar do *Pleno* pressionar violentamente para se expandir, e o vácuo faminto parecer atrair violentamente a fim de ser preenchido. (17)

¹⁵ Os conceitos atuais de eletrostática sugerem que não é necessário que a pessoa esteja aterrada, o corpo humano (mesmo isolado) é capaz de fornecer cargas suficiente para a geração da corrente. (12, p. 6)

É possível notar que Franklin explicava o experimento em termos de um equilíbrio entre dois estados de eletricidade situados na garrafa. Conforme o autor, quando se adicionava fluido elétrico no interior da garrafa, ele ficava acumulado na superfície interna, deixando-a positiva. Como o sistema deveria se manter em equilíbrio, a superfície externa expulsava o fluido elétrico para o ambiente, acumulando uma eletrização contrária, negativa. O fluido saía da parte externa do vidro e, atravessando a pessoa que segurava a garrafa, acumulava-se no solo. (3, p. 324-343)

Uma hipótese levantada por Franklin era de que o vidro seria impermeável ao fluido elétrico, retendo-o. Com isso, o fluido elétrico retido em uma superfície da garrafa não conseguiria preencher a deficiência de fluido da outra superfície, que era ejetada para o solo devido a repulsão¹⁶ do fluido adicionado à garrafa. Assim, as superfícies do vidro, definidas como metade da espessura do vidro para a externa e a interna, acumulava um pouco de fluido elétrico (ou o perdia, se fosse a externa) no experimento.¹⁷ Mas, pela fabricação do vidro, os poros no interior do vidro, onde o fluido elétrico residiria, eram muito pequenos e, portanto, o fluido não conseguiria equilibrar os dois lados da garrafa de Leiden por dentro, procurando o equilíbrio por fora; ou seja, movimentando-se pelo experimentador quando ele encosta no condutor do experimento e, por isso, sentindo um choque. (18, p. 84-90) Vemos, pois, que a impermeabilidade do vidro é essencial na explicação do fenômeno da garrafa de Leiden.

Na época, havia mais motivos para se acreditar justamente no contrário. Watson e Hauksbee já haviam mostrado que era possível atrair objetos leves através de pedaços de vidro. Franklin respondeu a esses resultados em seu trabalho, afirmando que nenhum fluido atravessava o vidro. Em vez disso, havia a formação de atmosferas elétricas em cada lado dele, causadas pela aproximação do objeto eletrizado no pedaço de vidro do experimento. (19, p. 85) Nollet, que se tornou um importante crítico à teoria de Franklin, realizou experimentos que contrariavam a suposta impermeabilidade do vidro. Franklin nunca respondeu diretamente a Nollet, mas foi defendido na Europa por alguns filósofos naturais, como Beccaria (1716-1781) e Jean-Baptiste Le Roy (1720-1800). (3, p. 352-372; 18, p. 84-86) Franklin seguiu com seus experimentos, testando as propriedades de impermeabilidade do vidro na garrafa de Leiden. Entretanto, seu resultado, reportado¹⁸ a John Lining (1708-1760) em março de 1755, mostrou-se contrário à sua teoria. (20)

¹⁶ Veremos logo mais que Franklin não fazia uso do conceito newtoniano de força à distância, mas sim de um ente teórico próprio, as atmosferas elétricas, para explicar a atração e a repulsão.

¹⁷ A garrafa de vidro do experimento era revestida por uma folha de metal. Logo, entende-se “superfície” aqui como a superfície do vidro, segundo a definição de Franklin, e o revestimento metálico delas.

¹⁸ E publicado em 1769. (19, p. 87)

A teoria de Franklin era de natureza quantitativa, pois usava noções de quantidade de um fluido elétrico, em vez de qualidades de um corpo ou de uma eletricidade. Segundo ele, quando o fluido se acumulava, a eletrização era positiva; mas quando dissipava, o resultado era negativo. Diferentemente de Dufay, cuja teoria era *qualitativa*, em Franklin, podia-se perguntar ‘quanto é a eletrização de um objeto?’, ‘quanto ele acumulou (ou perdeu) de fluido elétrico?’. O foco se deslocava da natureza do corpo à quantidade de fluido presente.

Franklin também dedicou seus esforços a estudar a atração e, em segundo momento, a repulsão elétrica. Ele entendia que as atmosferas elétricas surgiam em volta de um corpo com excesso de fluido, justificando assim a repulsão da eletricidade positiva como um afastamento das atmosferas elétricas. Para ele, a atração elétrica entre eletricidades distintas era explicada pela interação entre uma atmosfera e um corpo com falta de fluido, desse modo a atmosfera preenchia o corpo negativo, que possuía um déficit de fluido elétrico. Já no que concerne a repulsão de corpos negativos, a dificuldade era evidente. Franklin apenas incorporou as críticas nesse sentido (*i.e.*, atração entre corpos no estado negativo) em sua teoria como uma nova hipótese, inserindo esse fato de maneira *ad hoc*, propondo que corpos sem atmosfera também se repeliam (3, p. 324-384).¹⁹

Muitos eletricistas europeus, principalmente na França, continuaram adeptos da teoria de Nollet (dois jatos) apesar das ideias franklinianas. (21) As dificuldades da teoria de Franklin explicam essa baixa adesão inicial. Além disso, em 1759, Robert Symmer (1707-1763) postulou uma nova teoria, baseada na existência de dois fluidos elétricos. A teoria de Symmer surgiu primeiro quando ele notou eletricidades contrárias em meias de cores diferentes. Depois, ele realizou alguns experimentos com folhas de metal e com a garrafa de Leiden para demonstrar a existência de dois fluidos elétricos distintos. Sua teoria foi mais bem recebida na Europa continental do que na Inglaterra, onde Franklin era mais influente. (23)

Ainda assim, a teoria de um fluido elétrico frankliniana encontrou apoio em Johan Carl Wilcke (1732-1796) na década de 1750 e, por influência deste, em Franz Ulrich Theodosius Aepinus. (3, p. 384-390)

¹⁹ Para mais sobre a teoria de Benjamin Franklin e seu contexto histórico, pode-se consultar: (3). Também há: (22). Em português, pode-se consultar o seguinte livro: (18). Sobre as influências e a origem de sua teoria, pode-se ler: (14).

1.3 Uma breve biografia de Franz Aepinus

Franz Ulrich Theodosius Aepinus nasceu em dezembro de 1724, em Rostock, no norte da atual Alemanha. Seu pai, Franz Albert Aepinus (1673-1750), era professor de teologia na universidade de Rostock. Tinha um irmão e uma irmã: Angelius Johann Daniel Aepinus (1718-1784) Francisca Agnesa Beata Aepinus. Começou a frequentar a universidade em 1740, matriculado primeiramente em teologia e logo depois mudado para medicina.

Desde antes da universidade, Aepinus conhecia alguns trabalhos de Christian Wolff (1679-1754). Já estava, pois, familiarizado, ao menos em um nível introdutório, ao método matemático de Leibniz; Wolff era um leibnizianos bastante influente. (24) Para além do estilo leibnizianos, ao longo de sua formação Aepinus teve contato também com o newtonianismo. É possível observar essas influências contrapostas em seu processo de aprendizado: estudou filosofia natural pelo livro *Elementa Physics* de Georg Erhard Hamberger (1697-1755), de caráter leibnizianos, crítico da ação à distância de Newton. Do mesmo modo, Aepinus estudou com o professor G. C. Detharding (1699-1784), um árduo newtoniano.

Após completar seus estudos, Aepinus se tornou professor (*privatdozent*) em Rostock. Seu principal aluno foi Johan C. Wilcke, que se tornaria um importante colega em seus primeiros estudos em eletricidade e magnetismo. Nesse mesmo período, Aepinus escreveu diversos trabalhos para a universidade, o que nos dá uma ideia de quais eram suas referências intelectuais na época.

Por exemplo, em seu *Commentatio De Notione Quantitatis Negativae* de 1754, os seguintes livros são citados: *Arithmetica universalis* de Newton, *Elementa analyseos finitorum* de Wolff, *Analyse des infiniment petits* de l'Hospital, *Éléments de la Géométrie de l'infini* de Fontenelle, entre outros. (25) No começo de sua carreira acadêmica, é possível encontrar também referências à *Mechanica* de Euler e ao *Hydrodynamica* de Daniel Bernoulli. Além disso, exemplos de livros sobre aritmética, cálculo e trabalhos mais físicos, como os de mecânica e hidrodinâmica, nos mostram o amplo conhecimento de Aepinus em filosofia natural e matemática.

Além disso, Aepinus também estudava astronomia. Suas observações sobre o trânsito de Mercúrio em 1753 lhe renderam uma reputação fora de Rostock. De tal modo, e com a ajuda do matemático Leonhard Euler (1707-1783), que mediava a contratação de um astrônomo para a Academia de Ciências de Berlim, Aepinus conseguiu ali uma vaga como astrônomo. Ele concluiu sua mudança para Berlim em março de 1755.

Lá, um grupo promissor de filósofos e matemáticos se reunia na casa de Leonhard Euler em alguns jantares. Entre eles estava Aepinus, Wilcke²⁰, Johann Albrecht Euler (1734-1800), Johann Gottlob Lehmann (1719-1767), entre outros. Muito provavelmente os fenômenos elétricos faziam parte das conversas deles, visto que, a partir de 1754, Johann Euler já estava envolvido com os estudos elétricos, como veremos no capítulo 3.

Em Berlim, Aepinus e Wilcke leram a obra de Benjamin Franklin *Experiments and Observations on Electricity, made at Philadelphia in America*. Suas primeiras investigações experimentais em eletricidade envolviam um raro cristal que atraía cinzas quando aquecido. Aepinus e Wilcke notaram que, quando se aquecia a turmalina imergindo-a em água quente, o cristal ficava eletrificado positivamente em uma face ‘A’ e negativamente na face oposta. Ao comparar dois pedaços de turmalina, aquecidos da mesma maneira, mas com formatos diferentes, Aepinus concluiu que a formação de “polos” elétricos não dependia da forma externa do cristal. Logo, só poderia depender da estrutura interna dele²¹. (26)

Com base em seus resultados sobre a turmalina e seu conhecimento sobre a teoria de Franklin, Aepinus descreveu uma analogia entre eletricidade e magnetismo, que ele usou para formular sua teoria magnética, baseada em um fluido elétrico. Conforme Aepinus, se a eletricidade era o excesso ou deficiência de fluido elétrico, então o magnetismo seria também o excesso de um novo fluido, magnético, em um polo do ímã, resultando em uma deficiência no polo magnético oposto. Nesse sentido, fenômenos magnéticos podiam ser entendidos em termos de interações entre o fluido magnético e a matéria comum (ordinária). (19, p. 137-188) Seus experimentos e sua analogia entre eletricidade e magnetismo, além de seu conhecimento matemático, resultaram em um livro intitulado *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi*, de 1759, publicado em São Petersburgo. Esse livro será o principal alvo de análise no capítulo 4 do presente trabalho.

Em maio de 1757, Aepinus se mudou para São Petersburgo. Tinha conseguido uma cadeira na Academia russa após a morte de Georg Wilhelm Richmann (1711-1753). Em setembro de 1758, Aepinus realizou diversos experimentos para Elizabeth Petrovna (1709-1762), a Imperatriz russa, e sua corte real. No começo de 1759, também fez uma apresentação para a Grã-Duquesa da Rússia Sophie Friederike Auguste (1729-1796), que se tornaria, em 1762, a Imperatriz Catherine II.

²⁰ Wilcke se mudou para Berlim no segundo semestre de 1755. (3, p. 386)

²¹ Seus experimentos com a turmalina não foram reproduzidos com sucesso por Benjamin Wilson (1721-1788). (27) Aepinus discute o conteúdo na referência (28). Isso indica que a carta de Wilson foi escrita antes da metade de 1762. Os dois não parecem ter resolvido suas discordâncias com relação às propriedades do cristal.

Suas apresentações causaram boa impressão na corte e não demorou muito para que fosse chamado para realizar afazeres reais. Primeiro, em 1761, como tutor pessoal de Catherine em filosofia natural. Depois como diretor de estudos na *Imperial corps of Noble Cadets*, uma escola para os filhos dos nobres russos. Em 1765, ele foi escolhido para ser o tutor do filho da Imperatriz, o futuro Imperador Paul I (1754-1801). Esses novos ofícios reais deixaram Aepinus sem tempo para se dedicar aos assuntos acadêmicos, resultando em uma queda na quantidade de trabalhos comunicados à academia²². Sua morte data de 10 de agosto de 1802, na cidade de Dorpat (atual Tartu, na Estônia). Poucos escritos de cunho pessoal sobreviveram ao tempo, e inexistente retrato conhecido (19, p. 3-64).

²² Para mais detalhes biográficos de Aepinus com especial atenção a seu período em São Petersburgo, ver: (29).

2 Caminhos para uma filosofia da matematização

Neste capítulo, começaremos definindo o que entendemos como ‘matematização’, além de outros termos importantes nesta tese. Com isso, destacaremos o caráter epistemológico da matematização, especialmente nos critérios de aceitação para uma explicação científica. Isso acontece em duas frentes, definindo o que entendemos como explicação científica e a aplicação da matemática nas ciências (especificamente, na física).

Na primeira frente, discutiremos um pouco sobre explicações científicas e concluiremos que há diferentes formas de explicações científicas. Não há, portanto, uma definição fechada para o conceito de explicação. Isso nos fornece a possibilidade de compreender diferentes formas de argumentação, que veremos ao longo dos capítulos 3, 4 e 5, como explicações sobre as mesmas observações naturais – no caso, os fenômenos elétricos conhecidos no século XVIII.

Na segunda frente, abordaremos a concepção inferencial, uma abordagem filosófica proposta por Otávio Bueno e Mark Colyvan em 2011. (30) Com ela, teremos uma esquemática bastante funcional e precisa para descrever *como* a matemática é aplicada em uma teoria científica. Porém, a concepção inferencial trata de teorias já matematizadas e, portanto, precisaremos construir um referencial próprio para a matematização no nosso estudo histórico. Ou seja, a concepção inferencial nos mostra como a matemática dialoga com as outras partes da teoria, mas não é suficiente para, sozinha, indicar *como o processo de matematização ocorre historicamente*.

Essas duas frentes funcionam como andaimes de construção onde apoiaremos nossa análise histórico-filosófica. Porém, nossa análise não se restringirá apenas a elas. Assim, somos levados a formular dois conceitos – de estilos e projetos de matematização. Eles serão definidos na seção 2.3 em contraponto aos conceitos bachelardianos de ruptura e obstáculo epistemológicos. Esses conceitos serão trabalhos historiograficamente com os capítulos 3, 4 e 5. No capítulo final, resumiremos nossos achados.

2.1 Matematização e mecanicismo

Usaremos nesta tese a definição do historiador Yves Gingras (31) para os termos matematização, quantificação e mecanicismo. Para ele, a matematização é a produção ou uso de formulações matemáticas abstratas, algébricas e/ou geométricas. A quantificação de uma

teoria se restringe ao uso de números para fins de medição ou argumentação. (31, p. 407-408) A outra definição, mecanicismo, é “uma [explicação] que providencia uma causa eficiente [dos fenômenos] baseada em forças de contato”. (31, p. 414) Nesta tese, o mecanicismo abarca também explicações baseadas em entes físicos tangíveis (como fluidos elétricos).

Esses termos são categorias histórico-filosóficas (no sentido de serem criadas por historiadores e filósofos) e, por isso, podem variar entre diferentes autores. Por exemplo, seguindo a definição aqui adotada, o famoso trabalho de 1950 *The Mechanization of World Picture* do historiador Eduard Jan Dijksterhuis seria acerca da ‘desmecanização’ – e não mecanização – dos estudos de Newton sobre gravitação, já que seu uso da palavra mecanização é similar à nossa matematização e quase oposta ao nosso uso da palavra mecanicismo. (31, p. 414) Explicitamos nossas definições acima para evitar confusões como essa, comuns no uso de categorias históricas²³.

Um dos objetivos de Gingras é analisar as consequências não-intencionais relativas à utilização da matemática. Isto é, seu foco “está, portanto, nos *efeitos* e não nas causas (ou razões) da matematização da física”. (31, p. 384) O autor mostra então, as consequências da matematização da física em três frentes: a epistemológica, a social e a ontológica.

A consequência epistemológica é a mais relevante para esta tese. Neste aspecto Gingras discute que conforme os *Principia* de Isaac Newton (1643-1727) foi sendo mais e mais aceito, sua abordagem matemática passou a ser utilizada pelos acadêmicos e o próprio conceito de explicação foi se alterando. Em resumo,

esse episódio mostra que os critérios de avaliação para o que deveria ser considerado como uma ‘explicação’ aceitável (da gravitação, neste caso) estavam se deslocando para a matemática e se afastando das explicações mecanicistas (...). Durante todo o século XVII e a maior parte do [século] XVIII, ‘explicar’ um fenômeno físico significava dar o mecanismo físico envolvido na sua produção. (31, p. 398)

Segundo Gingras (31), o uso da matemática nos *Principia* e sua subsequente aceitação marcam uma importante alteração na compreensão do que seja explicar um fenômeno que privilegia explicações matemáticas às mecanicistas²⁴. Um exemplo disso, apontado por Gingras, está no livro II dos *Principia*, onde Newton mostrou matematicamente que nenhum

²³ Um outro exemplo de confusão é o uso da expressão “filosofia mecânica” nos estudos sobre a Revolução Científica. Para mais, ver: (32, p. 142-147).

²⁴ Vale ressaltar que é enganoso interpretar Newton como alguém que rejeitou ou desdenhou de pesquisas utilizando explicações mecanicistas para a gravidade, como teorias etéreas. Ao longo de sua carreira ele estudou diversas delas, mas pela dificuldade que elas impuseram, acabou por não as abordar no *Principia* (pelo menos não em detalhes). Assim, o entendimento de Newton era, grosso modo, de que, apesar de uma teoria mecanicista para a gravidade ser desejável, ela seria muito difícil (talvez impossível) e, portanto, a ação à distância seria uma abordagem possível e útil de ser postulada. Na esteira disso, os newtonianos do século XVIII, após a morte de Newton, abandonam o mecanicismo e adotam a força à distância como inata ao mundo. (33, p. 80-89)

movimento plausível de vórtices poderia ser compatível com as leis de Kepler. Assim, Newton afastara as argumentações puramente verbais (*i.e.*, sem matemática) e, desta forma, “havia misturado física com matemática e, assim, explicara fenômenos físicos matematicamente”. (31, p. 399)

Tal abordagem aumentava a dependência da argumentação física com a matemática e, conseqüentemente, foi alvo de críticas. Um exemplo é o jesuíta Louis Bertrand Castel (1688-1757), para quem o sistema de Newton seria um sistema matemático, sem essência física. (31, p. 399-401) Como Castel era ligado ao cartesianismo, ele já rejeitava o uso de ações à distância²⁵. Porém, em sua crítica aos trabalhos de Newton podemos observar que ele vai além disso e critica o uso – ou excesso de uso – da matemática na argumentação newtoniana quando escreve que

Na verdade, permita-me dizer que, com todo o respeito que se deve ter, e que eu tenho para com o grande Newton, não há nada além de geometria em seu sistema e a boa física desaparecerá se permitirmos que ele continue.
Eu admiro seu profundo *raciocínio geométrico*. Mas não, como deve-se ver, uma palavra de *raciocínio físico* em todo o trabalho [de Newton]. Alguém acreditar que estejamos em condições de dizer que os pesos dos planetas são [dados] na razão de $\frac{1}{d^2}$? (34, p. 121)

A crítica de Castel nos mostra um deslocamento nos critérios segundo os quais uma explicação (nas palavras dele, “raciocínio”) é aceita. Isso fica particularmente claro no seu uso da palavra “física”. Para ele, a física é mais fortemente relacionada ao mecanicismo e às explicações mecanicistas, não podendo depender de raciocínios matemáticos. Assim, vemos que conceitos, como “física” e “raciocínio”, mudam de significado conforme nos movemos de um personagem histórico para outro, o que nos permite fazer uma analogia com o fenômeno de paralaxe. Ou seja, há uma paralaxe na compreensão do que é explicar algo fisicamente. Portanto, na esteira disso, para a geração de Newton e as que a sucederam,

a palavra ‘explicação’ simplesmente adquiriu um significado diferente da que possuía antes e as controvérsias que cercavam a existência dos vórtices e qualidades ocultas tornaram-se ‘fora de época’. (31, p. 402)

A segunda consequência notada por Gingras é de ordem ontológica. Nela, o uso da matemática tendia a privar os aspectos sensíveis e tangíveis dos conceitos físicos. Formulações matemáticas se opunham às tendências da época de usar termos mais substancialistas; isto é, tangíveis. Com a matemática, conceitos e explicações mecanicistas

²⁵ O próprio uso da ação à distância já representava um desafio conceitual, já que apenas se pensava a física em termos mecanicistas e, portanto, a matéria não poderia atuar em um corpo distante sem uma mediação tangível. Assim, a ação à distância forçava uma mudança nas entidades válidas para conhecer e entender o mundo natural. (35) Porém, estamos focando aqui no uso da matemática, não no uso da ação à distância.

para a gravitação foram perdendo cada vez mais espaço entre 1700 e 1900, dessubstancializando a física. (31, p. 403-405)

A terceira consequência discutida pelo autor é social. Pois, ao longo do século XVIII e XIX, muitos acadêmicos que não dominavam e não usavam a matemática acabavam excluídos dos debates de filosofia natural²⁶. Assim, por exemplo, eles encontravam dificuldades para acessar os canais de comunicação e publicação das academias de ciência da época. Um exemplo disso é Antoine-Louis Guénard Demonville que tentou, sem sucesso, publicar seus trabalhos sobre filosofia natural na *Académie Royale des Sciences*. (31, p. 387-398) Quando finalmente publicou um livro – sem ajuda da Academia – no assunto, ele denunciou, entre outros, Siméon Denis Poisson (1781-1840) por censurá-lo:

Sr. Poisson, pela monomania matemática e [por] não ser homem para admitir qualquer nova verdade, se não consegue encontrar seu esboço em um de seus axiomas da álgebra. É uma atitude panfletária, sempre travada, isso é o que parece; mas sob quantos erros ele não tentará nos sufocar esvaziando sua loja de fórmulas! Estou me referindo àqueles que conhecem sua Teoria Matemática do Calor. Sr. Poisson é um grande matemático.... [mas] aquele que não sabe duvidar [Poisson] nunca será nada além de um físico medíocre. (36. *Avis de l'auteur* [Opinião do autor])

Entender os efeitos da matematização nos ajuda a defini-la e a entender melhor o nosso recorte histórico, cujo objetivo é compreender as formas pelas quais a matematização foi incorporada à física, especialmente na eletrostática do século XVIII. Por isso, como nosso trabalho se atenta ao lado epistemológico associado à matematização, que remete ao conceito de explicação, somos levados à filosofia por trás deste conceito. Além disso, as relações entre física e matemática – outro campo essencialmente filosófico – mostra-se pertinente para este trabalho. Isto é, nosso trabalho abre duas frentes no campo da filosofia. A primeira é sobre a relação entre o conceito de explicação e a segunda trata da aplicação da matemática nas ciências, especificamente na física.

Para tanto, estudaremos a seguir algumas posições filosóficas acerca do conceito de explicação científica, um tópico ainda em aberto, sem a pretensão de esgotar o assunto. Nosso objetivo é definir qual é a margem que temos, como historiadores, para chamar um argumento em uma teoria de ‘explicação’.

Depois, a partir da seção 2.3, discutiremos a aplicação da matemática na física seguindo o que acreditamos ser o melhor referencial filosófico para descrever isso – a concepção inferencial, proposta por Otávio Bueno e Mark Colyvan e posteriormente

²⁶ Esse fenômeno social já havia começado na Academia de Ciências de Londres (*Royal Society of London*) antes do século XVIII. Neste caso, havia uma disputa entre os adeptos da matemática e os pesquisadores naturalistas, mais ligados à história natural e à observação. (37)

desenvolvida por, entre outros, Steven French (30, 38). Ao final, concluiremos este capítulo com uma proposta filosófica nossa fazendo um contraponto ao conceito de ruptura epistemológica de Gaston Bachelard.

2.1 Primeira frente: explicações científicas

Nesta seção, discutiremos brevemente o que são explicações científicas. Começamos explicando brevemente o primeiro grande modelo filosófico nesse assunto – o modelo D-N. Depois, falaremos rapidamente das críticas que ele sofreu e, por fim, mostraremos como a queda desse modelo abriu espaços para diferentes concepções de explicações científicas. Isto é, o recrudescimento dele permitiu que formas diferentes de argumentação, mesmo que centradas em um mesmo fenômeno físico, fossem classificadas como explicações – essa liberdade filosófica será usada nesta tese.

Em 1948, Carl G. Hempel (1905-1997) e Paul Oppenheim (1885-1977) publicaram um artigo extremamente influente chamado *Studies in the Logic of Explanation*. Ele era uma tentativa de caracterizar argumentos dedutivos que constituiriam, segundo eles, uma maneira legítima de explicações científicas. A proposta deles ficou conhecida como modelo Dedutivo-Nomológico (ou, modelo D-N). Ela se enquadra no programa filosófico conhecido como empirismo lógico. Antes de defini-lo, porém, devemos definir dois conceitos que lhe são úteis e que sobreviveram à queda desse modelo, sendo usados até hoje por filósofos – o *explanandum* e os *explanans*. (39, p. 3-4)

Uma proposição que representa um fato a ser explicado é conhecida como *explanandum*, as premissas que o explicam são conhecidas como *explanans*. A explicação de um fato científico é, no modelo D-N, um argumento dedutivo válido cuja conclusão é o fato a ser explicado. Ou seja, o fato – ou, mais precisamente, uma proposição que o represente, o *explanandum* – é o resultado de um argumento dedutivo, baseado no *explanans*. Estas devem conter pelo menos uma proposição que seja uma lei geral²⁷, que deve ser essencial à validade do argumento; sem essa lei, se o argumento não for modificado, ele perde a validade lógica.

²⁷ Uma questão que não abordaremos aqui é a definição de “lei geral”. É importante diferenciá-las de generalizações acidentalmente verdadeiras. Uma lei deve dar provisão para responder contrafactuais (isto é, responder perguntas do gênero “e se?”) e apresentar modalidade (isto é, afirmar aquilo que é necessário, possível ou impossível na teoria). Esses critérios foram propostos para diferenciar leis de generalizações acidentais e funcionam para diversos casos, mas não funcionam para todos. Portanto, esse ponto de contenção nunca foi propriamente sanado pelo modelo D-N. Os detalhes sobre esse debate podem ser encontrados em: (39, p. 8-18).

Com isso, se as proposições que constituem os *explanans* forem verdadeiras, obteremos então uma explicação verdadeira – ou, simplesmente, uma explicação – para o fato em questão.

Logo, podemos definir, de modo sucinto, uma explicação segundo esse modelo do seguinte modo. Ela é definida como um argumento dedutivo válido sobre um fato que satisfaz três condições: I) a explicação deve conter ao menos uma lei geral; II) os *explanans* devem possuir conteúdo empírico, e; III) as sentenças que constituem os *explanans* devem ser verdadeiras. (39, p. 8-12)²⁸

A partir de 1958, críticas mais profundas ao modelo D-N surgiram, na esteira da publicação do livro *Investigações Filosóficas* (em português), de Ludwig Wittgenstein (1889-1951). Assim, uma oposição em termos de pressupostos filosóficos surgira, em especial com os filósofos Norwood Russell Hanson (1924-1967), Michael Scriven (1928-) e Stephen E. Toulmin (1922-2009). (39, p. 33-36) Contraexemplos ao modelo D-N começaram a se tornar comuns na literatura da área, pontuando suas tensões e omissões. Vejamos um exemplo.

O caso da leitura do barômetro é um desses exemplos que explicita uma falha do modelo D-N. Se a leitura de um barômetro em pleno funcionamento cai repentinamente, podemos inferir que uma tempestade se aproxima. Assumimos aqui que há uma lei da natureza que afirma que a queda repentina na pressão atmosférica implica que uma tempestade se aproxima. Todavia, não seria aceitável afirmar que a queda na leitura da pressão no barômetro *explica* a tempestade, já que tanto a queda na leitura barométrica quanto a tempestade são causadas por condições atmosféricas naquela região; os dois são efeitos com uma causa em comum. Isso nos impede de aceitar que um efeito explique o outro. Entretanto, a explicação da tempestade seguindo a leitura do barômetro se encaixa no modelo D-N. Pois, nesse caso há uma lei geral (que assumimos por simplicidade), há uma sentença singular de conteúdo empírico (a leitura feita no barômetro) e há um evento que segue logicamente das duas – a tempestade. (39, p. 46-47) Esse exemplo evidencia que a causalidade (isto é, da explicitação das causas de um fenômeno) é um ponto cego do modelo D-N. Nele, em explicações em que se procura pelas causas de um fato – o que nem sempre é o caso (40, p. 2) – o modelo D-N geralmente não funciona e pode levar a erros.

O modelo de Hempel e Oppenheim manteve-se como alicerce para questões acerca das explicações científicas por bastante tempo. Mas, quando passou a sofrer profundas críticas

²⁸ Os detalhes técnicos em linguagem lógica formal, assim como critérios inseridos depois para evitar contradições lógicas, fogem ao escopo deste trabalho e podem ser encontrados em: (39, p. 19-23).

filosóficas, deu espaço a uma grande variedade de novos modelos, vindos de várias bases filosóficas distintas. Podemos destacar aqui duas: a unificacionista e a mecanicista²⁹.

A visão unificacionista sustenta que o entendimento científico aumenta conforme decresce o número de premissas independentes necessárias para explicar um evento ocorrido. Neste caso, o objetivo é construir uma visão de mundo coerente, na qual fatos e fenômenos particulares seriam encaixados. Dessa forma, explicações servem para organizar e sistematizar o conhecimento da maneira mais eficiente e coerente possível, produzindo assim uma visão de mundo científica. (39, p. 181-182)

A visão mecanicista sustenta uma concepção ontológica para as explicações científicas. Ou seja, o cerne dessa visão entende que explicar é conhecer os mecanismos ocultos segundo os quais a natureza opera. Assim, pelo menos em várias explicações científicas, a explicação vai além de um conhecimento descritivo do fenômeno, usando também entidades não-observáveis. Logo, explicações não criam caixas pretas; ao contrário, elas as abrem. (39, p. 182-183)

O filósofo Wesley C. Salmon (1925-2001) resume essas duas visões da seguinte forma: há dois tipos de explicações, explicação₁ e explicação₂, ambas legítimas. A explicação₁ é a mecânica e constrói uma explicação de maneira localizada, partindo de motivações e eventos particulares (e da relação entre esses eventos regulares), sendo construções de baixo para cima. A explicação₂ por outro lado é unificacionista. São explicações mais globais, encaixando o fato a uma visão mais geral do universo. As explicações₂ são construídas de cima para baixo. (39, p. 182-185) O exemplo a seguir ilustrará bem como elas funcionam na prática e podem ser aplicadas a um mesmo fenômeno.

Um balão de gás hélio está preso ao chão de um vagão de trem. Conforme o trem acelera, seus passageiros são pressionados contra seus assentos, ou seja, eles sentem uma força na direção contrária à aceleração do trem. Porém, o balão vai para frente, e não para trás. Duas explicações podem ser oferecidas para esse fenômeno, ambas corretas. A primeira se baseia nas moléculas de ar. Conforme o trem acelera, a parte interior traseira da cabine colide com as moléculas de ar e, assim, elas se acumulam no fundo e criam um gradiente de pressão não nulo entre a parte traseira e dianteira da cabine. Esse gradiente de pressão atua na parte traseira do balão, gerando um desequilíbrio de forças nele, empurrando-o para frente. A segunda explicação parte de um princípio geral, o princípio da equivalência de Einstein. De acordo com esse, um campo de acelerações é (fisicamente) equivalente a um campo

²⁹ O termo mecanicista neste caso é usado em outro sentido, diferente daquele da seção 2.1. Aqui, não há nenhum pré-requisito sobre os mecanismos da natureza serem por forças de contatos (ou seja, entes tangíveis).

gravitacional. Assim, como balões de gás hélio, quando na atmosfera e sob o efeito da gravidade da Terra, sobem, então, quando o trem acelerar, ele também se moverá em sentido contrário ao da aceleração da cabine; movendo-se para a frente dela. A primeira explicação é mecanicista, apela para entidades não-observáveis (as forças, no caso), e monta um esquema similar ao de uma engrenagem, onde cada etapa leva à seguinte até explicar a causa do fato observado. A segunda é unificacionista, apela para um princípio físico bastante geral, e mostra como o fato observado se encaixa em um esquema maior no Universo. É válido ressaltar que ambas evidenciam um entendimento sobre o mesmo fato experimental, mas esses entendimentos diferem entre si. (39, p. 183-184)

Em resumo, o modelo D-N já não é mais o estado da arte, apesar das palavras *explanandum* e *explanans* ainda serem comuns. As explicações científicas enquanto objeto de estudo dos filósofos não constituem um tópico fechado, mas uma rede de interações bastante complexa que permeia vários campos, como linguagem, lógica e, em certa medida, metafísica. Nela, há várias possibilidades de analisar e definir as diferentes explicações que a ciência, como a física, fornece para fenômenos – ou para o mesmo fenômeno – da natureza.

Em trabalhos historiográficos, como este, quando nos afastamos de modelos filosóficos pouco flexíveis, como o modelo D-N, permitimo-nos observar mais nuances em episódios históricos. Em conclusão, aceitaremos aqui que diferentes formas de entender um fenômeno sejam chamadas de explicação, seguindo o espírito da liberdade que a diferença entre unificacionista/mechanicista nos permite. Vale lembrar que usaremos nossa própria definição de explicação ‘mecanicista’, explicitada na seção 2.1 quando tratamos do termo mecanicismo.

2.2 Segunda frente: a aplicação da matemática na física

O físico Eugene Paul Wigner (1902-1995), que escreveu o artigo intitulado *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences* (1960), entendia o uso da matemática nas ciências como algo quase incompreensível e sem resposta racional. Como ele mesmo coloca, no final de seu artigo, “o milagre da adequação da linguagem da matemática para a formulação das leis da física é um presente maravilhoso que não entendemos nem merecemos”. (41, p. 14)

O trabalho de Wigner motivou, de maneira explícita ou implícita, muito do debate acerca da aplicabilidade da matemática nas ciências ao longo da segunda metade do século

XX. Para um exemplo prático, o título de seu artigo é replicado em diversos trabalhos³⁰. Os debates a respeito da aplicabilidade da matemática são até hoje um assunto bastante complexo, mesclando filosofia da ciência, filosofia da matemática e, em alguns trabalhos, teoria dos conjuntos e lógica formal. Portanto, iremos simplificá-lo na medida dos objetivos desta tese.

O referencial filosófico escolhido para representar a relação entre matemática e ciências (como a física) é chamado de “concepção inferencial”. Em resumo, essa abordagem filosófica trata tal relação com mapeamentos. Estes são relações constituídas de duas classes de funções, que veremos logo abaixo, entre as estruturas empírico-teóricas, que constituem a configuração física em uma teoria, e estruturas matemáticas. Esses mapeamentos permitem que tais estruturas se entrelacem.

Essa abordagem recebe o título de “inferencial” porque permite que a configuração física se incorpore às estruturas matemáticas puras. (30, p. 352) O uso do termo inferencial aqui é, portanto, paralelo ao do conceito de “processo inferencial”, segundo o qual um leitor imprime uma interpretação a um texto sem depender apenas das características do texto, mas também das que são próprias do leitor, além da natureza e contexto da interação do leitor com o texto (e com o autor do texto). (42) Ou seja, aqui, a palavra inferencial tem relação com as palavras contextual e relacional.

A aplicação da matemática segundo a concepção inferencial pode ser resumida na seguinte imagem:

³⁰ Um exemplo é o primeiro capítulo do livro *Applying Mathematics* (38), cujo subtítulo é *quão desarrazoável é a efetividade da matemática?* (*Just How Unreasonable is the Effectiveness of Mathematics?*, no original). Além de: (43-44).

Figura 2.1 – A aplicação da matemática na física segundo a concepção inferencial. No lado esquerdo, a configuração empírica, somada a seu lado teórico. Do lado direito, o modelo que vem a representá-la, dotado de estruturas matemáticas. A linha mais acima é o início do processo de representação, a linha mais abaixo é a parte final, depois da etapa de derivação, aqui representada pela flecha transversal.

Fonte: Adaptada de BUENO; FRENCH. (38, p. 53)

A concepção inferencial é dividida em três etapas: primeiro, na etapa de *imersão*, estabelecemos um mapeamento da configuração física (empírica e teórica) para uma estrutura matemática conveniente, sendo essa conveniência uma variável contextual, dependendo de fatores como o objetivo da pesquisa, a matemática disponível, entre outros. Nenhum mapeamento é unívoco para cada situação, sendo a escolha de qual usar também contextual.

Aqui é necessário esclarecer o que são esses mapeamentos. Como afirmado acima, eles são relações constituídas de duas classes de funções e podem ser distinguidas em dois tipos de mapeamentos: homomorfismos parciais e isomorfismos parciais. Essas funções identificam elementos de uma configuração física em elementos de uma estrutura matemática (e vice-versa, na terceira etapa). Nessa abordagem filosófica, a configuração física e a estrutura matemática são definidas como estruturas compostas de elementos e de suas relações entre si. Logo, o mapeamento, via funções, de elementos de uma estrutura para outra acarreta mapeamentos entre as relações desses elementos. Então, a estrutura física – elementos e relações – termina mapeada na estrutura matemática. O inverso também ocorre, na terceira etapa do processo, que explicarei abaixo. No isomorfismo parcial, a função é bijetora; no homomorfismo parcial, não.³¹

³¹ Para definirmos tecnicamente o que são homomorfismos parciais e isomorfismos parciais, precisamos de algumas definições iniciais. Quando uma certa área do conhecimento, Δ , é investigada, formula-se um

Em seguida, tem-se a segunda etapa, chamada de *derivação*, que se resume a deduzir consequências e resultados com o formalismo matemático da estrutura matemática escolhida na primeira etapa.

Ao final, tem-se a terceira etapa, onde os resultados matemáticos obtidos na segunda etapa são interpretados segundo os elementos da configuração física inicial. Essa é a etapa de *interpretação*. Para isso, um mapeamento partindo da estrutura matemática para a configuração física é necessário. (38, p. 51-53)

Vale ressaltar que a descrição da figura (2.1) acima é idealizada, já que as etapas de imersão e interpretação não têm delimitações tão nítidas. Isso ocorre por dois motivos principais: (i) o formalismo matemático geralmente vem acompanhado de algumas leituras físicas sobre seus entes; isto é, as interpretações físicas se incorporam à matemática usada pelos físicos; (ii) a descrição da configuração física já é feita valendo-se de termos matemáticos. (38, p. 53)

O ponto (i) não é um problema, já que não é necessário haver pureza matemática nesse referencial filosófico. O segundo ponto, (ii), pode ser visto claramente nas ‘proposições mistas’ e não apresenta problemas a concepção inferencial. Frases como “a massa do satélite é de 100 kg” ou até mesmo equações, como “ $y = ut - \frac{1}{2}gt^2 - \frac{mu}{\alpha} \ln\left(\frac{m_0}{m}\right)$ ”, onde y denota a posição de um objeto (um foguete) em uma trajetória, são proposições mistas. Nelas, objetos físicos, como um satélite ou um ponto no espaço, encontram-se mesclados a entidades

referencial conceitual que sistematiza a informação a respeito de Δ . Essa área funciona como um conjunto D de objetos (tanto objetos reais quanto idealizados, como partículas subatômicas sem observação direta). Esse conjunto D é estudado examinando-se as relações entre seus elementos. Porém, dada uma relação R definida sobre D , não se sabe – pelo menos não inicialmente – quais objetos de D (ou conjuntos ordenados – chamados énplos – deste) estão, ou não, relacionados a R . Ao final, podemos definir uma relação parcial R sobre D como uma n -ária (uma operação que mapeia n argumentos; se $n = 2$, estaremos nos referindo a operações binárias, como a adição e a multiplicação) representada por um tripleto $\langle R_1, R_2, R_3 \rangle$, onde R_1 é o conjunto de énplos que nós sabemos que pertencem a relação R , R_2 é o conjunto de énplos que sabemos que não pertencem a R , e R_3 é o conjunto de énplos para os quais não é sabido se pertencem, ou não, a R . Com isso, podemos definir uma estrutura parcial, A , como sendo um par ordenado $\langle D, R_i \rangle_{i \in I}$, onde D é um conjunto não-vazio, e $(R_i)_{i \in I}$ é uma família de relações parciais definidas sobre D . Com essas definições em mãos, pode-se finalmente definir as duas principais noções mencionadas. Dado $S = \langle D, R_i \rangle_{i \in I}$ e $S' = \langle D', R'_i \rangle_{i \in I}$ estruturas parciais, onde cada R_i é dado pelo tripleto $\langle R_1, R_2, R_3 \rangle$ e cada R'_i , pelo tripleto $\langle R'_1, R'_2, R'_3 \rangle$. Assim, diz-se que uma função parcial $f: D \rightarrow D'$ é um *isomorfismo parcial* entre S e S' se (i) f for bijetora; e (ii) para cada x e $y \in D$, $R_1xy \leftrightarrow R'_1f(x)f(y)$ e $R_2xy \leftrightarrow R'_2f(x)f(y)$. Agora, diz-se que uma função parcial $f: D \rightarrow D'$ é um *homomorfismo parcial* de S para S' se, para cada x e cada y em D , $R_1xy \rightarrow R'_1f(x)f(y)$ e $R_2xy \rightarrow R'_2f(x)f(y)$. Dessa forma, o homomorfismo parcial representa situações em que algumas estruturas são levadas da matemática para a física (pelas componentes R_1 e R_2), apesar de mais estruturas estarem presentes no domínio matemático (presentes na componente R_3). Isso permite entender e contabilizar o conceito de estruturas excedentes; uma família de estruturas matemáticas novas que conversam com uma matemática aplicada à física, mas que não possuem – pelo menos não de início –, contrapartida na configuração física. Esse conceito de estrutura excedente não é abarcado pelo isomorfismo parcial, que, por requerer que sua função definidora seja bijetora, só existe entre estruturas de mesma cardinalidade (isto é, mesmo número de elementos do conjunto). (38, p. 36-56)

matemáticas, como uma variável. Mesmo assim, seguindo a ideia central da concepção inferencial, essas frases fazem sentido porque os conteúdos matemáticos e não-matemáticos são ligados por mapeamentos simples. No caso do satélite, por exemplo, há um mapeamento (isto é, uma relação) que envolve um satélite e sua quantidade de matéria, o número 100 e o quilo padrão (ou outra definição adequada para o quilo). No caso da equação, basta associar pontos do espaço da trajetória do objeto a coordenadas, além do tempo que o objeto esteve ali como um número que parametriza a trajetória. (45)

Essa abordagem filosófica apresentada nos parece bastante satisfatória para entender a maneira segundo a qual a matemática é aplicada nas ciências. Dessa forma, ela nos permite observar como elas acabam imbrincadas em explicações científicas³². Porém, essa abordagem filosófica trabalha apenas com teorias já matematizadas. (38, p. 44) Com isso, vemos que a concepção inferencial nos apresenta o funcionamento da matemática, mas apenas quando a matematização já está encerrada. Assim, precisamos de uma filosofia para as relações entre matemática e uma área da ciência enquanto o processo (histórico) de matematização estiver ocorrendo.

2.3 Uma filosofia da matematização

Neste capítulo, começamos definindo o que entendemos como ‘matematização’, ‘quantificação’ e ‘mecanicismo’. Para isso, fizemos uso do artigo do historiador Yves Gingras. (31) A partir dessas definições, pudemos abordar a matematização de um ponto de

³² A concepção inferencial permite considerações acerca do papel da matemática nas explicações científicas. Os autores resumem seu ponto quando afirmam que “não achamos que as estruturas matemáticas *sozinhas* tenham tal papel explicativo”. (38, p. 221) Logo, o “trabalho explicativo acabará sendo realizado por uma interpretação física” (38, p. 220), não pela matemática *per se*. Ou seja, por um lado, o referencial filosófico que escolhemos indica que a matemática não possui poder explicativo, sendo tão somente um instrumento indispensável para explicações científicas. Por outro lado, em nossa análise histórica, vemos que os atores históricos sempre descrevem que estão *explicando os fenômenos matematicamente*. Se justapormos os dois lados, temos uma lacuna entre o discurso filosófico e o historiográfico. Isso não é um problema pontual deste trabalho, mas sim uma dificuldade natural da aplicação da filosofia na história das ciências. O objeto de estudo da história é geralmente particular – no caso deste trabalho, é o processo histórico da matematização dos estudos elétricos no século XVIII. Se um ator histórico entender que está explicando um fenômeno pela matemática, o historiador o seguirá para não o distorcer. No máximo, o historiador intercala a linguagem dos atores históricos e a linguagem (científica) atual para explicar o passado aos leitores do presente. Filósofos, por outro lado, geralmente não possuem essas preocupações metodológicas, pois seus objetos de estudos são colocados em termos gerais, não particulares. Assim, cria-se um ponto de incomensurabilidade, que não é total, mas gera certos atritos e dificuldades. (46) Neste trabalho, seguiremos o método do historiador. Portanto, como os atores históricos entendem que explicam os fenômenos elétricos ao fazerem seus cálculos, eu os seguirei no uso do termo “explicação”. Além disso, reforçamos que a concepção inferencial é usada aqui apenas para nos ajudar a descrever *como* a matemática é aplicada em – e dialoga com – uma teoria científica, não o *processo histórico* envolvido nos seus diversos usos e sua aceitação. Assim, ela fica restringida aos objetivos historiográficos desta tese.

vista bastante amplo e vimos que ela permite inserções filosóficas. Dividimo-las em duas frentes: explicações científicas e aplicabilidade da matemática nas ciências.

Na primeira, aceitamos que não há definição clara e precisa para o conceito de *explicação*. Porém, há latitude para afirmarmos que há vários tipos de explicação que, apesar de diferirem em forma, podem ser igualmente chamados de explicação. Isso nos dá margem para observarmos diferentes teorias, com diferentes estilos de matematização, como explicativas, mesmo quando elas tratarem diferentemente os mesmos fenômenos físicos.

Na segunda frente, apresentamos um referencial filosófico sobre a aplicação da matemática na física. Esse referencial nos parece modelar com sucesso a maneira *como* a matemática opera em uma teoria científica. Além disso, ele pressupõe que uma teoria científica qualquer, quando posta sob análise à luz desse referencial, já deve estar matematizada. Pois, como Bueno e French (38, p. 44) pontuam, “no nível que estamos considerando aqui [a concepção inferencial], a física já está matematizada”³³. Assim, como afirmado antes, essas frentes não nos fornecem toda o aparato de análise por si só, funcionando então como andaimes com os quais construiremos essa análise. Portanto, vemos na necessidade de pensar em uma filosofia da matematização que, levando em consideração o mapeamento na concepção inferencial, pois ele modela bem o diálogo entre aparato matemático e pressupostos físicos, equaciona também as variáveis comuns à pesquisa histórica e as facetas mais mecanicistas das explicações.

Propomos então a ideia de *estilos epistemológicos* de matematização, a ser trabalhada ao longo dos capítulos historiográficos a seguir. Ela é definida em contraste com o conceito de ruptura epistemológica, de Gaston Bachelard (1884-1962).

Em *La Formation de l'esprit scientifique*, Bachelard (47) toma vários exemplos, de vários momentos da história da ciência para explicar alguns de seus conceitos mais célebres. Entre eles, Bachelard cunha os conceitos de obstáculo epistemológico e ruptura epistemológica.

Um obstáculo epistemológico é algo que freia, ou dificulta, um raciocínio científico. (48, p. 232-233) Um exemplo de obstáculo dado por Bachelard é o conceito de “esponjosidade”. Para isso, Bachelard cita René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757), quando ele fez um uso imagético da maneira como uma esponja absorve a água para explicar

³³ No máximo os autores sugerem, *en passant*, uma maneira de proceder acerca da matematização. De acordo com eles, características da configuração empírica seriam salientadas para nelas engatar os morfismos necessários para usar estruturas matemáticas convenientes (onde tal conveniência depende do contexto). (38, p. 44) Não a utilizamos porque ela não possui a profundidade historiográficas que nossos episódios históricos requisitaram.

a umidade do ar. Para Bachelard, ao pensar dessa forma, Réaumur acreditava ter explicado o fenômeno com um movimento que, de fato, seria apenas linguístico. Essa “esponjosidade” foi usada por Benjamin Franklin, quando ele se debruçou sobre o fenômeno da eletrificação dos corpos. Franklin raciocinara da seguinte forma: sabendo que uma esponja umedece apenas quando as partes da água forem menores que os poros da esponja, ele conclui, por metáfora, que um corpo comum é uma esponja para o fluido elétrico; eletrificando-se apenas quando seus poros não bloqueiam a entrada do fluido. (47, p. 91-94)

Outro exemplo de Bachelard do mesmo período histórico é o próprio conceito de poro, o qual podia estar aberto para alguns fluidos e fechado para outros. Havia poros específicos para fluidos (e fenômenos) específicos. A imagem do poro funcionava como se convinha, caso a caso. (47, p. 98-99) A imagem do poro e a “esponjosidade” eram obstáculos ao pensamento científico. A ruptura com esses obstáculos seria, então, um passo necessário para que uma teoria prosperasse.

As rupturas epistemológicas são, portanto, os esforços que se tem para se desvincular de concepções anteriores que atrapalham, ou dão apenas uma ilusão de explicação, e, conseqüentemente, ultrapassar um obstáculo epistemológico. (48, p. 234-235) Para Bachelard, um exemplo de ruptura na eletrostática é Charles-Augustin Coulomb (1736-1806). Quando ele investigara as “leis fundamentais da eletrostática”, ele efetivamente se afastou do lado “*pitoresco*” das pesquisas elétricas da época³⁴. (47, p. 43) Bachelard reconhece que certas matematizações criam obstáculos epistemológicos. Mas, segundo ele, havia bons exemplos do uso da matemática. Para ele, a matematização realizada por Newton seria um bom exemplo do uso da matemática como ruptura:

já a concepção matemática e sadia, tal como é realizada no sistema de Newton, permite supor diferentes casos geométricos, deixando uma certa margem – mas margem determinada – às realizações empíricas. O sistema de Newton oferece um plano das possibilidades, um pluralismo coerente da quantidade, que permite conceber órbitas não só elípticas, mas também parabólicas e hiperbólicas. As condições quantitativas de suas realizações são bem determinadas; formam um plano que pode reunir numa mesma visão geral até as atrações e as repulsões elétricas. (47, p. 286)

Assim, de uma visão de mundo mais mecanicista para outra – mais matematizada – haveria uma ruptura na maneira de validar conhecimentos acerca do mundo (por um filósofo da época). Nesse caso, a matemática teria papel nessa ressignificação epistemológica. Nesse sentido, para Bachelard, os estudos de Coulomb representavam uma ruptura frente às

³⁴ O exemplo pitoresco que Bachelard cita é o experimento da aranha elétrica, na qual enfiava-se fios em uma bolinha isolante; a bolinha se movia quando eletrificada. (47, p. 43)

pesquisas eletrostáticas da época, que ele entendia como sendo geralmente frívolas. Nas palavras de Bachelard:

Um público desse tipo [filósofos naturais do século XVIII pesquisando a eletricidade] é frívolo mesmo quando procura dedicar-se a coisas sérias. Convém dar um exemplo do fenômeno. *Em vez de ir ao essencial, acentua-se o lado pitoresco*: enfiam-se fios na bola feita de caule de sabugueiro para conseguir uma *aranha elétrica* [um fenômeno elétrico onde uma bola isolante com fios de metal move-se como uma aranha após eletrificada]. Será num movimento epistemológico inverso, voltando ao abstrato, arrancando as patas da aranha elétrica, que Coulomb descobrirá as leis fundamentais da eletrostática. (47, p. 43)

Nesta tese, não há rupturas e obstáculos, mas sim estilos diferentes de matematização que coexistem. Na esteira disso, os projetos epistêmicos são definidos como conjuntos de estilos com similaridades. Dessa forma, nossa proposta filosófica garante maior nuance historiográfica a respeito da matematização dos estudos elétricos no século XVIII.

Assim, nossa proposta, em contraste com a ideia de ruptura, é mais flexível, pois observamos na história da matematização da eletrostática no século XVIII uma diversidade de matematizações que coabitam esse período. Com isso, veremos que conseguiremos abarcar, com nosso conceito, diferentes estilos de matematização. Por exemplo, em determinados momentos, observaremos concordância entre explicações matematizadas e mecanicistas, o caso do capítulo 3. Mas, em outros, haverá oposição, como no caso do capítulo 5. Além disso, veremos as relações e influências entre matemática, pressupostos físicos e experimentação no capítulo 4. Logo, um conceito como o de ruptura não capta todas as possibilidades de matematização que existiam no recorte histórico desta tese.

Finalmente, defenderemos no capítulo 5 uma generalização aos estilos de matematização – os *projetos epistêmicos*. Isto é, quando estilos de dois autores são similares, como o estilo de matematização de Aepinus, próximo ao de Coulomb (e, possivelmente, uma influência neste). Assim, eles podem ser abarcados em uma ideia maior, de projetos epistêmicos. Apesar da palavra projeto ser usada, não queremos implicar que ele é projetado intencionalmente pelos atores históricos, estamos apenas descrevendo estilos que se somam construtivamente em uma direção por serem semelhantes.

Como este trabalho é centrado na história da física, os conceitos de *estilos* e *projetos epistêmicos* devem ser trabalhados em detalhes ao longo do estudo histórico apresentado nos capítulos 3, 4 e 5. Assim, eles serão vistos em detalhes ao longo dos próximos capítulos, onde veremos matematização da física na eletrostática do século XVIII. Vale notar que não deixaremos de lado um aspecto crucial em nossa pesquisa: a análise diacrônica dos diversos

processos históricos de diferentes matematizações, sejam elas as “vencedoras” ou “perdedoras”.

3 A matematização em Johann Albrecht Euler

Neste capítulo estudaremos a teoria de Johann Euler para a eletricidade. Sua teoria foi desenvolvida ao longo dos anos de 1750 e apresentada em *apenas dois trabalhos* – aparentemente, os únicos de Johann Euler sobre o assunto. Aqui, analisaremos em detalhes apenas o segundo trabalho, intitulado *Recherches Sur la Cause Physique de l'Electricité* (ou, apenas, *Recherches*), pois é aquele que apresenta uma matematização da teoria eletrostática de J. Euler.³⁵

Começaremos este capítulo apresentando a teoria etérea de J. Euler e, em seguida, explicitaremos nosso recorte histórico, afirmando a importância dos desenvolvimentos da hidrodinâmica na época para a matematização que vemos no *Recherches*. Depois, mostraremos como ele matematiza sua teoria, construindo equações para a dinâmica do éter, unindo mecanicismo e matematização em suas explicações para o fenômeno da atração elétrica. Concluímos que a concepção inferencial mostrada no capítulo 2 não capta a dimensão mecanicista das explicações de J. Euler, apesar de conseguir explicitar a construção de suas equações. Ao final, defenderemos que a matematização presente no *Recherches* se constitui em um *estilo* de matematização mecanicista, pois suas explicações são guiadas pelo mecanicismo de sua teoria, e a matemática serve apenas como apoio. Enquadraremos esse estilo dentro de um projeto de matematização que se torna influente com o advento de teorias etéreas para a óptica e o eletromagnetismo nos séculos XIX e XX.

3.1 A base física dos trabalhos sobre eletricidade de Johann Euler

Johann Albrecht Euler (1734-1800), nascido em São Petersburgo, Império Russo, era o filho mais velho do matemático Leonhard Euler (1707-1783). Johann Euler foi um acadêmico bem relacionado da segunda metade do século XVIII (49-50), vivendo em Berlim de 1741 até 1766. Depois, foi nomeado professor de física na Academia Imperial de Ciências e Artes (Императорская Академия наук и художеств, no original), em São Petersburgo, e, a partir de 1769, tornou-se secretário de conferências e, portanto, responsável por suas correspondências. (50, p. 195)

³⁵ O *Recherches* encontra-se traduzido e comentado do original, em francês, para o português no apêndice A da presente tese.

Ele escreveu dois trabalhos sobre eletricidade. O primeiro, intitulado “Uma dissertação das causas físicas da eletricidade”³⁶, foi enviado à Academia russa no final de 1754 por seu pai no contexto de uma competição sobre os fenômenos elétricos por ela organizada³⁷. Há trabalhos historiográficos que questionaram a autoria de Johann Euler nesses dois trabalhos, atribuindo-os a Leonhard Euler. Porém, o historiador Roderick W. Home resume esses questionamentos e apresenta uma defesa bastante convincente baseada em cartas de Johan C. Wilcke e Franz U. T. Aepinus a favor da autoria de Johann A. Euler nos dois trabalhos. (51)

Se consultarmos as cartas originais, podemos ver que, em setembro de 1755, Gerhard Friedrich Müller (1705-1783) anunciou a Leonhard Euler que o trabalho sobre as causas da eletricidade por ele enviado havia sido o vencedor. O nome do autor permanecia até então em segredo. Müller pediu a L. Euler que o nome fosse revelado em uma carta datada de 9 de setembro de 1755. (52, p. 91-92) Ao agradecer Müller pela comunicação, Leonhard Euler escreve que

as qualidades do poder elétrico (...), levaram-me a essas ideias, mas como eu não sabia se teria permissão para concorrer ao prêmio, eu as passei ao meu filho Joh[ann] Albrecht, e deixei que ele elaborasse o livreto sobredito (...). (52, p. 92)

Essa citação deixa claro que o autor do trabalho submetido na competição não era Leonhard Euler, mas sim seu filho. É provável – e razoável de se esperar – que Leonhard Euler tivesse influenciado a teoria sustentada pelo filho, mas não há indícios de que ele tenha escrito os trabalhos de Johann Euler sobre eletricidade.

Neste primeiro trabalho, escrito em 1754 e publicado em 1757, Johann Euler propõe uma teoria baseada no éter para explicar a eletricidade, sob clara influência de seu pai, que defendia que o éter era a causa mecânica da gravidade e da luz. Johann Euler atribui ao éter uma rarefação e um alto grau de elasticidade, pois, segundo ele, essas propriedades emergiam dos estudos sobre a natureza da luz. (19, p. 68-73)

A eletrização é interpretada como a expulsão de uma quantidade de éter dos poros de um corpo, o estado elétrico positivo ou negativo depende da relação entre a elasticidade do éter no corpo e no ar ao redor. Se um corpo com poros livres e eletricamente neutro toca um já eletrizado, a eletrização é destruída, pois o primeiro funciona como um escape para o éter preso no segundo. Caso esse corpo apenas se aproxime do eletrizado, sem tocá-lo, o éter

³⁶ No original: *Disquisitio de Causa Physica Electricitatis*.

³⁷ O texto foi enviado seis meses após a morte de Georg Wilhelm Richmann (1711-1753) sendo, muito provavelmente, em sua homenagem. Richmann morreu em uma tempestade em decorrência de um choque elétrico enquanto fazia experimentos elétricos que envolviam o estudo de raios. (3, p. 390-392)

acabará sendo agitado devido ao efeito do éter presente no ar, podendo resultar em faíscas, ou até mesmo fogo, dependendo do grau de agitação do éter. (19, p. 68-73)

Algumas definições do primeiro trabalho de Johann Euler aparecem no segundo, o *Recherches Sur la Cause Physique de l'Electricité*. Por exemplo, sobre os tipos de corpos. Os corpos elétricos *per se*, ou seja, os corpos que podiam ser eletrizados por atrito, tinham seus poros mais estreitos. Também havia os não-elétricos (ou não-elétricos *per se*) que não podiam ser eletrizados por atrito, pois possuíam poros menos estreitos, mais livres para a movimentação do éter³⁸.

Johann Euler descreve o “princípio” que rege sua teoria neste segundo trabalho: “Que os fenômenos da eletricidade são causados pela força elástica do éter quando esse fluido não está em equilíbrio dentro dos corpos vizinhos”. (53, p. 126) Segundo o autor, o éter é uma matéria que permeia todos os corpos. Benjamin Franklin havia proposto a existência de um fluido elétrico, mas para Johann Euler isso não passava de outro nome para o éter, cuja existência não poderia ser posta em dúvida. (53, p. 127)

Afastando-se da concepção de Benjamin Franklin, J. Euler afirma que não é possível conceber a matéria elétrica como uma atmosfera que envolve os corpos, já que “tanto a violência, quanto a rapidez, parecem, em primeira análise, destruir a ideia de uma atmosfera, em qualquer agitação que se queira concebê-la”. (53, p. 128)

Em várias passagens de seu trabalho, Johann Euler critica a teoria de um único fluido elétrico de Franklin. Por exemplo, em seu primeiro trabalho sobre eletricidade, Euler havia afirmado que não existiam dois estados elétricos, diferentemente do que afirmavam muitos autores na época, entre eles Franklin. J. Euler acreditava na existência de apenas um estado elétrico que se manifestaria de duas formas. O suposto segundo estado elétrico seria, para Johann Euler, uma ilusão, pois as eletricidades vítrea e resinosa, dois conceitos propostos por Dufay dos anos de 1730, são características únicas dos corpos; logo, só havia uma eletricidade, isto é, um estado elétrico. No seu segundo trabalho sobre eletricidade, J. Euler passou a aceitar a existência de dois estados elétricos distintos por influência de Franz Aepinus, um adepto da teoria de um fluido elétrico de Franklin e da ação à distância que estudaremos no capítulo 4.

³⁸ Os metais só foram eletrizados por atritos em 1778 e, depois, em 1780 por, respectivamente, Joseph von Herbert (54, p. 15-16) e Hemmer. (55) Apesar da eletrização dos metais por atrito ter afetado profundamente a divisão comum à época entre elétricos *per se* e não-elétricos, já existia certa insatisfação com essa divisão, como pode ser visto na carta de Benjamin Franklin para Cadwallader Colden (1688-1776) de 23 de abril de 1752. (56)

Apesar de Johann Euler discordar de Franklin em vários pontos³⁹, ele mantém alguns de seus conceitos. Entre eles, o de estado natural, no qual o éter

enclausurado dentro dos poros dos corpos fosse, em todo canto, dotado do mesmo grau de elasticidade, ele se encontraria em um perfeito equilíbrio, e não faria nenhum esforço de sair de um [corpo] para entrar em um outro (...). (53, p. 132)

Assim, são necessárias duas condições para que um corpo se eletrize. A primeira é a de que

o éter enclausurado em diferentes corpos se encontre em diferentes graus de elasticidade, e a outra [condição] é que os poros dos corpos que contêm o éter não sejam, nem completamente abertos, nem completamente bloqueados. (53, p. 133)

3.2 As origens da matematização em Johann Euler

Ao longo do século XVIII, teorias físicas passaram a ser mais e mais matematizadas, na esteira dos estudos de Isaac Newton (1642-1727) em mecânica. (31) A história da matematização da física é complexa, mas podemos tomar como ponto de partida os trabalhos de Newton, pelo menos no que diz respeito ao século XVIII. Eles são um excelente exemplo de uma matematização (na forma geométrica) da mecânica, pois demonstravam, com o uso da ação à distância e da geometria, os fatos observados (e a serem observados) pelos filósofos da época. (58) A geometria era, na época, o principal alicerce da matemática. (59)

Como alertamos na seção 2.1, é enganoso interpretar Newton como alguém que rejeitou as pesquisas utilizando explicações mecanicistas para a gravidade, como teorias etéreas. O entendimento de Newton era, grosso modo, de que, apesar de uma teoria mecanicista para a gravidade ser desejável, ela seria muito difícil (talvez impossível) e, portanto, a ação à distância seria uma abordagem possível e útil de ser postulada. (33, p. 80-89) Os pesquisadores sobre eletricidade que adotavam uma perspectiva newtoniana também abandonaram explicações baseadas em éter ou em fluído elétrico e adotaram a ação à distância para explicar os fenômenos elétricos, entre eles Aepinus e Coulomb, que veremos nos dois próximos capítulos.

Com o avanço do cálculo e do conceito matemático de função, a matematização da mecânica tornou-se mais algébrica. Essa mudança foi influenciada por diversos autores; entre eles encontramos o matemático Leonhard Euler, que escreveu diversos trabalhos sobre

³⁹ Um dos pontos era a definição de estados elétrico positivo e negativo. Após estudar a eletrização do enxofre via aquecimento e resfriamento, Johann Euler inverte a definição de Franklin; isto é, o que Franklin chama de positivo, J. Euler chama de negativo, e vice-versa. (57, p. 7-8)

mecânica entre 1736 e 1782, além de trabalhos em cálculo entre 1727 e 1770. (60, p. 101-194; 61-62) A mecânica passa, assim, para uma matematização mais algébrica. Um estágio avançado desse processo pode ser visto no *Mechanique Analytique* de Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), publicado em 1788. Nele, não há uso da geometria, apesar de se tratar de um estudo matematizado sobre mecânica. (63)

Além disso, o próprio cálculo infinitesimal sofria mudanças conceituais. O infinitésimo era, para Newton, uma entidade geométrica. Seu cálculo infinitesimal era uma geometria infinitesimal. Mas, em Leonhard Euler, o infinitésimo era pensado como uma quantidade, de valor indeterminado e infinitamente pequena, na qual valiam as regras da aritmética. Com isso, o cálculo infinitesimal ganhou uma estrutura mais algébrica, afastando-se pouco a pouco da geometria. (60, p. 195-220)

Esse processo de matematização algébrica se estendeu para áreas correlatas à mecânica, como a hidrodinâmica. Nos principais trabalhos de Leonhard Euler sobre esse assunto, entre 1755 e 1757, é possível observar a aplicação da mecânica newtoniana (como L. Euler a entendia e descrevia) aos elementos infinitesimais que compõem um fluido. A criação de uma base para a ciência hidrodinâmica passou pela simbiose entre análise matemática, princípios dinâmicos e articulações de conceitos físicos (como a pressão interna). (64)

Junto com o desenvolvimento do cálculo e da hidrodinâmica, foi possível construir teorias etéreas matematizadas para a eletricidade tratando o éter como um fluido, dotado de características típicas de um fluido na concepção da época, como densidade, velocidade e elasticidade⁴⁰. Dessa forma, vemos um movimento que parte de uma matematização geométrica para uma algébrica ao longo do século XVIII sendo aproveitado e reaproveitado em várias áreas da filosofia natural. É nesse contexto que a obra de Johann Euler está circunscrita.

J. Euler produz, em seu segundo trabalho sobre eletricidade, equações para o movimento do éter no contexto da eletricidade, constituindo uma matematização deste. Por mais que seu trabalho não tenha ganhado visibilidade na época, a abordagem utilizada pode ter influenciado os estudos posteriores sobre o éter eletromagnético. Ademais, ela mostra um processo de adaptação da hidrodinâmica – já robusta – na eletricidade.

Após os comentários iniciais no *Recherches Sur la Cause Physique de l'Electricité*, no vigésimo parágrafo, Johann Euler começa a utilizar o cálculo para obter resultados teóricos

⁴⁰ O conceito de elasticidade do fluido em Johann Euler assemelha-se ao nosso conceito de pressão dentro de um fluido, o que está alinhado com os trabalhos de Leonhard Euler sobre fluidos compressíveis. Mas, em alguns trechos do *Recherches*, o uso da elasticidade nos remete aos conceitos atuais de densidade de corrente (ou fluxo), aplicados ao éter. (60, p. 8-9)

sobre a eletricidade, mesmo que em casos idealizados. Veremos, portanto, Johann Euler construindo equações a partir de hipóteses sobre o éter, usando, para isso, a estrutura do cálculo diferencial para modelar alguns exemplos particulares de aplicação de sua teoria. Vale ressaltar que suas explicações ainda tinham um aspecto fenomenológico, onde observações empíricas são centrais, mas sua teoria possuía conteúdos teóricos matematizados, o que era bastante inovador para a eletrostática da época.

Como dito acima, havia estudos matematizados e robustos na hidrodinâmica, mas ainda não havia uma teoria etérea matematizada para a eletricidade, ao menos não com a formulação de equações gerais, com talvez a exceção de Paolo Frisi (1728-1784) que usou brevemente cálculos matemáticos em seu trabalho sobre a eletricidade, também baseado na existência de um éter. (65) O trabalho de Frisi competiu pelo prêmio da Academia Imperial de Ciências e Artes, em São Petersburgo, na mesma competição que Johann Euler acabou vencendo. (3, p. 395-396) Isso ilustra que tentativas de matematizar os fenômenos elétricos em uma abordagem mecanicista era uma tendência na época, constituindo-se em uma abordagem alternativa às abordagens baseadas em ação à distância, como as de Aepinus e, posteriormente, Coulomb.

3.3 A hidrodinâmica do éter, segundo Johann Euler

Figura 3.1 - Uma versão adaptada da primeira figura do trabalho de Johann Euler de 1759. Nele, Johann ilustra um poro de um corpo como um canal, sendo o éter um fluido atravessando-o. Na imagem os 'A', 'B', 'P' e 'M' mais à direita deveriam estar com uma apóstrofe cada, senão a construção matemática de Johann não faria sentido. Esse erro tipográfico se encontra na imagem original. Aqui apresentamos a imagem corrigida.

Fonte: Adaptada de EULER. (53)

Johann Euler utiliza diversas grandezas comuns à hidrodinâmica, aplicando-as ao éter, já que seu caráter ontológico era o de um fluido. Por exemplo, ao estudar o movimento do éter dentro de um poro de um corpo qualquer – o canal ABCD da figura (3.1) – ele considera a densidade do éter em AB como π e em PM como φ . Johann estabelece, então, uma relação de proporção direta entre densidade e elasticidade; isto é, quando a densidade é unitária, a elasticidade vale n . Então, a elasticidade em AB vale $n\pi$, e em PM, $n\varphi$. A velocidade em AB é igual a ω , e em PM, γ . Além disso, a área da secção transversal em AB é f^2 e a da secção PM, y^2 . Considerando o movimento de uma quantidade de éter em ABPM para A'B'P'M' depois de transcorrido um tempo dt , Johann Euler constrói a seguinte equação para representar a variação de éter num trecho de um poro do corpo eletrizável em questão:

$$f^2\pi\omega - y^2\varphi\gamma = \int y^2 dx \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right). \quad (3.3.1)$$

Em seguida, considera a força exercida pela diferença de elasticidade no éter enclausurado no trecho PM pm , isso dá a ele a força motriz de valor, em notação moderna, igual a $-nyydx\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)$. Com isso, Johann calcula a aceleração e, sabendo que o aumento da velocidade $dt\left(\frac{\partial \gamma}{\partial t}\right) + \gamma dt\left(\frac{\partial \gamma}{\partial x}\right)$, deve ser igual ao produto da aceleração pelo tempo dt , Euler obtém a segunda equação, a saber:

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial t}\right) + \gamma \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x}\right) = -\frac{n}{\varphi} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right). \quad (3.3.2)$$

Assim, com as equações acima, Johann Euler constrói uma dinâmica do éter com um sistema de equações regendo o movimento do éter nos poros dos corpos que, a princípio, descreveriam qualquer fenômeno elétrico. Porém, “as fronteiras da Análise nos param aqui prontamente, e não poderíamos resolver, de maneira generalizada, as duas equações que acabamos de encontrar”. (53, p. 139) Não conseguindo resolvê-las em um caso genérico, ele se vale de aproximações; resolvendo-as então para o caso específico no qual a densidade e velocidade em uma secção transversal não variam no tempo, isto é, encontra uma solução estacionária.

Notemos que a insolubilidade das equações gerais pode ser contestada, já que esse sistema pode ser resolvido utilizando-se algumas integrações⁴¹:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial x} + \varphi(x, t) \left[\frac{1}{n} \left(\frac{\partial \gamma(x, t)}{\partial t} + \gamma(x, t) \frac{\partial \gamma(x, t)}{\partial x} \right) \right] = 0 \\ \int y^2(x) \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t} dx + \varphi(x, t) (\gamma(x, t) y^2(x)) = \pi(x, t) \omega(x, t) f^2(x). \end{cases} \quad (3.3.3)$$

Usando três funções aqui definidas como $g(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{n} \left(\frac{\partial \gamma(x, t)}{\partial t} + \gamma(x, t) \frac{\partial \gamma(x, t)}{\partial x} \right)$, $F(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} \gamma(x, t) y^2(x)$ e $H(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} \pi(x, t) \omega(x, t) f^2(x)$, o sistema se torna mais simples e temos:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial x} + \varphi(x, t) g(x, t) = 0 \\ \int y^2(x) \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t} dx + F(x, t) \varphi(x, t) = H(x, t). \end{cases} \quad (3.3.4)$$

Podemos integrar a primeira equação do sistema acima, assim:

$$\varphi(x, t) = C_1(t) e^{-\int g(x, t) dx}. \quad (3.3.5)$$

Onde $C_1(t)$ é uma função arbitrária. Podemos também derivar a segunda equação para removermos a integral em x . Depois, usando duas novas funções aqui definidas como $p(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{y^2(x)} \left[\frac{\partial F(x, t)}{\partial x} - F(x, t) g(x, t) \right]$ e $h(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{y^2(x)} \frac{\partial H(x, t)}{\partial x}$, teremos:

$$\frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t} + p(x, t) \varphi(x, t) = h(x, t). \quad (3.3.6)$$

A equação acima também pode ser resolvida com uma integração:

$$\varphi(x, t) = e^{-\int p(x, t) dt} \left(\int h(x, t) e^{\int p(x, t) dt} dt + C_2(x) \right). \quad (3.3.7)$$

⁴¹ Aqui optamos por usar a notação moderna por questão de clareza, mas a notação da época difere pouco e poderia ser usada sem grandes dificuldades.

Onde $C_2(x)$ é uma função arbitrária. Porém, como as duas soluções são soluções para a mesma função $\varphi(x, t)$, temos necessariamente uma relação entre as duas funções arbitrárias. Essa relação pode ser simplificada e resulta na seguinte expressão:

$$C_2(x) = C_1(t)e^{-\int g(x,t)dx}e^{-\int p(x,t)dx} - \int h(x, t)e^{\int p(x,t)dx}dt. \quad (3.3.8)$$

Com isso, se as duas funções arbitrárias obedecerem a relação deduzida, teremos ao menos uma solução para o sistema proposto por Johann Euler. Essa técnica de integração para resolver equações diferenciais já existia, tendo sido usada por Leonhard Euler, além de outros matemáticos e filósofos naturais da época. (66)

O próprio Leonhard Euler foi bastante decisivo para o estudo de equações diferenciais, valendo-se de várias técnicas usadas até hoje para resolvê-las. (67) É claro que é muito difícil saber se essas equações estavam no escopo do que podia ser resolvido na época. Se fossem passíveis de serem resolvidas, fica a questão de porquê Johann Euler não o ter feito, e por que ele parece seguro ao afirmar que não há possibilidade de solução generalizada. Talvez elas fossem muito complicadas para a época de fato. De qualquer maneira, seu pai (ou algum dos Bernoulli) poderiam tê-lo ajudado a resolvê-las. Vale lembrar que algumas das principais obras sobre equações diferenciais, como o *Methodus incrementorum* (Métodos de incrementação, em português) de Brook Taylor (1685-1731) já haviam sido publicadas (nesse caso, em 1715). Mas, o *Calculi Integralis* (Cálculo Integral, em português) de Leonhard Euler não, sendo publicado apenas em 1768⁴². Logo, não podemos fixar claramente se essas equações eram – ou não – de fácil resolução no final dos anos 1750.

De qualquer modo, Johann Euler consegue resolver suas equações gerais apenas para um caso simplificado – quando as derivadas parciais no tempo zeram, obtendo das equações (3.3.1) e (3.3.2) que

$$\varphi = \pi(e^{(\omega^2 - \gamma^2)/2n}). \quad (3.3.9)$$

Essa solução pode ser simplificada para

⁴² Apesar disso, Leonhard Euler já estava estudando esse assunto há algum tempo. Sua *Methodus inveniendi líneas curvas maximi minive proprietate gaudentes* (Métodos para encontrar linhas curvas usando propriedades de máximo ou mínimo), um estudo de variações para calcular máximos e mínimos, foi publicado em 1744. (67)

$$\varphi = \pi(1 + (\omega^2 - \gamma^2)/2n) \quad (3.3.10)$$

por expansão em Taylor, que já era usada desde 1715 (68, p. 613-616), mas Johann Euler continua simplificando. A equação (3.3.1) torna-se $f^2\pi\omega = y^2\varphi\gamma$ com o zeramento das derivadas no tempo. Assumindo que as densidades, π e φ , não variam ao longo do tubo e, portanto, podem ser canceladas, temos então a expressão $f^2\omega = y^2\gamma$. Dessa forma, o resultado da equação (3.3.10) é:

$$\varphi = \pi \left(1 - \frac{\omega^2}{2ny^4} (f^4 - y^4) \right). \quad (3.3.11)$$

Assim, na região em que a área da secção transversal é maior, f^2 , por exemplo (secção AB), a elasticidade também é maior; no caso, $n\pi$, em relação a outra secção, como, por exemplo, PM. Essa solução (3.3.11), uma aproximação, só foi possível admitindo que a densidade do éter não varia⁴³ ao longo do tubo ABCD.

Com essas equações, J. Euler de fato matematiza a dinâmica do éter para os fenômenos elétricos. Assim, tem-se uma teoria matematizada para o éter no século XVIII, baseada no estilo de matematização, algébrica, já presente em trabalhos sobre hidrodinâmica da época. Resta analisar como essa matematização é empregada por Johann Euler. Para isso, passamos para a próxima seção, onde ele explica a atração elétrica.

3.4 A atração elétrica, por Johann Euler

Johann Euler utiliza os resultados matemáticos obtidos anteriormente para analisar o caso da atração elétrica. Com a solução (3.3.9), vê-se que onde a velocidade ω é maior, a elasticidade $n\pi$ será menor, e vice-versa. Essa relação quantitativa explica a atração entre

⁴³ Nesse caso, em termos modernos, o fluido é incompressível. Se mantivermos a compressibilidade do fluido, basta aplicar $f^2\pi\omega = y^2\varphi\gamma$ na solução $\varphi = \pi(1 + (\omega^2 - \gamma^2)/2n)$ e teremos $\frac{\varphi}{\pi} = 1 + \frac{1}{2n} \left(\frac{y^4}{f^4} \frac{\varphi}{\pi} - 1 \right) \gamma^2$. A expressão pode ser colocada da seguinte forma $\left(\frac{\varphi}{\pi} \right)^2 \left(\frac{\gamma^2}{2n} \left(\frac{y}{f} \right)^4 \right) - \frac{\varphi}{\pi} + \left(1 - \frac{\gamma^2}{2n} \right) = 0$. A equação algébrica acima é resolvida para a fração φ/π por Bháskara, mas não resulta em uma expressão tão compacta e clara quanto a de Johann Euler e, assim, acaba não sendo útil. Se a densidade não varia ao longo do tubo, então a elasticidade, que é n (uma constante) vezes a densidade, também não varia. Isso impõe uma aparente inconsistência no trabalho de Johann Euler, pois, para ele, os fenômenos elétricos ocorrem devido às diferenças de elasticidade no éter em diferentes lugares. Felizmente, a equação (3.3.9), usada para explicar a atração e repulsão, independe dessa aproximação para a elasticidade.

corpos de maneira não muito diferente do que proposto em seu primeiro trabalho; um corpo sempre é puxado em direção ao local onde a elasticidade do éter é menor. Mas, em seu segundo trabalho, diferentemente do primeiro, ele pôde se apoiar em deduções matemáticas utilizando um formalismo matemático. Assim, Johann Euler afirma:

ora, ainda que essa equação só aconteça quando o movimento do éter se tornou permanente, o que nunca acontece, as conclusões que acabo de tirar acontecerão também quando o movimento já se aproxima de um estado de permanência, e poderemos até vê-las como gerais e aplicar desde os primeiros instantes do movimento, contanto que nos contenhemos com os enunciados gerais, sem determinar a proporção das elasticidades em relação às velocidades diferentes. Também é fácil de se convencer dessas conclusões grosso modo, pois, já que a elasticidade do éter faz esforço para pôr o corpo em movimento, assim que ela consegue produzir seu efeito, já que uma parte dos esforços é aí empregada, é necessário que a elasticidade seja aí diminuída, de modo que quanto maior for a velocidade, tanto menor deve ser a elasticidade. (53, p. 139-140)

Para explicar os detalhes acerca da atração elétrica, J. Euler utiliza a seguinte imagem:

Figura 3.2 – Dois corpos, A e B, são apresentados na imagem acima, feita por Johann Albrecht Euler. O corpo A se encontra eletrizado e B, não. O espaço mais curto entre eles é chamado de C e seus pontos de superfície mais próximos um do outro são a e b.

Fonte: EULER. (53)

Johann Euler descreve a atração proveniente do caso da figura 3.2 da seguinte forma:

Seja inicialmente apenas o corpo A eletrizado, e que a elasticidade do éter seja maior do que no ar, ou ainda que sua eletricidade seja positiva, e no outro corpo B suponho a elasticidade [de seu éter] igual à [elasticidade do éter] do ar [*i.e.*, B está no estado natural]. Primeiramente o éter escapará do corpo A e se insinuará no ar em volta, que, adquirindo mais éter se tornará eletrizado, caso esse aumento não seja logo dissipado pelo ar mais afastado. Entretanto, o ar que circunda o corpo A, recebendo incessantemente as emanações do éter, conterà mais éter do que exige seu estado natural, e formará com isso em volta do corpo A uma espécie de atmosfera elétrica. Agora, se o corpo B recebesse o éter tão dificilmente quanto o ar, ele não mudaria nada no estado do corpo A; mas tirando da atmosfera um pouco de éter, ele se tornará, ainda que pouco, positivamente eletrizado. Ora, se o corpo B tem seus poros mais abertos para receber facilmente o éter que flui do corpo A para ele pelo espaço C, o movimento do éter, encontrando menos obstáculos para se espalhar por esse espaço C, será ali acelerado, e assim sua elasticidade diminuirá, como foi provado acima. (53, p. 142)

Ou seja: o éter preso em A eventualmente é recebido por B através do ar. Como o espaço C tem menos poros, por ser mais curto, e assim o éter flui ali mais rapidamente. Como a velocidade é maior, seguindo a (3.3.9), temos uma elasticidade menor. Assim, J. Euler prossegue:

Então, o corpo A sendo mais pressionado pelo éter por todos os lados do que na direção C, ele será empurrado em direção ao corpo B e reciprocamente o corpo B, em torno do qual o éter está em repouso, excetuando o espaço C, será também menos pressionado nesse ponto e, partindo disso, empurrado na direção do corpo A de forma que esses dois corpos parecerão se atrair mutuamente. Essa atração será tanto maior quanto mais poros abertos o corpo B tiver, já que essa circunstância serve para aumentar o movimento dentro do espaço C. Mas então o próprio corpo B se tornando pouco a pouco eletrizado, e também positivamente eletrizado, os fenômenos que resultarão depois não pertencem mais ao caso que aqui examino. De resto, vê-se que quanto mais próximos os dois corpos A e B estão, maior se tornará a agitação do éter no intervalo C. Quando ela aumenta ao ponto de excitar um movimento de vibração, ver-se-á uma luz entre os dois corpos e, já que o ar participa ao mesmo tempo dessa agitação, essa luz será acompanhada de um assobio; a comunicação do éter se fazendo então muito prontamente, o equilíbrio será logo restabelecido e, com isso, a eletricidade será extinta. (53, p. 143)

Em conclusão, a elasticidade funciona semelhantemente ao conceito atual de pressão interna e, assim, sua diferença entre lugares diferentes gera uma força que se encontra no sentido de b para a (e vice-versa). Ao final, os corpos A e B acabam se aproximando devido a essa força.

Como podemos ver, as explicações para esse caso são mais mecanicistas. A solução matemática é citada e usada apenas para embasar, secundariamente, seu raciocínio mecanicista. Ou seja, a solução matemática é um reforço ao cerne da explicação. Logo, o central para a explicação é o raciocínio mecanicista, funcionando como uma engrenagem, no qual o éter pressionado sai de um corpo e se move pelo ar em diferentes trajetórias com diferentes velocidades. Como uma diferença nessas velocidades gera uma diferença de elasticidade (pressão interna), o éter presente nas vizinhanças dos dois corpos os empurra, gerando um movimento. A matematização presente na dedução da equação (3.3.9) é um apoio a esse raciocínio.

Finalmente, vemos aqui que as explicações interagem e se apoiam em dois polos – o da matematização e o do mecanicismo. O caso de J. Euler mostra que uma explicação pode se aproximar de um polo e se afastar do outro em maior ou menor grau. Em geral, as explicações para os fenômenos elétricos no *Recherches* são mais mecanicistas; porém, isso não significa que esses dois polos interagem antagonicamente. Pelo contrário, o mecanicismo e a matematização se reforçam em Johann Euler. Assim, mesmo que ainda incipientes, seus cálculos embasam a construção mecânica para o funcionamento do éter.

Com isso, identificamos em J. Euler um *estilo* de matematização singular. Em resumo, vemos nele que argumentações e raciocínios mecanicistas conduzem as explicações de sua teoria, o uso de equações e cálculos acaba sendo secundário. Veremos como a concepção inferencial se encaixa nas deduções matemáticas de J. Euler na seção 3.6.

3.5 A repercussão dos trabalhos de Johann Euler

Como apontamos ao longo deste capítulo, as obras de Johann Euler trazem uma nova forma de encarar os fenômenos eletrostáticos básicos ao apresentarem uma interpretação mecânica detalhada apoiada em conceitos hidrodinâmicos e por trazerem uma abordagem matemática para eles. Apesar da sua originalidade, os trabalhos receberam pouca atenção na época. Isso pode ser atribuído aos fatos de não terem se aprofundado no fenômeno da garrafa de Leiden, que passou a ser central para os estudos elétricos a partir de 1746; e pela rede de contatos de J. Euler.

Johann Euler estava afastado dos dois principais círculos acadêmicos que estudavam eletricidade da época – Londres e Paris – e, assim, teria dificuldades para circular suas ideias. Dessa forma, filósofos naturais como Nollet, Sigaud de la Fond (1730-1810), Coulomb, John Canton (1718-1772) e Benjamin Wilson (1721-1788) provavelmente teriam dificuldade em encontrar cópias de seu trabalho. A título de exemplo, apenas o primeiro trabalho de Johann Euler, escrito em 1754, é citado por Joseph Priestley (1733-1804) em seu famoso *The History and Present State of Electricity*, na seção de catálogos de obras sobre o assunto no final do livro. Priestley coloca um asterisco nos trabalhos que usou para escrever seu livro, como os de Franklin, Nollet e Aepinus, mas não há asterisco no de Johann Euler. (69, p. iii)

Dessa forma, tanto a teoria de Johann Euler para a eletricidade quanto a matematização nela presente (meanicista) não repercutem no século XVIII, que fora marcado por outras teorias e estilos de matematização. Nos capítulos 4 e 5 veremos os estilos de Aepinus e Coulomb, que foram mais predominantes nessa época e no começo do século XIX. Apenas depois dos desenvolvimentos do eletromagnetismo de James Clerk Maxwell (1831-1879) na segunda metade do século XIX, que envolviam um éter através do qual a luz se propagava, a preocupação com o mecanicismo e a matematização orientada pela hidrodinâmica (e sólidos elásticos) voltarão à cena. (70) Mas, mesmo nesse caso, a influência de Johann Euler parece nula. Voltaremos a esse assunto na seção abaixo (e no capítulo 6).

3.6 Conclusões

Nos anos de 1750, Johann Euler estudou sobre os fenômenos elétricos, construindo uma teoria etérea que os explicasse. Como vimos, essa teoria teve influência de seu pai, Leonhard Euler. Nela, Johann Euler usa o aparato do cálculo, que se tornava mais algébrico, e da hidrodinâmica, que estava sendo matematizada na época, para produzir equações gerais para a dinâmica do éter. Dessa forma, a teoria etérea de J. Euler mostra uma alternativa matematizada na época para o newtonianismo da ação à distância.

Contudo, ele não conseguiu resolver suas equações no caso geral, resolvendo-as apenas para um caso simplificado. A solução que ele obteve foi usada na explicação da atração elétrica entre dois corpos. Mas, como vimos, ela não foi central àquela explicação, que era mais centrada em uma argumentação mecanicista, descrevendo o movimento do éter e seus efeitos sobre os corpos para explicar o fenômeno em questão.

Com isso, observamos que a relação matematização-mecanicismo funciona como dois polos para as explicações de J. Euler para fenômenos eletrostáticos. No caso de J. Euler, suas explicações são guiadas pelo mecanicismo de sua teoria. Porém, há matematização em seu trabalho. Assim, os dois polos interagem construtivamente para explicar a atração elétrica, com uma importância maior ao polo mecanicista da explicação. Veremos uma interação antagonica entre esses polos no capítulo 5, quando discutiremos a matematização em Coulomb.

A construção das equações de J. Euler apresentadas na seção 3.3 se encaixa com a concepção inferencial apresentada na seção 2.3. Considerações hidrodinâmicas e mecânicas embasam a construção, via uma etapa de imersão, das equações (3.3.1) e (3.3.2). Com simplificações matemáticas, temos uma etapa de derivação na qual elas são resolvidas simultaneamente, resultando em uma interpretação que relaciona dois conceitos de sua teoria – onde a velocidade do éter é maior, sua elasticidade será menor.

Porém, como argumentamos, a explicação da atração elétrica é guiada pelo mecanicismo de sua teoria, não pela matematização. O *estilo* de matematização de J. Euler coloca o mecanicismo à frente das explicações mais matemáticas. Como esse aspecto de suas explicações não é circunscrito pela concepção inferencial, podemos ver que esse referencial teórico, apesar de razoável para avaliar a aplicação da matemática, não é suficiente para analisar um processo de matematização, historicamente. Ele não consegue lidar com certos

estilos de matematização, com características que vão além do puro uso da matemática em explicações, como o caso do *Recherches* de Johann Euler.

No começo do século XIX, teorias etéreas para a óptica começaram a se tornar comuns, ocupando o espaço das teorias corpusculares, mais comuns no século XVIII. Após a metade do século XIX, elas também se tornaram comuns no eletromagnetismo, graças a Michael Faraday (1791-1867), Maxwell e Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894). (70) Essas teorias eram matematizadas. Estudar cada estilo de matematização nesse caso foge do objetivo desta tese, porém eles podem ser abarcados por um novo conceito de *projeto epistêmico* de matematização. Um projeto epistêmico de matematização é, como definimos na seção 2.4, um conjunto de estilos de matematização com características em comum. Esses estilos não precisam ser completamente iguais, mas devem apresentar similaridades.

Assim, no século XIX e começo do XX, um projeto de matematização para física surgira, no qual as teorias lidavam com interações como mediadas por um meio, o éter. Nesse caso, a matematização era orientada pela hidrodinâmica e o estudo de sólidos elásticos. Com isso, apesar de não parecer que exista uma relação explícita e direta entre os trabalhos de J. Euler e as teorias etéreas eletromagnéticas do século XIX, podemos encaixar o estilo de matematização mecanicista de Johann Euler dentro de um projeto *hidrodinâmico* (de matematização) que surgiu e se desenvolveu um século depois do *Recherches* e que está na origem da Relatividade Especial. Veremos isso em detalhes no capítulo 6.

4 A matematização em Franz Ulrich Theodosius Aepinus

A matematização de uma teoria envolve os diversos papéis que a matemática assume na argumentação e na construção de pressupostos físicos e experimentos. Veremos ao longo deste capítulo como a matemática interage com e influencia os pressupostos físicos e a elaboração de experimentos por Franz Ulrich Theodosius Aepinus, além de seus limites na resolução de contradições. Ademais, discutiremos a relação matemática-teoria-experimento como um triângulo de influências mútuas.

Nossa principal fonte neste capítulo é o próprio livro *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi* (doravante chamado de *Tentamen*), publicado em 1759; traduzido do original, em latim, para o inglês por Peter James Connor e Roderick Weir Home.⁴⁴ Como nosso objetivo é estudar a matematização dos estudos elétricos, não daremos atenção aqui à analogia entre eletricidade e magnetismo e à teoria do fluido magnético presentes no *Tentamen*.

4.1 A base da teoria eletrostática de Aepinus

Na introdução do *Tentamen*, nota-se a influência newtoniana na obra de Aepinus. Ele afirma que não “estudará a causa das forças primitivas [elétrica e magnética] da atração e repulsão”; deixará essas questões àqueles que se sentirem “felizes em passar o tempo em investigações desse tipo”. (19, p. 240) Para isso, apoia-se na autoridade de Isaac Newton e em seu trabalho sobre gravitação, no qual: “ele [Newton] demonstrou como o movimento dos corpos celestes dependem da gravitação universal, mas sem gastar energia em mostrar a causa dessa gravidade universal”. (19, p. 240) Todavia, Aepinus toma uma posição filosoficamente menos comprometida ao afirmar que não acredita que as forças de atração e repulsão sejam inatas aos corpos. Além disso, afirma “não aprovar a doutrina que afirma a possibilidade de ação à distância”. Conclui declarando que:

progresso considerável pode ser feito na análise das operações da natureza pelos acadêmicos que reduzem fenômenos complicados à suas causas aproximadas e forças primitivas, apesar das causas dessas causas não terem sido detectadas ainda. (19, p. 240)

O primeiro capítulo do livro é intitulado “Princípios gerais da teoria da eletricidade e magnetismo”. No primeiro parágrafo, Aepinus expõe as bases da teoria de Franklin, na qual se apoia; a saber: 1) existência de um fluido sutil e elástico que produziria os fenômenos

⁴⁴ A referência usada envolve tanto a tradução do texto de Aepinus, o *Tentamen*, quanto uma introdução histórica e notas de rodapé que contextualizam a obra.

elétricos, e cujas partículas constituintes repelem-se mutuamente, mesmo quando bem separadas; 2) as partículas do fluido elétrico são atraídas pela matéria da qual todos os corpos eram feitos (por vezes chamada de matéria comum); 3) existência de corpos nos quais o fluido elétrico se move com facilidade dentro de seus poros, os corpos chamados não-elétricos. Há também os corpos nos quais o fluido se move com muita dificuldade, os chamados elétricos (ou elétrico *per se*)⁴⁵; 4) existência de dois tipos de fenômenos elétricos, os que ocorrem devido ao trânsito do fluido de um corpo ao outro, movendo-se de um corpo com excesso de fluido a um com deficiência. Nesta classe encontram-se fenômenos como as faíscas elétricas e a aparição de brilhos e luzes. Há também os fenômenos que ocorrem sem que o fluido elétrico se movimentasse, como a atração e a repulsão. (19, p. 241)

Em seguida, Aepinus trata da impermeabilidade do vidro ao fluido elétrico na teoria frankliniana. Como vimos na introdução desta tese, ela era essencial na explicação de Franklin para o choque da garrafa de Leiden. O vidro da garrafa tem um estado elétrico na superfície interna, o positivo, e outro na externa, o negativo, o que só é possível, segundo Franklin, devido a impermeabilidade do vidro. Para Aepinus, tal impermeabilidade é uma propriedade comum a todos os corpos elétricos, não apenas ao vidro. (19, p. 241-243) Como René-Just Haüy (1743-1822) resume, em seu livro *Exposition raisonnée de la théorie de l'électricité et du magnétisme, d'après les principes de M. Aepinus*, de 1787: “ele [Aepinus] estendeu essa propriedade [impermeabilidade] a todos os outros corpos *idio-elétricos* [grosso modo, isolantes]”.⁴⁶ (71, p. 2)

Mais à frente, o autor analisa o conceito de quantidade natural de fluido em um corpo, ilustrado pela figura abaixo.

⁴⁵ Grosso modo, os não-elétricos são o que chamamos hoje de condutores e os elétricos (ou elétricos *per se*), isolantes.

⁴⁶ Essa extensão feita por Aepinus foi aceita pelo próprio Benjamin Franklin. Isso pode visto em uma carta, presente na seguinte referência: (72).

Figura 4.1 – Um corpo A tem uma partícula de fluido B em sua superfície. O fluido de A repele B, enquanto sua matéria a atrai.

Fonte: Adaptada de AEPINUS. (19, p. 313)

Aepinus argumenta que a partícula B, encostada na superfície do corpo A, é repelida pelo fluido presente nos poros do corpo, mas atraída pela matéria da qual o corpo é constituído. Resume assim que “se nós assumirmos que essas forças são iguais é claro que não haverá nenhuma ação”. Para o autor, um excesso de fluido em A tornaria a repulsão mais forte que a atração e, assim, B “deve se mover rapidamente para longe e se separar do corpo A”. Esse processo de expulsão de partículas geraria, por sua vez, um fluxo de fluido para fora de A que cessaria apenas quando as forças repulsiva e atrativa se igualassem. Conforme Aepinus, esse fluxo podia ser impedido ou retardado por um agente externo que o obstruísse (em geral, o ar). Processo similar ocorreria se a força atrativa fosse maior que a repulsiva, porém, nesse caso, o fluxo de partículas de fluido elétrico seria para dentro do corpo A. (19, p. 244)

Com isso, Aepinus chega a duas conclusões:

- 1) Existe uma quantidade natural de fluido para o corpo A em que não havia fluxo para fora ou para dentro. Dessa forma, Aepinus define o conceito frankliniano de quantidade natural em termos das forças atrativa e repulsiva (19, p. 244-245); e
- 2) os corpos elétricos são os agentes externos capazes de manter o excesso (ou falta) de fluido de um corpo. Se o corpo A estivesse envolto em um corpo elétrico, como o ar (seco), a partícula B teria dificuldade em escapar. Se A fosse um corpo elétrico com uma deficiência de fluido, então as partículas ao redor teriam dificuldade em entrar no corpo. (19, p. 248)

A maneira como Aepinus define quantidade natural de fluido elétrico é parecida, porém não igual, à de Franklin. Em uma carta a Peter Collinson, datada de setembro de 1753, Franklin define a quantidade natural de fluido elétrico como aquela que os corpos contêm enquanto não apresentam sinais de eletrificação. (73) Não há, portanto, menção explícita ao conceito de força. Isso mostra que a influência newtoniana modifica o entendimento de

Aepinus sobre a teoria do fluido elétrico de Franklin, pois o estadunidense não utilizava o conceito de força à distância para analisar a atração e a repulsão; mas sim o conceito de atmosferas elétricas, que Aepinus não usa e até mesmo critica. (19, p. 392-393)

Aepinus define o estado elétrico positivo e negativo de maneira similar à teoria de Franklin, mesmo com uma diferença na definição de quantidade natural, como vimos acima. Ou seja, o positivo é aquele cuja quantidade de fluido excede a natural, o negativo é aquele cuja quantidade de fluido está abaixo da quantidade natural. Quando o corpo contiver a quantidade natural de fluido, estará no estado natural. Para Aepinus, há três formas de um corpo se apresentar eletrizado. Se ele estiver totalmente positivo, se ele estiver totalmente negativo, ou, se ele tiver uma parte positiva e outra parte negativa ao mesmo tempo. (19, p. 246) Com as bases físicas da teoria de Aepinus já apresentadas, podemos passar a analisar o primeiro uso de matemática no *Tentamen*.

4.2 Uma hipótese físico-matemática

Após apresentar as bases da teoria de um fluido elétrico, fortemente influenciada pela teoria de Franklin, Aepinus a matematiza utilizando conceitos como força à distância e quantidade de fluido elétrico. Em seu primeiro cálculo do livro, Aepinus emprega a figura (4.1), nomeando matematicamente certas quantidades e entes físicos. Segundo o autor, a quantidade natural de fluido do corpo A é Q , a força atrativa da matéria de A atuante sobre a partícula B é a e a força repulsiva do fluido elétrico contido em A atuante sobre a partícula de fluido elétrico B é r .

Estas definições são feitas para quando A está no estado natural. Assim, a força total de A em B é $a - r$. Como A se encontra na quantidade natural, conclui-se que não haveria ações – de ordem elétrica – em B devido ao corpo A. Portanto, $a - r = 0$. (19, p. 246) Esse equilíbrio de forças ocorre pela definição de quantidade natural, como vimos na seção 4.1. Ou seja, para Aepinus, a equação $a - r = 0$ atua representando, em termos matemáticos, a definição de quantidade natural de fluido elétrico em um corpo.

Em seguida, o autor supõe a adição de uma quantidade α de fluido em A, uniformemente distribuído por todo o corpo. Desse modo, ele deduz a nova força repulsiva, visto que agora havia mais fluido elétrico no corpo. No entanto, Aepinus não é explícito na maneira como ele a recalcula e apenas afirma que “a repulsão em B será igual a $\frac{(Q+\alpha)r}{Q}$ ”. (19,

p. 247) Aepinus assume aí que a força é linearmente proporcional à quantidade de fluido⁴⁷. Em termos modernos, pode-se dizer que Aepinus computa uma regra de três. A nova força repulsiva está para $Q + \alpha$ assim como r está para Q . Como a repulsão se mantém inalterada, a nova força entre o corpo A e B é igual a $a - r - \frac{\alpha r}{Q}$.

Para simplificar a expressão, Aepinus recorre ao equilíbrio de forças ($a - r = 0$) para, finalmente, obter que a atração de A em B é igual a $-\frac{\alpha r}{Q}$. Logo, “a partícula B será repelida do corpo A pela força $\frac{\alpha r}{Q}$ ”. Aepinus já entendia que fluido repele fluido e essa força era *definida*, em seu uso da matemática, como positiva; então, como o resultado demonstrado era negativo, tal força só poderia ser entendida como uma repulsão de valor⁴⁸

$$\frac{\alpha r}{Q}. \quad (4.2.1)$$

Conforme o autor, se o corpo A estivesse eletrizado negativamente, após perder uma quantidade α de fluido, o total de fluido em A seria $Q - \alpha$. Nesse caso, a repulsão do A sobre B seria igual a $\frac{(Q-\alpha)r}{Q}$. Assim, a força com a qual o corpo A atrai B se torna igual a $\frac{\alpha r}{Q}$. Aepinus não mostra, porém, esses cálculos em detalhe. Ele apenas argumenta que, como o fluido agora seria $Q - \alpha$, logo bastaria trocar o sinal de $+\alpha$ para $-\alpha$ no resultado obtido anteriormente. (19, p. 247-248)

Aepinus parte de hipóteses física, como a repulsão entre partículas de fluido e a atração entre fluido e matéria comum, para construir uma relação matemática entre as grandezas força (à distância) e quantidade de fluido elétrico. Essa expressão, mostrada na equação (4.2.1), é construída por Aepinus em seu livro e é bastante importante em sua teoria.

Vale ressaltar que o cenário criado por Aepinus é idealizado e, assim, não ocorreria no mundo natural. Pois, a partícula B de fluido mudaria a distribuição de fluido no corpo A pela força atrativa seguindo a lei da ação e reação, invalidando sua hipótese de distribuição uniforme de fluido elétrico (α) no corpo. Aepinus não é claro neste ponto, mas, em outras deduções em seu *Tentamen*, podemos observar que ele entende e aceita o fenômeno de ação e reação. (19, p. 315-319; 3, p. 397-398)

⁴⁷ O historiador Roderick W. Home nota essa suposição implícita em uma nota de rodapé. (19, p. 247) Porém, ele não se aprofunda no papel da matemática nesse ponto.

⁴⁸ Neste ponto, o uso dos sinais por Aepinus lembra nosso uso deles em notação vetorial. Atualmente, é corriqueiro definir um sentido de um vetor como positivo, o sinal negativo significa, então, o sentido oposto. Porém, notações específicas para vetores datam de meados do século XIX. (74, p. 131-133)

Aliás, tal perturbação em distribuições de fluido em um corpo compeliu Aepinus a criar uma distinção entre corpos elétricos perfeitos e imperfeitos. No que tange ao primeiro, o fluido elétrico não se movimentaria nunca porque seus poros, onde tal fluido se localiza, são muito estreitos e cerrados. Portanto, o corpo não poderia ser atraído nem repellido eletricamente por nenhum outro corpo eletrizado. Já no segundo, o fluido teria liberdade para se movimentar, mesmo que pouco, pois seus poros não são tão estreitos. (19, p. 304-306) Os elétricos perfeitos são, grosso modo, o que entendemos como isolantes perfeitos. Eles, assim como os isolantes perfeitos, não existem; todo corpo permite certo nível de movimentação de fluido elétrico (ou da carga elétrica). Logo, como a construção da equação (4.2.1) é baseada em ‘isolantes perfeitos’, temos que ela é uma abstração semelhante a um experimento mental, lidando com um cenário impossível de ocorrer.

Ademais, Aepinus estava ciente sobre a natureza da hipótese da distribuição uniforme, afirmando que tal abstração é “uma hipótese gratuita e que não ocorre na natureza”, mas “pode ser tolerada enquanto as conclusões deduzidas dela mudarem pouco quando se considerar o fluido [no contexto, o magnético, mas o raciocínio vale para seu fluido elétrico] distribuído desigualmente”. (19, p. 348)

Portanto, Aepinus parte de sua configuração teórica, isto é, de conceitos físicos, como a força, e de hipóteses físicas sobre atração e repulsão, para descrever relações entre eles. Essas relações acabam descritas da forma mais simples possível: uma relação linear, que descreve a variação da força repulsiva (do fluido em A na partícula B) quando fluido elétrico é adicionado. Essa é a parte matemática de sua construção. Em um caso hipotético onde $\alpha = 2Q$, a força final sobre, sendo assim igual a $2r$, onde r , a força repulsiva do fluido elétrico contido em A (no estado natural) na partícula de fluido elétrico B, atua como uma unidade básica de força.

Então, temos aqui um exemplo de como a matemática é aplicada na física e podemos ver que a concepção inferencial descreve bem esse funcionamento. Parte-se de conceitos físico-teóricos e, com uma *imersão*, que vimos no capítulo 2, eles são escritos matematicamente para que comportem as regras da álgebra. Com isso, Aepinus escolhe, implicitamente, a relação algébrica mais simples, a linear, entre o valor dos conceitos de força e de quantidade de fluido elétrico, resultando na equação (4.2.1). Essa é a etapa de *derivação*. A última etapa, *interpretação*, não é feita porque a configuração é uma abstração mental, não um caso concreto, como um experimento. Se fosse um experimento, Aepinus poderia interpretar o aumento da eletrização de A e a relação desse aumento com o aumento da força

elétrica pelo movimento angular de um versório, um tipo de eletroscópio⁴⁹ que já existia na época.

Em resumo, na dedução que vimos há hipóteses físicas, que constituem a base de sua teoria elétrica, além de uma hipótese matemática, a relação linear entre os valores da força e da quantidade de fluido. Assim, a equação (4.2.1) é baseada em dois tipos de hipóteses: físico-teórica e matemática. Portanto, podemos chamar a equação (4.2.1) de uma hipótese físico-matemática. Dessa forma, a equação (4.2.1) e a hipótese subjacente a ela só existem graças ao uso da matemática. Com isso, vemos como a aplicação da matemática abre uma nova dimensão de possibilidades na construção de uma teoria, pois há novos tipos de hipóteses e suposições que podem ser propostas devido a ela.

Isto é, para o ponto de vista de nossa proposta, mostra que a aplicação da matemática não se resume apenas a acrescentar, com as regras da lógica que a acompanham, uma nova forma de argumentação, dedutiva. Ela também traz para uma teoria novas possibilidades de hipóteses que, por sua vez, articulam tal teoria. Se a compararmos com teorias não-matematizadas, como a de Benjamin Franklin, vemos que uma teoria matematizada ganha novas frentes teóricas para resolver e explicar fenômenos físicos que não se resumem apenas ao poder de deduções matemáticas.

Nesta seção, tratamos do primeiro uso da matemática no *Tentamen*. A seguir, veremos como a matemática pode ser usada para articular uma teoria física, discutiremos também dois limites para a matematização em Aepinus.

4.3 A interação elétrica entre a matéria comum de dois corpos

Aepinus considera dois corpos elétricos no estado natural, representados na figura (4.2) abaixo. Seu objetivo aqui é determinar o valor da interação elétrica entre a matéria comum que os constitui. Para isso, ele considera a força total do corpo A sobre o corpo B, dividindo-a em quatro partes. Assim, o fluido elétrico de A repele o fluido elétrico de B com força igual a r , a matéria de A atrai o fluido elétrico de B com força a , o fluido de A atrai a matéria de B com força igual a A e a matéria de A *interage* eletricamente com a matéria de B com força igual a x . Aqui, seguimos a notação da fonte primária.

⁴⁹ Para uma breve história do eletroscópio a partir do Versório (ou *Versorium*, em latim) de William Gilbert, ver: (75). Antes dele, Girolamo Fracastoro (1478-1553) havia descrito um Perpendículo, similar a uma linha de prumo, para identificar a atração elétrica. Gilbert conhecia o trabalho de Fracastoro (2, p. 35-38).

Deste modo, a força total entre os dois corpos é $a - r + A + x$. Para o autor, essa soma é zero haja vista que um corpo no estado natural não exerce nenhuma força, de natureza elétrica, sobre outro que também se encontra no estado natural. Assim sendo, $a - r + A + x = 0$. Como $a - r = 0$, pois A está no estado natural, então $x = -A$. (19, p. 256-257)

Figura 4.2 – Segunda imagem do livro de Aepinus. Nela, um corpo A está próximo de um corpo B.

Fonte: Adaptada de AEPINUS. (19, p. 313)

Em seguida, Aepinus passa a estudar a relação entre as forças A e a . Considerando o corpo A com massa M e quantidade natural de fluido elétrico Q , e o corpo B com massa m e quantidade natural q . O autor cita, então, o princípio de que “ações corpóreas sempre acontecem na proporção das massas” para justificar que a estará para A na “relação composta” (19, p. 257) entre M e m e q e Q .

Em termos modernos, temos aqui uma regra de três em duas etapas: as forças entre fluido elétrico e matéria comum são diretamente proporcionais à massa e à quantidade de fluido elétrico; a força entre a matéria de A e o fluido de B (a) cresce conforme a massa de A aumenta, ou, no caso da quantidade de fluido em B aumentar, a também aumenta. Na notação de Aepinus, $a: A = Mq: mQ$.⁵⁰ Isto é, $A = \frac{amQ}{Mq}$. Em seguida, Aepinus afirma que “tanto A quanto B estão constituídos no estado natural, [então] é óbvio que $M: m = Q: q$ ”. (19, p. 257) Desse modo, Aepinus obtém finalmente que $a = r = A = -x$.

Na introdução à obra traduzida, o historiador Roderick W. Home afirma que a suposição ali feita resume-se a de que as forças são proporcionais às massas envolvidas⁵¹, o

⁵⁰ Essa notação indica uma igualdade entre proporções. Ela era muito comum entre os leibnizianos, especialmente Christian Wolff. (76, p. 295-296)

⁵¹ Haiiy, em seu livro sobre a teoria de Aepinus, explica esse raciocínio usando o conceito de quantidade de movimento. A ação mútua devido às massas e aos fluidos dos corpos A e B estão na proporção da quantidade de movimento (que um causa no outro); isto é, da massa vezes a velocidade. Assim, quanto maior é a massa (matéria comum) de A, maior a velocidade de cada “molécula” de fluido em B em direção a A. Portanto essa velocidade é proporcional a massa M de A. Em resumo, a quantidade de movimento do fluido em B, $mf_B v_B$, onde mf denota a massa do fluido, é tal que $mf_B v_B \propto Mmf_B$. Como, conforme Haiiy, a ação mútua (força) é proporcional à quantidade de movimento, ele mostra que a força do caso, a , é proporcional a Mmf_B . Implicitamente, Haiiy faz $mf_B = q$. O mesmo raciocínio pode ser aplicado à outra força, A . Como as duas acontecem concomitantemente, tem-se que a está para Mq assim como A está para mQ ; ou seja, $a: A = Mq: mQ$. (71, p. 16-19)

que, para ele, é uma suposição razoável, além de deixar explícito a relação linear implícita que vimos na seção 4.2. (19, p. 119) A suposição aqui feita por Aepinus não envolve somente as massas dos corpos, mas também uma relação de proporção com a quantidade natural de fluido elétrico e a massa dos corpos, apesar de não envolver explicitamente a ideia de massa de fluido elétrico⁵². Do raciocínio exposto, Aepinus extrai duas conclusões sobre a eletricidade:

- 1) Matéria comum repele matéria comum;
- 2) Posto que os corpos A e B no estado natural não atuam um sobre o outro (pela eletricidade) independente da distância, todas as forças seguem a mesma lei da distância. Aepinus não se compromete com a força elétrica sendo inversamente proporcional ao quadrado da distância⁵³, embora acredite que “a analogia [da natureza] parece militar em favor dessa lei [inverso do quadrado]”. (19, p. 257-258)

A primeira conclusão nos interessa, pois já havia sido introduzida, de maneira *ad hoc*, pelo próprio Franklin. (3, p. 377) Já Aepinus conseguiu deduzir essa modificação como uma consequência lógica de seus cálculos, fazendo uso das forças à distância. Vale ressaltar que a hipótese de que os constituintes da matéria comum a todos os corpos *interagem* eletricamente entre si, uma hipótese física, baseia toda a dedução de Aepinus. Logo, a repulsão matéria-matéria é baseada em uma suposição puramente física, de interação matéria-matéria. Porém, essa repulsão só aparece nessa teoria por meio de uma articulação, que se dá por dedução matemática. Com a concepção inferencial, o funcionamento dessa dedução fica bastante evidente.

Primeiro, parte-se de hipóteses físicas sobre a interação elétrica. Entre elas, Aepinus assume que constituintes da matéria comum interagem eletricamente entre si (a força x). A partir disso, ele lança mão da matemática – em particular, da álgebra – para somar as forças (elétricas) que compõem o sistema. Isto é, no referencial filosófico escolhido, a etapa de imersão. Com a derivação matemática, Aepinus tem que $A = -x$. Com isso, Aepinus já tem uma conclusão; matéria comum repele eletricamente matéria comum, a conclusão número (1) acima, o que é a etapa de interpretação, seguindo o capítulo 2. Não obstante, Aepinus

⁵² Aepinus não definiu que o fluido elétrico tinha massa, muito menos parecia utilizar esse conceito. Todavia, sua argumentação de que massa e quantidade de fluido de um corpo cresciam linearmente ($M:m = Q:q$) supunha implicitamente que a massa do corpo era acrescida da massa do fluido. Isso fica evidente no livro de Haüy acima mencionado, sobre a teoria de Aepinus, onde Haüy usa a expressão “massa do fluido [elétrico]”. (71, p. 21)

⁵³ Essa falta de comprometimento aparece em diversas partes do livro. No início, por exemplo, Aepinus apenas afirma que sabia que a força elétrica cai com a distância. (19, p. 253) Porém, ele nunca se compromete com a lei de função que a atração e a repulsão elétricas seguem.

continua sua dedução, partindo de novas hipóteses físicas; a relação entre “ações corpóreas” e as quantidades físicas que definem os corpos A e B – massa e quantidade de fluido elétrico. Com uma nova etapa de derivação, Aepinus tem que $a = r = A = -x$. Assim, conclui com o ponto (2) descrito acima, o que podemos observar como uma nova etapa interpretativa.

Deste modo, Aepinus consegue articular a teoria frankliniana, levando-a a comportar a relação matéria-matéria eletricamente sem adendos feitos forçadamente. Essa é uma articulação que só é possível devido à matematização. Porém, esse resultado trouxe problemas. A força repulsiva matéria-matéria entra em contradição com a teoria gravitacional newtoniana – já bem estabelecida –, onde matéria *atraía* matéria. Aepinus nota esse ponto de fricção e afirma ter ficado “particularmente preocupado porque essa proposição [repulsão elétrica] parecia diametricamente oposta à outra lei universal da natureza, identificada por *Newton*”. (19, p. 258)

Porém, Aepinus argumenta que a repulsão por ele identificada não cria nenhuma ação ou movimento quando os corpos estão em sua quantidade natural e, assim, qualquer outro tipo de força que houver entre os corpos não será perturbada pela repulsão elétrica. A repulsão elétrica que ele defende só deve ser considerada em fenômenos essencialmente elétricos. (19, p. 258-259) Entretanto, esse argumento falha em resolver a contradição de que uma mesma matéria produza, inatamente, duas forças opostas. Para isso, Aepinus adota uma posição que se afasta da ação à distância, afirmando que “não considera nem a força repulsiva aqui descoberta, nem a força atrativa chamada gravitação universal, como forças inerentes à matéria, ou essenciais a sua formação”. (19, p. 259)

Desta forma, a contradição entre a repulsão matéria-matéria e a teoria da gravitação universal de Newton é, se não bem resolvida, ao menos evitada. A solução encontrada depende de um afastamento da doutrina da ação à distância e é uma explicação de caráter mecanicista (*i.e.*, baseada em contatos), não matemático. Uma vez que as forças usadas acabam sendo consequências de outras causas mecânicas (*i.e.*, tangíveis), presentes na natureza, que o autor diz não serem conhecidas ainda. Isso indica um limite para a matematização na época. Não era possível aceitar uma matéria com duas forças, supostas inerentes a ela, com sentidos opostos. Para solucionar esse impasse, Aepinus usa uma explicação mecanicista, removendo a ideia de que as forças eram inerentes à matéria. Em suma, aqui, uma explicação matemática não é possível, o que indica um fator limitante a seu uso naquele contexto.

Além disso, a dedução da repulsão matéria-matéria, mesmo deduzida matematicamente, não foi aceita por alguns filósofos naturais da época. Jan Hendrik van

Swinden (1746-1823), por exemplo, defende que Aepinus cometera um erro: ele teria esquecido um fator na equação $a - r + A + x = 0$. Para Swinden, a repulsão entre as quantidades de fluido elétrico presentes em A e B tinham quer ser contabilizada duas vezes. Ou seja, o fluido elétrico de A repele o fluido elétrico de B com força igual a r , e o fluido elétrico de B repele o de A com força igual a R . Assim, tem-se $a - r + A - R + x = 0$. Como o corpo A está no estado natural, Swinden tem que $a - r = 0$; com B no estado natural, $A - R = 0$. Então, Swinden conclui que $x = 0$ e, portanto, não há que se falar em interação elétrica matéria-matéria, algo que ele já rejeitava como necessário para a teoria de Aepinus. (77, p. 220-225) Ele conclui essa discordância afirmando que

os Corpos enquanto tais [matéria comum] não exercem nenhuma ação recíproca de atração [provável erro tipográfico, ele quis dizer repulsão] um sobre o outro. Não se deve traduzir uma expressão Matemática em linguagem Física sem que se tenha consciência dos Princípios segundo os quais o cálculo é baseado. Tudo que a expressão $x = 0$ indica é que não consideramos aqui a ação dos Corpos enquanto tais; nós a ignoramos aqui e que, como ela será zero nos cálculos em questão, não se deduz nada sobre o que de fato ela é. (77, p. 224)

A própria dedução de Swinden pode ser vista com a ajuda da concepção inferencial. A diferença entre sua dedução e a de Aepinus reside então nas considerações físicas, presentes antes da etapa de dedução. No caso, Swinden conta duas vezes a força de repulsão fluido-fluido, pois, segundo ele, a força é recíproca e, portanto, deve ser maior do que se apenas um fluido (de A) agisse sobre o outro (em B).⁵⁴

Diferentes suposições e hipóteses físicas podem ser repassadas para a estrutura matemática, via imersões, que retorna um outro valor para a mesma variável, x , após a derivação. Discordâncias se mantêm, então, no escopo de aspectos físicos. Aqui a matemática é usada por ambos. Eles obtêm resultados matemáticos diferentes, pois partem de considerações físicas diferentes, e terminam por interpretá-los de volta à física com consequências opostas.

⁵⁴ Nesse caso, Swinden explica seu raciocínio com a ajuda de uma analogia com a força gravitacional, baseando-se em uma análise sobre esta do astrônomo Joseph Lalande (1732-1807). Se m_S e m_T são as massas do Sol e da Terra, respectivamente, então o Sol atrai a Terra com uma força de valor m_S/r^2 e a Terra atrai o Sol com força igual a m_T/r^2 . É possível afirmar, segundo Swinden, que esse sistema é igual ao Sol agindo sozinho, atraindo a Terra com uma força $(m_S + m_T)/r^2$. (77, p. 221-222; 78, p. 474-475) Essa conta faz sentido na mecânica moderna, pois, em casos assim, a força $F_{S(T)}$ que o Sol aplica sobre a Terra, considerando-os em um sistema binário, é $F_{S(T)} = -(G(m_S + m_T)/\mu r^2)\hat{r}$, onde $\hat{r}$ é o versor direcionado da Terra para o Sol e μ é a massa reduzida do sistema. Neste caso, o referencial das coordenadas está no centro de massa do sistema. Mas não é isso que Aepinus considera. Ele calcula apenas a força de A sobre B, não considerando o sistema inteiro (*i.e.*, todas as forças). Se Swinden calculasse a força do sistema total corretamente, ele deveria considerar todas as forças mencionadas duas vezes, já que todas são recíprocas. Isto é, todas as forças que A atua em B, como Aepinus fez, e todas que B atua em A, não apenas a repulsão fluido-fluido de B sobre A.

Assim, para nossa proposta, essa diferença entre resultados mostra o valor polivalente da matematização. Ela geralmente não consegue distinguir suposições físicas que baseiam os cálculos, representando mais um limite sobre o que a matemática consegue – ou não – fazer. Isso não significa que o canal de interação entre matemática e física seja de mão única. A matemática é capaz de influir até mesmo em pressupostos físicos, como veremos na seção 4.4.2.⁵⁵

Para este trabalho, vemos também que a aplicação da matemática vem com limites impostos pelas teorias e seus contextos históricos. Uma teoria circunscrita em um contexto em que certas causas e pressupostos mecanicistas não são matematizados, seja por uma impossibilidade devido à época ou outra causa, não terá na matemática uma possibilidade para resolver tensões que eventualmente surgem. Porém, explicações mecanicistas, sem matemática, podem ser usadas. Um exemplo disso é o conflito que Aepinus teve que resolver quando confrontou seu resultado calculado com a teoria de Newton para gravitação. Em síntese, como vimos no capítulo 3, a matematização e o mecanicismo funcionam como polos para nossa filosofia. Aqui, assim como no caso de Johann Euler, esses dois polos podem se complementar quando uma teoria tenta explicar fenômenos e resolver contradições que eventualmente podem aparecer.

Algumas discordâncias, por outro lado, não se deram nos cálculos, mas na própria existência e usos da matemática no estudo da eletricidade. Assim, George Adams (1750-1795) afirmou que

A filosofia deve muito à assistência que recebeu dos matemáticos, mas isso só ocorre quando eles se dedicam [a aplicá-la] ao estudo dos fenômenos. Quando eles [os fenômenos] são negligenciados, os cálculos existem para servir uma hipótese; quanto mais bonito e elegantes eles são, mais prejudicial eles se tornam para a ciência. É assim que Aepinus, por meio de uma teoria matematizada da eletricidade, fechou a porta às nossas pesquisas sobre a natureza e as operações desse fluido [o fluido elétrico]. (79, p. 301)

Essa crítica acima remete aos casos comentados na seção 2.1 e discutidos pelo historiador canadense Yves Gingras. (31) George Adams entende que o excesso de confiança nos cálculos atrapalha as explicações físicas, uma crítica similar a de Louis Bertrand Castel, já apresentada no capítulo 2, às explicações de Newton para a gravitação. Temos, portanto, um exemplo de que as mudanças de Aepinus em direção a explicações mais matematizadas em

⁵⁵ Além de Swinden, George Miller, em 1799, criticou a hipótese de Aepinus sobre a interação elétrica matéria-matéria. Segundo Miller, “ele [Aepinus] assumiu, aparentemente sem qualquer outro motivo além de sua importância para suas conclusões, que as partículas de todas as outras substâncias [matéria] repelem-se”. (80, p. 140) Aepinus não assumiu que elas se repeliam, apenas que interagiam. Para Miller, as atrações dos fluidos com as matérias (a e A) eram balanceadas apenas pela repulsão (r) fluido-fluido. (80, p. 147-148)

eletricidade sofreram críticas por aqueles que entendem, como Adams, que a influência da matemática em explicações deveria ser mais contida. Vale lembrar que, quando discutimos o que são explicações científicas, na seção 2.2, deixamos claro nosso viés filosófico – diferentes formas de “explicação” serão chamadas aqui da mesma forma, explicação, sem distinções ou hierarquias. Logo, tanto as explicações matematizadas de Aepinus quanto as mecanicistas, como as de Franklin e Johann Euler, recebem neste trabalho o mesmo tratamento.

Podemos então passar para a matematização que Aepinus faz da atração dos corpos. Nela, veremos como a matemática pode levar a resultados contraditórios com o que é observado na natureza. Neste caso, Aepinus escolhe a matemática como prioritária, questionando a observação, não suas deduções.

4.4 Atração elétrica entre dois corpos

Ainda utilizando a figura (4.2), Aepinus mantém a notação matemática da seção 4.3. Porém, agora, supondo que o corpo A está com um excesso de fluido de valor α (*i.e.*, eletrizado positivamente), em vez de estar no estado natural. O corpo B também muda de estado elétrico, do estado natural para o positivo, com um excesso δ de fluido. Assim sendo, a quantidade de fluido em A é $Q + \alpha$ e em B, $q + \delta$. A força com a qual o fluido presente em B atrai a matéria de A é igual a $\frac{qa+\delta a}{q}$. A matéria de B atrai o fluido de A por uma força igual a $\frac{QA+\alpha A}{Q}$ e a repulsão do fluido presente em A no fluido em B é dada pela expressão $\frac{(Q+\alpha)(q+\delta)r}{Qq}$. (19, p. 262) Por fim, a matéria comum em B repele a matéria de A por uma força igual a x , que é agora tratado como um número positivo que precisa ser sempre subtraído no cálculo da força total⁵⁶ que um corpo imprime no outro.

Então, a força total desse sistema é igual a $a + A - r - x + \frac{\delta a}{q} + \frac{\alpha A}{Q} - \frac{qar+Q\delta r+\alpha\delta r}{Qq}$. Como as forças presentes no estado natural se anulam, então $a + A - r - x = 0$ e, assim, tem-se que $x = A = a = r$. Logo, a força total é $r \left(1 + 1 - 1 - 1 + \frac{\delta}{q} + \frac{\alpha}{Q} - \frac{\alpha}{Q} - \frac{\delta}{q} - \frac{\alpha\delta}{Qq} \right)$, o que resulta na força total de A sobre B como igual a

$$-\frac{\alpha\delta r}{Qq}. \quad (4.4.1)$$

⁵⁶ Em termos matemáticos modernos, Aepinus usa aqui o módulo de x . Porém, a notação para valor absoluto só surgiu perto da metade do século XIX. (74, p. 123-124)

Onde r , lembre-se, é a atração do fluido de um corpo no estado natural em uma partícula de fluido. Como a expressão tem um sinal de menos, então, se os corpos A e B estiverem no mesmo estado elétrico; isto é, se α e δ têm o mesmo sinal (os dois negativos ou positivos), a equação (4.4.1) mostra que os corpos se repelirão. Já no caso de um dos corpos – ou os dois – estar eletrificado negativamente, bastaria trocar o sinal de α ou δ (ou ambos), conforme o caso. (19, p. 262-263)

O resultado mais interessante aqui é quando δ , ou α , for nulo. Nesse caso, a força total de A sobre B é nula. Esse resultado é contraditório, pois vai de encontro aos experimentos e observações da eletrostática conhecidos na época, onde um corpo eletrizado por atrito era aproximado de outro não eletrizado e o movimentava. Aliás, essa é a base do que conhecemos hoje como indução elétrica. Tal contradição já havia sido notada por Aepinus em seu livro. Antes de deduzir a equação (4.4.1), Aepinus havia calculado a força total que A, com excesso de fluido elétrico, exerce em B, no estado natural (*i.e.*, sem estar eletrizado). Neste caso, a força total é igual a $a + \frac{QA+\alpha A}{Q} - \frac{Qr+\alpha r}{Q} - x$, como $A = x = r = a$, então essa força é igual a zero. (19, p. 259-260) Aepinus discute a disparidade entre observação e resultado matemático, afirmando que

apesar dessas minhas proposições [um corpo no estado natural não é atraído por corpos eletrificados e a mesma afirmação, mas no contexto de magnetismo] parecerem discordantes com e opostas à experiência diária, elas devem ser consideradas completamente verdadeiras. Já que não só elas derivam dos princípios fundamentais da teoria de *Franklin* tão inevitavelmente que se elas não forem verdadeiras, toda a teoria de *Franklin* colapsa. Além disso, elas concordam tão bem com a experiência que físicos deveriam ter chegado nessas leis apenas através delas se tivessem prestado atenção o suficiente a todas as circunstâncias. (19, p. 261)

Em seguida, Aepinus conclui que corpos no estado natural acabam eletrizados quando aproximados de outros corpos previamente eletrizados. Assim, apenas quando o corpo sem eletrização é perturbado eletricamente pelo outro é que ele pode se mover, como observado. (19, p. 260-262)

Para confirmar tal conclusão, ele mostra experimentalmente como essa eletrização ocorre. Aproximando um objeto eletrizado de uma barra de metal no estado natural, a barra ficava com uma ponta em um estado elétrico e a outra no estado contrário⁵⁷. (19, p. 312-315) Isso mostra que essa eletrização ocorre em partes diferentes do corpo no estado natural, próximo ao que entendemos atualmente como polarização, e permite que esse corpo se mova. Quando polarizado por um corpo no estado positivo, a parte mais próxima da barra se torna

⁵⁷ Para uma discussão sobre esse experimento, ver: (2, p. 186-187).

negativa; a mais afastada, positiva. Assim, como o corpo eletrizado e a parte mais próxima dele se atraem, a tendência é que os dois corpos inteiros (A e B) se atraíam – explicando o movimento observado. Aepinus demonstra esse fenômeno matematicamente, o que veremos na seção 4.4.2. Antes, porém, podemos discutir o papel da matemática até aqui.

O resultado encontrado pelo autor do *Tentamen* partiu, em última instância, de pressupostos físicos, como já vimos nos casos anteriores. Com a concepção inferencial explica todo o percurso da aplicação da matemática aqui, como já observamos nos casos anteriores. O que nós destacamos aqui é, entretanto, a relevância que a matemática ganha. Aepinus chega, após seus cálculos, em conclusões contraintuitivas, que pareciam contraditórias com a própria observação. Porém, a matemática tem prioridade. É ela que justifica seu experimento com uma barra de metal para comprovar a ‘polarização’ do fluido elétrico. O primado da matemática é bastante novo para aquele contexto e representa, por consequência, um novo artifício na construção de teorias. A teoria elétrica de Aepinus não é inovadora apenas no seu uso da ação à distância, mas também nas suas táticas, colocando a matemática como força motriz, para sugerir e construir conclusões, argumentações e experimentos.

Antes de partir para suas principais demonstrações acerca da atração e repulsão elétricas, precisamos primeiro apresentar sua expressão matemática geral para a interação elétrica em dois corpos eletrizados e divididos em n trechos. Na seção abaixo, veremos tal expressão e, em seguida, voltaremos a discutir a atração e a repulsão elétricas.

4.4.1 Expressão geral para a interação elétrica entre dois corpos

Aepinus deduz a força elétrica total que um corpo exerce sobre outro no caso dos dois estarem divididos por n trechos. No caso, Aepinus considera que cada trecho diferente pode ter um estado elétrico diferente daqueles nos trechos mais próximos. A figura abaixo ilustra o caso:

Figura 4.3 – O corpo AD é dividido pelas partes AB, BC e CD. O corpo EH é dividido pelas partes EF, FG e GH. Essas divisões ocorrem sem perda de generalidade, ambos os corpos poderiam ser divididos em mais partes.

Aepinus considera que as quantidades naturais nas partes AB, BC e CD são iguais entre si e de valor Q . Raciocínio similar vale para as partes EF, FG e GH, com quantidades naturais iguais a q para cada trecho. Enquanto cada corpo estiver na quantidade natural, as forças entre os fluidos elétricos de cada trecho são iguais a: do trecho AB em EF, r ; do trecho BC em EF, r' ; do trecho CD em EF, r'' ; do trecho AB em FG, ρ ; do trecho BC em FG, ρ' ; do trecho CD em FG, ρ'' ; do trecho AB em GH, l ; do trecho BC em GH, l' ; do trecho CD em GH, l'' .

A quantidade de fluido elétrico, que excede a – ou subtrai da – quantidade natural é, para cada trecho, igual a: no trecho AB, a ; no trecho BC, b ; no trecho CD, c ; no trecho EF, e ; no trecho FG, f ; no trecho GH, g . Apoiando-se na dedução da interação entre dois corpos, representada pela equação (4.4.1), Aepinus não considera a interação de fluido elétrico com matéria elétrica nem a interação matéria-matéria trecho a trecho, já que elas se anulam no cálculo da força total. Assim, a força total de cada trecho de um corpo em cada trecho do outro corpo é igual a: de AB em EF, $-\frac{aer}{Qq}$; de BC em EF, $-\frac{ber'}{Qq}$; de CD em EF, $-\frac{cer''}{Qq}$; de AB em FG, $-\frac{af\rho}{Qq}$; de BC em FG, $-\frac{bf\rho'}{Qq}$; de CD em FG, $-\frac{cf\rho''}{Qq}$; de AB em GH, $-\frac{agl}{Qq}$; de BC em GH, $-\frac{bgl'}{Qq}$; de CD em GH, $-\frac{cgl''}{Qq}$.

Em posse de todas essas forças, Aepinus encontra a força total de um corpo, AD, no outro, EH, somando todas estas expressões acima. Com isso, Aepinus encontra a seguinte expressão, na qual a força total de um corpo sobre o outro é igual a:

$$\frac{-(ar + br' + cr'')e - (a\rho + b\rho' + c\rho'')f - (al + bl' + cl'')g}{Qq}. \quad (4.4.1.1)$$

Essa expressão pode ser usada independente do estado elétrico de cada parte, bastando que se ajuste o estado elétrico de cada trecho com o sinal algébrico da sua quantidade de fluido. Se for um excedente de fluido elétrico, a quantidade leva o sinal positivo; se for uma deficiência, leva o sinal negativo. (19, p. 267-268) É dela que Aepinus parte para explicar alguns resultados pouco intuitivos, ou até em contradição aparente com a observação; veremos isto na subseção abaixo.

4.4.2 A atração entre corpos com o mesmo estado elétrico

A figura abaixo exemplifica a interação elétrica entre dois corpos, nomeados A e B. Ela é parecida com a figura (4.2), mas B aparece dividido em dois trechos:

Figura 4.4 – O corpo eletrizado A, com excesso de fluido elétrico, está próximo do corpo B, que se encontra no seu estado natural. O corpo B está dividido em dois trechos e I é uma partícula de fluido elétrico.

Fonte: Adaptada de AEPINUS. (19, p. 313)

Nela, temos o corpo A com quantidade natural de fluido elétrico igual a Q e um excesso de fluido igual a α . Neste caso, o corpo A repele partículas de fluido perto de si com força igual a $\frac{+\alpha r}{Q}$, seguindo a construção matemática vista na seção 4.2. Logo, se o corpo B, que não está eletrizado, é aproximado de A, este eletrizado, então as partículas de fluido elétrico em B sofrerão uma repulsão, de valor $\frac{\alpha r}{Q}$, no trecho CDGH em direção ao trecho GHEF. (19, p. 304)

Aepinus continua seu raciocínio neste caso, argumentando que o fluido em B obedecerá a essa força conforme os impedimentos – obstrução dos poros de B – para seu movimento permitirem. Como dito na seção 4.2, Aepinus distingue dois tipos de corpos elétricos *per se*, os perfeitos e os imperfeitos. Grosso modo, o primeiro seria o que entendemos como isolantes perfeitos, o segundo, imperfeitos. Se B for um corpo elétrico *per se* perfeito, a força acima não causará efeito algum. Mas, se B for do tipo imperfeito, a força causará algum efeito – mesmo que apenas parcial. Todavia, apenas se B for um corpo não-elétrico *per se* (grosso modo, condutor), o que significa que a resistência ao movimento do fluido é nula, a força acima descrita conseguirá causar efeito total. (19, p. 305) Em seguida, Aepinus afirma que o caso de um corpo elétrico *per se* perfeito não ocorre, já que nenhum corpo assim foi observado na natureza. Porém, se tal corpo existisse, ao se aproximar de um corpo eletrizado, ele não sofreria distúrbios em seu estado natural e não sofreria nenhuma ação de ordem elétrica. (19, p. 305)

Com isso, o segundo e o terceiro casos são de maior interesse, já que neles o fluido em B se move para as partes mais distantes do corpo A. Se o corpo B estiver cercado por corpos elétricos *per se* (como o ar com pouca umidade), isolando-o, o fluido elétrico em B quase não conseguirá escapar do corpo, acumulando-se perto de EF e, assim, causando uma deficiência no trecho CDGH. (19, p. 305)

Assim, analisando a figura (4.4), ele supõe que a quantidade natural de fluido elétrico nos trechos CDGH e GHEF são iguais entre si e de valor igual a Q . No corpo A, sua quantidade natural de fluido elétrico é igual a q . Além disso, o excesso de fluido elétrico em A tem valor igual a δ (Aepinus muda o excesso de fluido em A de α para δ nessa parte do livro, mesmo assim suas contas continuam corretas), e a quantidade propelida de CDGH em direção a EFGH é igual a β .

Se na fórmula geral da equação (4.4.1.1) colocarmos que $a = -\beta$, $b = +\beta$, $c = 0$, $d = \delta$, $f = 0$ e $g = 0$, teremos então adaptado aquela expressão para o caso aqui e a atração de A em B se torna igual a $\frac{-(-\beta r + \beta r')\delta}{Qq} = \frac{\delta\beta(r-r')}{Qq}$. Como $r > r'$, pois a força cai com a distância, a força total é, então, positiva. Em conclusão, o corpo A primeiro eletrifica o corpo B e, só depois desse processo – e por causa desse processo –, o corpo A e o corpo B se atraem, como observado. (19, p. 305-306)

Assim, Aepinus finalmente explica a atração entre um corpo eletrizado e outro não eletrizado, como citado na seção 4.4. Lá, havíamos visto que seus cálculos apontavam que nenhuma ação elétrica deveria ocorrer; uma contradição com observações comuns à época. Aqui, Aepinus explica que a atração elétrica ocorre, mas não antes do fluido elétrico no corpo que está na quantidade natural (corpo B) ser perturbado pelo corpo eletrizado (A). Neste caso, a matemática finalmente resolve a contradição que Aepinus havia encontrado. Visto que, considerando novos pressupostos físicos (*i.e.*, a ‘polarização’ de B), Aepinus consegue atualizar sua matemática ao ponto de sanar tal contradição com as observações. Nessa explicação aprofundada, observamos que, pelo menos até este ponto, dois tipos de recursos são usados: um matemático e outro mecanicista.

O primeiro diz respeito às deduções que Aepinus realiza partindo de sua base físico-teórica. Por exemplo, quando discute o efeito da eletrização de A sobre as partículas de fluido em B, o autor usa de sua expressão (4.2.1), além de outras fórmulas já demonstradas. Com isso, podemos observar todo o percurso imersão-derivação-interpretação. Isto é, parte-se da configuração empírico-teórica para estruturas matemáticas adequadas (imersão) e, depois de

cálculos (derivação), retorna-se à configuração inicial para que se extraia os resultados (interpretação).

No entanto, quando Aepinus estuda o efeito da força elétrica total sobre B, o segundo recurso, o mecanicista, fica explícito. Aqui, ele distingue entre corpos que mantêm ou não um estado elétrico, não havendo princípios matematizados; essa parte da explicação se atém aos poros que constituem os corpos e o movimento (ou falta dele) do fluido elétrico dentro deles. Assim, no que tange ao fenômeno da atração nessas condições – o que entendemos hoje como indução elétrica –, a explicação de Aepinus, apesar de matematizada, faz uso de algumas considerações mecanicistas. Estas considerações são, porém, pequenas e abrem espaços para mais matemática, como veremos abaixo.

Aepinus continua o caso da figura (4.4), afirmando que quanto mais perto o corpo B estiver de A, maior será a força repulsiva que A exerce sobre o fluido em B. Assim, como uma força maior produz um efeito maior, então β será maior à medida que a distância entre A e B diminui. Aepinus deduz isso matematicamente considerando uma partícula, nomeada I, perto da secção transversal GH. A força da quantidade natural de fluido do corpo A sobre a partícula I é igual a ρ' , e as forças das quantidades naturais das partes CDGH e EFGH sobre I são iguais entre si e de valor ρ . Como A possui um excesso δ de fluido, I é repelida para longe de A, conseqüentemente se aproximando de EF, por uma força igual a $\frac{\delta\rho'}{q}$. Porém, o trecho EFGH também repele I em direção a CD por uma força igual a $\frac{\beta\rho}{q}$. Além disso, I é atraída por CDGH, em direção a CD, por uma força igual a $\frac{\beta\rho}{q}$. Assim, a força total do sistema em I é igual a $\frac{\delta\rho'}{q} - \frac{2\beta\rho}{q}$. Aepinus assume implicitamente que essa expressão se mantém positiva, então I vai em direção a EF. Ele provavelmente supôs isso porque já havia provado que a ação de A sobre B, de valor igual a $\frac{\delta\beta(r-r')}{Qq}$, é sempre positiva⁵⁸.

Conforme partículas como I cruzam de CDGH para EFGH, β irá aumentar e, por isso, a expressão da força, $\left(\frac{\delta\rho'}{q} - \frac{2\beta\rho}{q}\right)$, sobre uma partícula em B (próxima a GH) tenderá a zero. Contudo, quanto maior for o termo $\frac{\delta\rho'}{q}$, que se refere a força que A aplica sobre a partícula de

⁵⁸ Isso não é um argumento completo, já que deixa margem para imaginarmos cenários onde uma certa quantidade de fluido de fato se move em direção a EF, afastando-se de A, e outra quantidade, em direção a CD, o que poderia ocorrer dependendo da posição inicial da partícula de fluido no corpo B. Mesmo assim, se a quantidade que se afasta de A supera, em quantidade de fluido, a quantidade que se aproxima, o estado elétrico final do corpo B ainda seria atingido mesmo que algumas partículas de fluido façam o caminho contrário.

fluido, maior será o valor de β que sinaliza o fim do fluxo de fluido em direção a EF, pois $\frac{\delta\rho'}{q}$ será maior, o que implica em um β maior para zerar a força $\left(\frac{\delta\rho'}{q} - \frac{2\beta\rho}{Q}\right)$. Como o termo $\frac{\delta\rho'}{q}$ se torna cada vez maior conforme ρ' cresce, e ρ' cresce quando a distância entre A e B diminui, então quanto mais próximo A e B estiverem, maior será o β no final do processo de eletrização. (19, p. 306-307)

Neste ponto, toda a explicação se encontra, enfim, matematizada. Por exemplo, podemos ver, por meio de uma imersão (da configuração empírico-teórica para a matemática), que o cenário inicial de forças movendo partículas do fluido é colocado em uma notação matemática. Aepinus calcula a força total sobre uma partícula qualquer I, seguindo seus resultados iniciais, já analisados aqui. Após a etapa de derivação, ele retorna o resultado para seu mundo físico-teórico – a etapa de interpretação –, onde conclui sobre o estado elétrico de B. As forças na partícula I o auxiliam a pensar matematicamente o movimento do fluido elétrico nos poros do corpo B. Essa ‘polarização’ de B foi demonstrada por ele com um experimento já citado na seção 4.4, sobre a eletrização de uma barra de metal. (19, p. 312-315)

Nesta subseção, seguimos a ordem do livro de Aepinus. No *Tentamen*, a ‘polarização’ é sugerida antes de ser calculada. Porém, se tivéssemos invertido a ordem aqui e, portanto, apresentado o cálculo com as forças em I antes de sugerir a ‘polarização’, não faria diferença. A matemática pode, então, sugerir pressupostos físico-teóricos, que pertencem à configuração empírico-teórica.

Com toda essa análise em mãos, Aepinus procura explicar com sua teoria um fenômeno de atração elétrica mais complexo, entre corpos com mesmo estado elétrico – ou, em termos modernos, mesma carga. Para explicar isso, Aepinus utiliza uma versão modificada da figura (4.4); adicionando uma divisão no corpo A da seguinte forma:

Figura 4.5 – O corpo A e o corpo B divididos em partes. A é dividido em LMNO e NOIK, e B é dividido em CDGH e GHEF.

Primeiramente, Aepinus afirma que a quantidade natural de fluido elétrico em A é igual a $2q$, sendo que cada parte do corpo A tem um q . O corpo B tem uma quantidade natural igual a $2Q$, sendo um Q para cada uma de suas duas partes. Aepinus também supõe que A possui um excesso de fluido de valor igual a α , e B também possui um excesso de fluido, de valor igual a β . O corpo A exerce uma repulsão sobre o fluido elétrico em B, assim como o corpo B exerce uma repulsão sobre o fluido em A; assim, o fluido sairá de CD e IK em direção a EF e LM, e os corpos não manterão mais uma distribuição uniforme de fluido dentro de si. Assim, o autor do *Tentamen* nomeia a quantidade de fluido que atravessa o interior do corpo A de IKNO para LMNO como η , e a quantidade de fluido que cruza o corpo B de CDGH para GHEF como θ , de forma a levar em consideração as ‘polarizações’ (expressão moderna) nos corpos A e B. A fórmula geral para casos como o da figura (4.5) já havia sido deduzida por Aepinus e nós a vimos aqui na equação (4.4.1.1). O autor aplica, então, tal equação neste caso, com os valores $e = \frac{\alpha}{2} - \eta$, $f = \frac{\alpha}{2} + \eta$, $g = 0$, $a = \frac{\beta}{2} - \theta$, $b = \frac{\beta}{2} + \theta$ e $c = 0$. (19, p. 315-316) O interesse de Aepinus é em analisar o sinal algébrico da força total deste caso.

A magnitude e o sinal de η e θ dependem de certos fatores, como as magnitudes das forças repulsivas que B e A aplicam um sobre o fluido do outro. Estas forças dependem, por sua vez, tanto da quantidade de fluido em abundância em cada corpo quanto da distância entre os corpos, seguindo a relação entre as grandezas α e r na equação (4.2.1). Desta forma, há a possibilidade de ajustar o excesso de fluido elétrico em A ou B (ou ambos), assim como a distância entre eles, de modo que $\eta > \frac{\alpha}{2}$ ou $\theta > \frac{\beta}{2}$ (ou ambos). Com isso, é possível que a ou e , ou ambas, sejam quantidades negativas. No caso de a , b , e e f serem positivas, a fórmula expressa por (4.4.1.1) se torna $\frac{-(ar+br')e-(ap+bp')f}{Qq}$, que tem sempre sinal negativo, ou seja, é uma repulsão. Porém, se a , ou e , ou ambas, forem negativas, a fórmula pode ser representada por três expressões: $\frac{+(ar-br')e+(ap-bp')f}{Qq}$, se $a < 0$; $\frac{+(ar+br')e-(ap+bp')f}{Qq}$, se $e < 0$; e $\frac{+(br'-ar)e-(bp'-ap)f}{Qq}$, se $a < 0$ e $e < 0$. (19, p. 316-317)

Os sinais algébricos dessas três expressões mudam dependendo dos sinais de a e e . Por isso, elas podem ser positivas, negativas ou zero. De outra forma, η e θ podem ser tais que a força atrativa entre os corpos A e B seja negativa, o que indica assim eles se repelem, ou a

força é positiva, indicando que A e B se *atraem*. Ou podem resultar em uma força nula e, neste caso, não há ação elétrica entre eles. (19, p. 316-317)

Em seguida, Aepinus analisa as condições nas quais essa *atração* entre corpos com o mesmo estado elétrico ocorre. Ele afirma que, quando A e B estão distantes, a força repulsiva entre eles é fraca e, portanto, as quantidades de fluido η e θ são pequenas. Portanto, é possível que $\eta < \frac{\alpha}{2}$ e $\theta < \frac{\beta}{2}$ e, conseqüentemente, a e e têm valores positivos. Nesse caso, A e B se repelem. Porém, se as forças repulsivas e, portanto, η e θ , aumentam conforme a distância entre A e B diminui, é possível que tanto e quanto a – ou pelo menos um deles – se tornem negativos, e a força total pela qual os corpos A e B se repelem pode adquirir um valor negativo, caracterizando-se então uma *atração*. (19, p. 317)

Em outro cenário, se A está eletrizado fracamente, ele repele B. Porém, se A está fortemente eletrizado, então α tem um valor bastante alto, o que causa um distúrbio mais efetivo no fluido em B. Por conseqüência, o valor de θ será maior, então, como $a = \frac{\beta}{2} - \theta$, a poderá assumir um valor negativo, resultando em uma força *atrativa* de um corpo sobre o outro. (19, p. 317-318) Sua dedução para estes resultados, segundo ele, mostra que sua teoria é bem-sucedida, pois consegue deduzir de suas “leis fundamentais” um resultado tão paradoxal⁵⁹. Assim, ele também afirma que “[eu] duvido muito que isso [sua resposta ao problema em questão] possa ser o caso com algumas das outras hipóteses [*i.e.*, outras teorias] desenvolvidas até hoje”. (19, p. 318)

A atração entre corpos no mesmo estado elétrico (em termos modernos, mesma carga total) já havia sido notada, por exemplo, por Charles Du Fay, que em 1733 escreveu:

para realizar estes Experimentos [de repulsão entre corpos com eletricidade de mesmo tipo], é um requisito que os dois Corpos, que são colocados próximos um ao outro para que encontremos a Natureza de suas Eletricidades, estejam tão eletrizados quanto possível. Se um deles não estiver eletrizado, ou estiver apenas fracamente eletrizado, ele será atraído pelo outro [corpo], embora seja da classe que deveria naturalmente ser repelida. Porém, o Experimento sempre ocorrerá perfeitamente se ambos os Corpos estiverem suficientemente eletrizados. (8, p. 265)

Johann Euler estudou esse fenômeno em seu trabalho de 1757 – publicado em 1759 – que vimos anteriormente, no capítulo 3. Porém, como vimos, ele não fez uso do conceito de ação à distância. Para Johann Euler, quando os dois corpos estavam no mesmo estado elétrico,

⁵⁹ A atração entre corpos carregados com o mesmo sinal, positivos ou negativos, está presente na teoria vigente em eletrostática. Para uma dedução moderna desse fenômeno, ver a seção 2.3 da seguinte referência: (81). Para uma discussão mais heurística dele, ver a seção 7.10 da seguinte referência: (2).

mas com um deles em um estado elétrico muito mais fraco do que o outro⁶⁰, o éter do corpo mais eletrizado adentrava o corpo menos eletrizado. Esse movimento diminuía a elasticidade do éter no espaço entre os corpos em comparação com a elasticidade do éter no ar ao redor, como a diferença de elasticidade, segundo Johann Euler, gerava uma diferença de pressão, os corpos acabavam se atraindo. (53, p. 143-144) Discutimos aqui o caso dos corpos eletrizados positivamente. Logo em seguida, Johann Euler tratou do caso em que os dois corpos estão negativos, mas não abordou a atração proveniente neste caso. (53, p. 144-145) Em contraste, Aepinus consegue deduzir esse fenômeno de atração para os dois casos, quando A e B estão positivos e quando estão negativos. (19, p. 318-319)

Por último, Aepinus relata um experimento convincente para provar que esse fenômeno de atração ocorre. Para isso, Aepinus suspende uma pequena bola por um fio de seda, formando um pêndulo. Abaixo desse pêndulo, ele coloca um cilindro de metal, apoiado sobre suportes de vidro. O globo do pêndulo também é amarrado, de lado, por um fio de seda. No cilindro de metal, ele prende um fio de ferro, isolado eletricamente. O globo do pêndulo é eletrificado com a ajuda de um tubo de vidro e, depois, move-se o tubo de vidro perto da ponta solta do fio de ferro, eletrizando o cilindro de metal com o mesmo estado que o globo acima dele. Em seguida, o globo acaba afastado do cilindro. Após o afastamento, Aepinus puxa o fio de seda preso na lateral do globo e aproxima-o do cilindro. Em uma determinada distância, a repulsão inicial sentida subitamente se transforma em atração. Aepinus também observa essa mudança repentina eletrificando apenas um pouco o globo, mas eletrificando enormemente o cilindro de metal, sem mover o fio de seda neste caso⁶¹. (19, p. 323-324) Com isso, ele foi capaz de observar os dois cenários por ele discutidos; a saber, os dois corpos sendo aproximados, ou com um corpo muito mais eletrificado do que o outro.

A explicação de Aepinus é mais completa do que a de Johann por, principalmente, um motivo: ele consegue descrever dois cenários nos quais essa atração contraintuitiva ocorre. Aepinus afirma que essa atração elétrica ocorre quando: os dois corpos estão muito próximos, ou quando um é muito mais eletrizado relativamente ao outro. Além disso, ele demonstra os dois casos experimentalmente. Ademais, ele também consegue delinear quando é a atração entre os corpos que deve ocorrer e quando é a repulsão, uma vez que as duas podem ocorrer entre corpos com o mesmo estado elétrico. Ou seja, quando os dois corpos estão muito

⁶⁰ Isto é, para Johann Euler, o éter presente em um corpo estando muito mais comprimido do que o presente no outro.

⁶¹ Aepinus também consegue, depois de mudar a repulsão para atração, voltar a obter a repulsão entre globo e cilindro de metal. Isso afasta, segundo ele, a possibilidade de o fenômeno obtido ser resultado apenas da perda de fluido elétrico dos corpos eletrificados para o ar. (19, p. 324-325)

afastados, a repulsão ocorre, quando próximos, a atração pode ocorrer; raciocínio similar vale para a razão das eletrificações.

Nenhuma consideração desse tipo aparece em J. Euler que, por exemplo, não analisa a troca da repulsão pela atração. Isso é uma consequência do manuseio matemático de Aepinus dos fatores-chave que influenciam a força total de A sobre B. Ademais, a teoria de Aepinus prevê um ponto onde a força entre os corpos é nula, assim como a explicação moderna. (81, p. 60) A explicação de J. Euler, por outro lado, não o discute e nem parece ser capaz de prevê-lo. Vemos em Johann Euler, nesse ponto, uma explicação mais mecanicista e em Aepinus, matemática. Portanto, é a explicação matemática de Aepinus que consegue resolver com profundidade um fenômeno tão complexo, e a mecanicista acaba sendo superficial, não conseguindo, neste caso, articular sua teoria satisfatoriamente.

Nos fenômenos vistos nas últimas três seções, 4.4, 4.4.1 e 4.4.2, observamos um estudo matematizado de fenômenos contraintuitivos ou contraditórios. Neles, a teoria de Aepinus consegue desvelar suas causas e analisá-las em profundidade. Ou seja, a ‘polarização elétrica’ dos corpos é a responsável pelos fenômenos como a atração e a repulsão elétricas, além da atração entre corpos no mesmo estado. Isso fica claro na maneira como Aepinus trabalha as forças que afastam ou atraem o fluido em cada corpo. Experimentos são usados, então, para comprovar seus cálculos. Como vimos, em um caso, seus cálculos o levam a uma contradição com as observações, mas Aepinus não duvida da matemática empregada. Por isso, ele realiza um experimento para demonstrar que tal contradição é aparente. Portanto, ele mostra que seus cálculos estavam corretos, haja vista que neles há, por hipótese, uma ‘polarização’, que de fato ocorre.

Outrossim, no caso da atração elétrica da figura (4.5), Aepinus também é capaz de demonstrar experimentalmente os cenários em que o fenômeno ocorre. Nesse aspecto, vemos uma relação clara e frutífera entre os conceitos trabalhados matematicamente e a experimentação. Sua aplicação da matemática demonstra dois possíveis cenários, um envolvendo a distância dos corpos e outro, a razão de suas eletrificações. Aqui, Aepinus realiza um experimento mostrando que os dois cenários ocorrem. Então, a matemática guia o experimento. Além disso, devido à matematização, sua teoria também é capaz de explicar quando a repulsão ocorre, quando a atração ocorre, além de um ponto de força nula. Isso faz dela muito mais completa do que outras, como a de Johann Euler, que, apesar de conseguir matematizar sua teoria etérea, responde a esse fenômeno de forma insatisfatória, pois J. Euler não consegue levar o estilo mecanicista em sua teoria a de fato explicar as diferentes

circunstâncias em que esse fenômeno ocorre, justamente porque seu uso da matemática é diminuto, tímido.

Ante o exposto, vemos que a matematização toma a forma de um triângulo bastante complexo, constituído da matemática, da teoria e de experimentos, cada um em um vértice. Tomemos o caso da atração elétrica, por exemplo.

Os cálculos realizados por Aepinus pareciam indicar um erro, pois iam na contramão das observações da atração entre os corpos A, eletrizado, e B, no estado natural. Porém, aceitando seus cálculos, Aepinus sugere que havia outro fenômeno por trás dessa atração, a ‘polarização’. Assim, ele complexifica a situação física, figuras (4.4) e (4.5), e, recalculando a força total do caso, nota que é essa ‘polarização’ a responsável pela atração elétrica observada. Para comprovar isso, Aepinus realiza um experimento com uma barra de metal.

Então, na relação matemática-teoria, vemos que matemática influencia a elaboração de um novo pressuposto físico, que ela tinha o poder de sugerir sozinha. Seus cálculos influenciam a configuração física da teoria e os experimentos realizados. Ou seja, a matemática não é só um instrumento a serviço dos pressupostos físicos. Além disso, a matemática também sugere e guia experimentos, como no caso da atração entre corpos no mesmo estado elétrico. Na relação matemática-teoria e matemática-experimento, a matemática pode ser a força motriz. Com isso, a matemática se mostra eficaz em aprofundar explicações sobre os fenômenos elétricos. Veremos nas duas próximas seções mais um exemplo desse frutífero triângulo matemática-experimento-teoria.

4.5 A matematização da garrafa de Leiden, segundo Aepinus

Como vimos no capítulo introdutório, a inesperada e forte descarga produzida pela garrafa de Leiden desafiou várias teorias eletrostáticas a partir de 1746. Quando Aepinus estuda o fenômeno, vários aspectos já eram conhecidos, entre eles o de que o formato da garrafa não influenciava na existência do efeito, apenas em sua intensidade. Em pouco tempo, os experimentalistas começaram a trocar a garrafa por placas de vidro, que eles chamavam de “quadrados de Franklin”. (3, p. 317) Isso explica por que Aepinus estuda os fenômenos relacionados à garrafa sem nenhuma garrafa. Aepinus não relata ter realizado o experimento detalhado abaixo (figura (4.6)); ele o discute como uma proposta de montagem experimental. Isso pode ser visto no começo do parágrafo 45 do *Tentamen*, pois nele o autor afirma que “[...] supor, a seguir, que usemos uma placa plana de vidro; pois, o experimento consegue

igualmente [ser bem-sucedido] com isso como com um vaso em forma de garrafa”. (19, p. 269)

Figura 4.6 – Representação da garrafa de Leiden. ABEF é uma placa de vidro, CD e IK são placas de metal. TS é um fio ligado a um gerador e LM é um fio conectado ao globo da Terra.

Fonte: Adaptada de AEPINUS. (19, p. 313)

Na sua representação, ABEF é uma placa de vidro, CD e IK são placas de metal e TS e LM são fios (ou correntes) feitas de um material não-elétrico (como um metal). Para Aepinus, a eletricidade seria comunicada à placa CD da maneira usual, saindo de um gerador triboelétrico e sendo comunicada à placa através do fio TS. Deste modo, a placa CD é preenchida com fluido elétrico. Com isso posto, Aepinus começa a explicar a eletrização da garrafa de Leiden.

Com a equação (4.2.1), o autor afirma que a força exercida pela placa CD em uma partícula de fluido já presente na superfície da placa IK é igual a $\frac{\alpha r'}{Q}$, onde Q é a quantidade natural de fluido elétrico em CD e α é o excesso de fluido na mesma placa. A placa IK está conectada a um fio, LM, de um material ‘condutor’ que, por sua vez, “não [está] apoiado por corpos elétricos, mas conectada ao globo da própria Terra mediante outros corpos não-elétricos”. (19, p. 269) Para nós, isso significa que a placa IK está aterrada. Assim, as partículas de fluido elétrico na superfície de IK conseguem escapar da placa mediante LM.

Aepinus assume que β é a quantidade de fluido elétrico perdida por IK devido à repulsão proveniente de CD. Com a placa IK perdendo fluido, ela exerce então uma força nas partículas na sua própria superfície. Portanto, a força total que o aparato todo exerce em uma partícula de fluido na superfície de IK é a soma dos efeitos de CD e IK em tal partícula. A

atração de IK sobre essa partícula é $\frac{\beta r}{q}$ e a repulsão de CD, $\frac{\alpha r'}{q}$. Com isso, essa força total é igual a $\frac{\beta r - \alpha r'}{q}$.

No início da eletrização, β tem um valor pequeno e, assim, essa força é repulsiva. Desta forma, sabemos que o fluxo de partícula para fora de IK se mantém e o valor de β segue, então, aumentando. Conforme β aumenta, ele atinge, eventualmente, um valor que zera a força $\frac{\beta r - \alpha r'}{q}$. Isso ocorre quando β atinge o seguinte valor, que Aepinus deduz:

$$\beta = \frac{\alpha r'}{r}. \quad (4.5.1)$$

Aepinus calcula, então, a força em uma partícula na superfície de CD quando β atinge o valor dado pela equação (4.5.1). Para isso, ele usa a expressão da força das duas placas eletrizadas em uma partícula de fluido, que nesse caso é $\frac{\beta r' - \alpha r}{q}$ porque essa partícula está na superfície da placa CD, e obtém que ela é igual a $-\frac{-(r^2 + (r')^2)\alpha}{qr}$. Como r' é menor que r , por ser proveniente da placa mais distante, então a força é repulsiva e cresce conforme mais fluido é adicionado à CD⁶². Assim, essa força nas partículas em CD cresce tanto conforme α cresce que se torna capaz de romper a resistência imposta pelo ar a essas partículas de fluido elétrico. Com isso, a mesma quantidade de fluido que entra em CD, sai pelo ar. Portanto, a eletrização da garrafa de Leiden se estabiliza quando α finalmente atinge um valor constante⁶³. (19, p. 269-270)

Ao final, Aepinus analisa o fato da placa CD, embora preenchida com fluido, “apresenta[r] apenas pequenos sinais de eletrificação” (19, p. 272) quando próximo de um corpo com quantidade natural de fluido q e um excesso de fluido δ . Esse fenômeno ocorre

⁶² Também sabemos que se uma força zera (a força aplicada nas partículas em IK, no caso), a outra não zerará, pois r nunca é igual a r' . A prova dessa desigualdade ($r \neq r'$) reside no fato de que se fossem iguais, teríamos um absurdo. Pois, estaríamos tratando do caso em que as duas placas de metal se encostam, não sendo, portanto, o caso de uma garrafa de Leiden. (19, p. 252-253) Note que essa dedução por absurdo se baseia em um absurdo físico, não em uma proposição matematicamente absurda.

⁶³ Aepinus também considera o caso de a placa CD ser a placa que se torna negativamente eletrizada, apesar de estar conectada ao gerador de eletricidade, e, assim, ter seu fluido elétrico subtraído da quantidade natural. Nesse caso, a placa IK atrairá fluido elétrico mediante LM e, assim, tornar-se-á positiva. Aepinus recupera as expressões anteriores, mas com algumas pequenas mudanças. Por exemplo, a equação (4.5.1) muda para $\beta = \frac{\alpha r}{r'}$, e a força das placas em uma partícula na superfície de CD muda para $\frac{\alpha(r^2 - (r')^2)}{qr'}$. (19, p. 270) Apesar dessas mudanças, os fenômenos que Aepinus estuda para a garrafa de Leiden são explicados por ele nas duas interpretações, CD positiva ou negativamente eletrizada. Seguiremos mostrando as contas com CD positivamente eletrizada.

porque a força da garrafa neste corpo, próximo da placa CD, que é igual a $\frac{\alpha\delta(r^2-(r')^2)}{Qqr}$, é menor que $\frac{\alpha\delta r}{Qq}$ (a força entre dois corpos com excesso de fluido, sem a presença da placa IK).

Essa desigualdade é verdadeira, pois $r - \frac{(r')^2}{r} < r$ sempre. Assim, em ambos os casos, há efeitos elétricos. Porém, eles são menores quando um dos dois corpos que interage eletricamente possui os dois estados elétricos simultaneamente, como uma garrafa de Leiden. (19, p. 272-274)

No estudo de Aepinus sobre a garrafa de Leiden, a configuração empírico-teórica inicial é um conjunto de conceitos teóricos, como a força elétrica, e detalhes da montagem experimental, como a aterragem da placa IK.

Vemos que Aepinus utiliza a álgebra, ou seja, a estrutura matemática escolhida aqui é a algébrica. Assim, a partir da equação (4.2.1), ele constrói a expressão $\left(\frac{\beta r - \alpha r'}{Q}\right)$ e, em seguida, deriva, seguindo essas expressões matemáticas e montagem do experimento, a expressão (4.5.1), a força $\left(-\frac{(-r^2+(r')^2)\alpha}{Qr}\right)$ e a força $\left(\frac{\alpha\delta(r^2-(r')^2)}{Qqr}\right)$, que é menor que a força $\left(\frac{\alpha\delta r}{Qq}\right)$.

Como interpretação a essas expressões, temos, respectivamente, um critério para a eletrização da placa IK, a força do aparato sobre uma partícula na superfície de CD e a comparação entre as forças do aparato em um corpo carregado e a força entre dois corpos carregados (sem garrafa de Leiden envolvida). A única questão que essa explicação matematizada não resolve sozinha é se α cresceria indefinidamente, conforme o gerador triboelétrico que alimenta CD continue a ser utilizado. Para resolver isso, Aepinus pontua que, conforme α cresce, a repulsão sobre as partículas em CD cresce até romperem qualquer resistência imposta pelo ar.

Esse argumento usa uma das expressões derivadas, mas tem um caráter mecanicista, pois se vale de uma resistência física, não-matematizada, entre o ar e o fluido na superfície da placa. Por isso, temos aqui um exemplo do quão imbrincado a interação entre os polos matematização-mecanicismo pode ser. Ou seja, esses dois conceitos *não* são dicotômicos, podendo trabalhar juntos em uma explicação, semelhante ao caso da seção 4.3.

Podemos finalmente comparar as explicações de Aepinus e Franklin. Sobre a garrafa de Leiden (com o experimentador aterrado), Benjamin Franklin descrevera a Peter Collinson, em julho de 1747, como entendia o processo de eletrização da garrafa:

ao mesmo tempo que o fio e o interior da garrafa, etc., é eletrizado *positivamente* ou *mais*, o exterior da garrafa é eletrizado *negativamente* ou *menos*, em exata proporção. Isto é, qualquer que seja a quantidade de fogo elétrico jogada para

dentro, uma igual quantidade sai do exterior. Para entender isso suponha a quantidade comum de eletricidade em cada parte da garrafa, antes da operação começar, é igual a vinte e cada esfregada do tubo [que eletriza a garrafa] adiciona um no interior. Depois da primeira esfregada, a quantidade contida no fio [que conecta o interior da garrafa ao tubo ou gerador] e na parte de dentro da garrafa será vinte e um, e o exterior será dezenove. [...] Até depois de vinte esfregadas, a parte interna terá uma quantidade de fogo elétrico igual a quarenta, e a parte externa, zero. Nesse momento a operação acaba, visto que não se pode colocar mais no interior quando não se consegue retirar mais [fluido] do exterior. (17)

O argumento de Franklin exposto acima tem dois aspectos distintos. Primeiramente, o quantitativo, já que se baseia na *quantidade* de fluido que entra e sai das superfícies (e dos revestimentos) da garrafa. Depois, há um aspecto mecanicista, pois sua explicação funciona como um mecanismo, uma engrenagem – a quantidade que entra empurra a quantidade que sai, mas sem preencher o vidro, devido à impermeabilização já mencionada, criando dois estados distintos. Por outro lado, Aepinus explicava a eletrização da garrafa com o uso da ação à distância e expressões deduzidas matematicamente.

As duas teorias explicam o fenômeno da garrafa; isto é, ambas se aprofundavam nas causas⁶⁴ e no funcionamento da eletrização da garrafa de Leiden. Porém, elas são epistemologicamente distintas porque uma delas utiliza uma nova estrutura, com novas possibilidades: a matemática. Nesse aspecto, vemos aqui a mudança epistemológica que a matemática causou na física descrita pelo historiador Yves Gingras (31) em seu artigo discutido na seção 2.1.

Para além disso, no estudo sobre o fenômeno da garrafa, Aepinus consegue corrigir a teoria de Franklin, pois sua equação (4.5.1) mostra um erro nas suposições do estadunidense. Veremos mais sobre isso na seção seguinte, onde a matemática corrige uma suposição física e guia um experimento.

4.6 Uma correção à teoria de Franklin

As teorias de Franklin e Aepinus possuem uma nítida diferença a respeito da eletrização da garrafa de Leiden. Franklin supôs que a *mesma quantidade* de fluido adicionado ao interior da garrafa seria ejetada pelo exterior dela. Distintamente, Aepinus *deduz matematicamente* que essas quantidades, nomeadas α e β por ele, *não* são iguais.

⁶⁴ O papel da causalidade nas explicações científicas (isto é, da explicitação das causas de um fenômeno) ainda é um tópico de debate na filosofia. Não há consenso sobre a necessidade de apontar as causas de um fenômeno em uma explicação (científica), sendo possível encontrar argumentos de que nem todas as explicações são causais. (40, p. 2) Mesmo assim, pelo menos neste caso, Aepinus e Franklin procuram explicitá-las. Para Franklin, a causa está no desequilíbrio (mecânico) que o fluido entrando exerce no fluido do outro lado da garrafa. Para Aepinus, está na força da placa CD sobre as partículas em IK, aliada a uma saída para estas através do fio LM.

Assim, as duas teorias discordam. Aepinus nota essa divergência e questiona o estadunidense quando afirma que “*Franklin* cometera um erro que temos a oportunidade de corrigir agora”. (19, p. 286) Na notação matemática do *Tentamen*, Franklin considerou, segundo Aepinus, que “quando a garrafa é preenchida com eletricidade, [...] ele supõe α sempre igual a β . Mas nós provamos no § 45 acima que $\beta = \frac{\alpha r'}{r}$ e, porque $r > r'$, essa quantidade é sempre menor que α ”. (19, p. 286)

Para justificar sua suposição, Franklin se apoiou em um experimento apresentado na já citada carta endereçada a Peter Collinson, datada de julho de 1747. Nesse experimento, um homem, de pé sobre um chão de cera (portanto, isolado), recebera o choque de uma garrafa de Leiden carregada. Após o choque, esse homem continuava apresentando o mesmo estado elétrico que possuía antes do choque. (17) Aepinus analisa esse experimento, descrevendo-o matematicamente, a fim de analisar e explicar a divergência mencionada.

A descrição matemática que Aepinus faz desse experimento é a seguinte: a quantidade natural de fluido do experimentador é igual a q , a parte externa da garrafa (superfície externa e seu revestimento) tem uma quantidade natural igual a Q , assim como a parte interna dela (superfície interna e seu revestimento), que também tem valor Q . Por isso, a quantidade natural do conjunto todo – o experimentador segurando a garrafa – é igual a $2Q + q$.

Com isso, Aepinus define um valor m , tal que $m = \alpha - \beta$, onde α e β são, respectivamente, o excesso de fluido em uma superfície da garrafa (placa CD) e a deficiência de fluido na outra superfície (placa IK). Em resumo, para Franklin, o experimento do choque sugere que $m = 0$, para Aepinus, a matemática indica que $m \neq 0$.

No caso de o sistema estar eletrificado, a quantidade de fluido na superfície interna é, segundo Aepinus, igual a $Q + \beta + m$, na superfície externa ela é igual a $Q - \beta$. Após o choque (ou após a produção de faíscas), a quantidade de fluido elétrico no sistema todo é igual a $2Q + q + m$, o que equivale a soma das quantidades de fluido elétrico em cada parte do sistema; $Q - \beta$ da superfície externa, $Q + \beta + m$ da superfície interna e q do experimentador.

Se m for positivo, o homem e a garrafa apresentariam um estado de eletrização positiva. Se m for negativo, o estado seria o negativo. Porém, se nenhuma das partes do sistema (experimentador e garrafa) apresentasse eletrização, teríamos $m = 0$ e, portanto, $\beta = \alpha$. Este último resultado é, em suma, aquele relatado por Franklin. Aepinus conclui, após essa análise matemática, que o estadunidense raciocinou de maneira adequada e correta. (19, p. 286-287)

Entretanto, Aepinus não se dá por satisfeito com o resultado de Franklin, já que ele ia contra seus cálculos sobre a eletrização da garrafa, e, usando a expressão (4.4.1), investiga a razão do experimento de Franklin sugerir que $m = 0$. Conforme o autor, a força do sistema todo sobre um corpo (digamos, um pequeno pêndulo) de quantidade natural q' e excesso δ de fluido elétrico é igual a $\frac{mr\delta}{(2Q+q)q'}$. Quando m é muito pequeno com relação ao valor $2Q + q$, a força se torna muito fraca para ser detectada com facilidade. Isso poderia explicar o resultado do estadunidense, mas, para se assegurar disso, Aepinus investiga as condições experimentais de Franklin que poderiam levar o valor m a ser muito menor que $2Q + q$.

O autor do *Tentamen* elenca quatro motivos para afirmar que esse seria o caso: 1) Franklin usou uma garrafa de pequena massa para evitar que o choque fosse muito forte; 2) a garrafa foi pouco eletrificada, pelo mesmo motivo; 3) a massa do experimentador e, portanto, sua quantidade natural de fluido elétrico, “que é proporcional à sua massa” (19, p. 287), seria muito grande; e, 4) como a garrafa seria fina, logo r' (a força da superfície interna em uma partícula de fluido na superfície externa) seria pouco diferente de r (a força da superfície externa em uma partícula de fluido nela), então β , igual a $\frac{\alpha r'}{r}$, teria valor aproximado ao de α . (19, p. 287)

Em resumo, se o choque for fraco, como nos casos (1) e (2), β e α seriam muito pequenos e, portanto, difíceis de distinguir em um experimento. Se a quantidade natural do experimentador é grande (q é grande), então a força gerada pela garrafa sobre um pêndulo (ou um versório qualquer), proporcional à m , seria muito pequena, dificultando a observação. Agora, se a garrafa não for grossa, então $m \approx 0$, também dificultando a observação.

Nenhuma das condições experimentais acima aparece na carta de Franklin. Trata-se de inferências feitas por Aepinus baseadas em duas frentes – seus conhecimentos experimentais e seu raciocínio matemático. A frente experimental advém dos conhecimentos comuns da época; a título de exemplo, já se sabia que garrafas mais grossas causavam choques mais fracos⁶⁵ e que superfícies maiores causavam choques maiores. (3, p. 317-318) A frente matemática aparece, por exemplo, na quarta condição, baseada na garrafa ser fina, cujo raciocínio é regido pela equação (4.5.1). Aqui, observamos que essas duas frentes, que

⁶⁵ Aepinus conseguiu demonstrar essa relação matematicamente. No *Tentamen*, ele prova que a quantidade de fluido elétrico adicionada à placa CD no experimento da garrafa de Leiden é inversamente proporcional a $(r^2 - (r')^2)$. Nesse caso, quanto maior a distância entre os valores de r e r' ; isto é, quanto mais grossa for a placa (ou garrafa) de vidro, menor será a quantidade de fluido elétrico nela e, assim, mais fracos serão seus choques. (19, p. 271)

representam uma relação matemática-experimento neste contexto, interação construtivamente.

Aepinus, como já vimos, prima pela matemática e, assim, não se satisfaz com o resultado relatado pelo estadunidense. Ele se põe, então, a refazer o experimento do choque “de modo que m seja suficientemente grande com respeito à quantidade $2Q + q$ ”. (19, p. 287) Ou seja, o experimento precisa ser repensado de maneira a afastar m do valor nulo. A relação matemática-experimento, que vimos interagir, culmina com a matemática guiando a montagem experimental do autor. Assim, ele procura fazer o experimento com as placas bem separadas, aumentando a diferença entre r e r' . Para garantir que o choque não fique muito fraco, o que faria seu experimento recair nos problemas (1) e (2) vistos acima, ele usa duas placas de ampla superfície⁶⁶. (19, p. 285)

Nessas condições, Aepinus realiza o experimento, recebendo o choque ele mesmo e mantendo-se de pé sobre piche (ou seja, isolado). Ele descreve o observado da seguinte maneira: “se eu eletrizasse a placa principal [a que ele toca] positivamente, eu sempre ganhava eletricidade positiva [estado elétrico positivo]. E se eu a eletrizasse negativamente, sempre ganhava eletricidade negativa”. (19, p. 288) Portanto, o experimento é bem-sucedido e confirma que $m \neq 0$, o que ele atribui a dois fatores: I) as superfícies das placas serem suficientemente grandes; e II) as placas estarem distantes o suficiente para r' diferir significativamente de r . Pois, assim, β e α diferiam o suficiente entre si. (19, p. 288)

O fator (I) não é consistente com a sua teoria. Pois, já que as placas eram grandes, podemos supor que ambas possuem altas quantidades naturais de fluido elétrico, $2Q$, e, assim, manteriam m relativamente pequeno se comparado a $2Q + q$. O fator (II), por outro lado, é consistente para explicar seu sucesso, sendo justamente aquele que mais relaciona os lados experimental e matemático da montagem descrita no *Tentamen*.

Em conclusão, a expressão (4.5.1), deduzida matematicamente no *Tentamen*, indica que $\beta \neq \alpha$. Porém, a teoria do fluido elétrico de Franklin, da qual a teoria elétrica de Franz Aepinus faz uso, supunha que $\beta = \alpha$. Tal discrepância foi notada pelo autor do *Tentamen*, que investigou o experimento no qual Franklin havia se baseado. Com o apoio de seus raciocínios experimental e matemático, Aepinus refaz o experimento do estadunidense e confirma o resultado (4.5.1). Como vimos, a matemática usada no *Tentamen* causa uma

⁶⁶ Aepinus usa duas grandes placas de madeira, cada uma coberta por uma folha de metal. Além disso, ele não as separa com vidro, pois já havia conseguido obter o choque da garrafa de Leiden separando-as apenas pelo ar. (19, p. 285)

discrepância entre teorias. Além disso, ela guia a montagem experimental do autor na direção de uma resolução para essa divergência.

Portanto, seguindo a concepção inferencial a respeito da aplicação da matemática nas ciências, vimos que a montagem experimental da garrafa de Leiden é parte essencial no uso da matemática para explicar sua eletrização. Aqui, o sentido da relação matemática-experimento é do experimento para a matemática. Após uma série de deduções matemáticas, Aepinus se depara com uma divergência entre seu resultado e um experimento de Franklin. Então, ele analisa o experimento do estadunidense, teorizando insuficiências neste e refazendo-o de maneira a confirmar seus cálculos. Aqui, o processo de análise experimental e montagem de um experimento mais preciso por Aepinus foi encabeçado pelos resultados de seus cálculos; mais especificamente, a expressão (4.5.1). Isto é, o processo é encabeçado pela sua matematização. Ou seja, neste último ponto o sentido da relação matemática-experimento muda, sendo agora da matemática para o experimento. Com isso, temos uma influência mútua bastante rica que ajuda Aepinus a defender sua teoria e seus cálculos face a um resultado que a desproveria.

Ademais, essa matematização adicionou testabilidade à sua teoria, pois, caso não houvesse eletrização no experimentador após o choque, o resultado matemático de Aepinus teria que ser revisto, ou ele seria obrigado a explicar seu insucesso experimental.

4.7 Conclusões

Ao longo deste capítulo vimos as diversas formas nas quais a matematização opera no trabalho de Franz Aepinus sobre eletricidade. Em resumo, vimos como a matemática abre possibilidades para novos tipos de hipóteses. Assim, ela dialoga construtivamente com as hipóteses físicas, que pertencem à configuração empírico-teórica (como definida no capítulo 2).

Observamos também como há dois limites em um processo de matematização. Um deles é devido à teoria e seu contexto histórico. Neste caso, a matematização é circunscrita pelas possibilidades da teoria e da época. Outro, resume-se ao caráter polivalente da matemática, que por vezes consegue oferecer cálculos consistentes que resultam em interpretações físicas opostas.

Também vimos, ao longo da seção 4.4 e das subseções 4.4.1 e 4.4.2, que a matemática pode ser a força motriz na articulação de uma teoria. Neste caso, ela apresenta novos artifícios e táticas para resolução de contradições e resultados contraintuitivos que o desenvolvimento

de uma teoria pode, eventualmente, encontrar. Com isso, a matemática pode sugerir pressupostos físicos, que pertencem a configuração empírico-teórica, e guiar o objetivo e a montagem proposta de um experimento. Logo, as relações matemática-teoria-experimento aparecem como uma tríade onde a matemática assume caráter essencial, impondo-se sobre os outros dois conceitos em determinados aspectos. Essas complicadas relações de mão dupla foram mais aprofundadas nas seções 4.5 e 4.6.

Podemos resumi-las em um triângulo. Nele, cada conceito é um vértice. O primeiro vértice é a teoria. Mais especificamente, esse vértice é constituído de toda a estrutura empírico-teórica, composta de entidades observáveis e não-observáveis que compõem uma teoria física, além dos pressupostos físicos sobre tais entidade e suas relações entre si. A concepção inferencial usa esse mesmo conceito (isto é, estrutura empírico-teórica), como pode ser visto na figura (2.1), seção 2.3.

Em um outro vértice temos a experimentação, constituída das várias formas de se observar a natureza, por observação direta ou experimentação controlada e planejada. Como último vértice temos a estrutura matemática sendo usada no processo de matematização. Cada vértice atua como uma camada de um sistema, assim todas elas interagem. As arestas desse triângulo mostram suas interações como vias de mão dupla.

Com isso, podemos montar a figura abaixo, (4.7), onde resumimos de maneira mais completa essas influências. Claro que não temos a intenção de esgotar todas as possíveis maneiras com que a teoria, a matemática e a experimentação interagem, haja vista que tal empreendimento envolveria um recorte histórico muito maior que o desta tese. Porém, mesmo reduzindo as possibilidades de interação devido ao escopo deste trabalho, podemos ver o seguinte diagrama das relações matemática-teoria-experimento. Nela, notamos que algumas etapas da concepção inferencial (CI) terminam englobadas pelo nosso esquema sobre a matematização; discutiremos isso logo após a imagem.

Figura 4.7 – Representação da relação entre o aparato matemático (ou, apenas, matemática), experimentos (ou, apenas, experimentação) e configuração empírico-teórica (ou, como sinônimo aqui, teoria) em um trabalho científico matematizado. Nela, podemos observar que cada uma desses vértices funciona como uma camada, interagindo com as outras de diferentes formas. Além disso, as etapas presentes na concepção inferencial (CI) terminar modeladas aqui como parte de nosso diagrama esquemático.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, as etapas de imersão e interpretação, que vimos no capítulo 2, fazem parte da matematização de uma teoria, como já mencionamos ao longo deste capítulo. Porém, a matematização não se resume a elas. A figura (4.7) resume o que concluímos neste capítulo; isto é, que a matemática também norteia e conduz as outras camadas de um trabalho científico, como a montagem experimental e a produção de hipóteses físicas, para além de etapas interpretativas de cálculos e derivações matemáticas.

5 O estilo de matematização em Charles-Augustin Coulomb

Neste capítulo, discutiremos algumas características do processo de matematização dos estudos sobre eletrostática desenvolvidos por Charles-Augustin Coulomb. Para isso, iniciaremos com uma breve biografia de Coulomb e contextualizaremos seus estudos sobre eletricidade à luz da chegada da teoria elétrica de Aepinus na França. Em seguida, resumiremos seus resultados experimentais sobre a dependência das forças elétricas repulsiva e atrativa com a distância como uma culminação experimental dos trabalhos de caráter newtoniano na eletrostática.

Ao final (seção 5.5), veremos como Coulomb deduz matematicamente a distribuição de fluido elétrico em um condutor utilizando a hipótese de um único fluido elétrico. Entretanto, ele mesmo defendia a existência de dois fluidos, não apenas um. Sua dedução não valia para a teoria de dois fluidos elétricos, mas Coulomb não nota esse problema. Por isso, concluímos o capítulo na seção 5.7 mostrando que a matematização em Coulomb não criou interações construtivas entre os polos matemático e mecanicista das explicações científicas da época. Pelo contrário, ele é um exemplo de interação antagônica, pois há atrito entre esses dois polos.

5.1 Uma breve biografia de Charles-Augustin Coulomb

Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) nasceu em Angolema, França, filho de Henry Coulomb (1706-?) e Catherine Bajet (1711-?). Seu pai havia começado uma carreira como militar, mudando depois para um posto administrativo. Neste tipo de cargo, Henry Coulomb e sua família se mudavam bastante, conforme os interesses do Estado. Por isso, a família de Coulomb acabou morando em Paris, onde seu filho iniciou seus estudos, possivelmente na *Collège de quatre-nations*. Era um colégio de sólida reputação no ensino de matemática, Joseph-Nicolas Delisle (1688-1768), Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) e Antoine Lavoisier (1743-1794) estudaram lá. Não demorou muito para que Charles Coulomb demonstrasse interesse em se tornar matemático. Devido a dificuldades financeiras, Henry Coulomb não pôde ficar em Paris e a família se mudou para Montpellier. (82, p. 3-5)

Lá, Charles-Augustin Coulomb, por intermédio de um familiar, conheceu a Sociedade Real de Ciências de Montpellier (*Société Royale des Sciences de Montpellier*), diante à qual apresentou, aos 21 anos, seu primeiro trabalho sobre matemática. Coulomb poderia ter

seguido uma carreira intelectual em Montpellier, mas decidiu procurar uma mudança profissional, ingressando na *Ecole du génie*, uma importante escola para engenheiros do exército, em 1760. Assim, Coulomb seguiu um caminho mais próximo do que chamamos hoje de física do que matemática, essa guinada marcou sua carreira acadêmica. Depois de Montpellier, seus trabalhos publicados foram todos em torno de mecânica aplicada e engenharia e, posteriormente, eletricidade e magnetismo. (82, p. 5-9)

Em 1781, Coulomb pôde firmar sua moradia em Paris e, no final daquele ano, foi eleito membro da Academia Real de Ciências de Paris (*Académie Royale des Sciences*), para onde ele já havia enviado alguns trabalhos⁶⁷. Com isso, sua carreira afastou-se da engenharia e aproximou-se de estudos de filosofia natural e filosofia experimental, semelhantes ao que entendemos hoje como física. (82, p. 37-41) É nessa fase que ele publica seus trabalhos sobre a eletricidade. O primeiro trabalho de Coulomb nesse assunto, que consiste em uma balança de torção usada para medir a dependência da repulsão elétrica com a distância, data de 1785. O segundo, o terceiro e o quarto trabalhos, de 1787, o quinto é de 1788 e o sexto, 1790. (82, p. 182)

Coulomb admirava o trabalho de Franz Aepinus e seu livro, o *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi* (82, p. 176-177), tendo sido influenciado por ele. Tanto que é possível notar uma maior distância metodológica entre os trabalhos de Coulomb e os de Franklin do que entre os de Coulomb e os de Aepinus. Parte dessa distância acontece pela aceitação de Coulomb da ação à distância, na esteira do newtonianismo da época. Além disso, outra parte se dá devido ao uso da matemática em Coulomb que, consequentemente, aproximava-o de Aepinus. Mas, apenas o uso da matemática não explica essa aproximação, já que seu trabalho não é parecido com o de Johann Euler, que também é matematizado. Nesse sentido, a semelhança entre Aepinus e Coulomb acontece porque utilizam a matemática com estilos semelhantes, apesar de não serem completamente iguais, como ficará claro.

Ressaltamos, a seguir, a influência de Aepinus na França, como parte do contexto histórico no qual Coulomb estava inserido.

5.2 Como o *Tentamen* chegou na França?

Em junho de 1759, Aepinus conseguiu que seu livro fosse impresso como um suplemento à revista da Academia russa, a *Commentarii*. Isso permitia que seu livro fosse

⁶⁷ Como um de 1777 sobre bússolas magnéticas. (83)

divulgado junto com a revista pelos canais de comunicação da Academia, que continha mais de quarentena membros estrangeiros na época. Entretanto, apenas doze cópias foram oferecidas para a distribuição pela chancelaria. Como a Academia era longe dos principais centros acadêmicos da Europa, a dificuldade de propagação poderia afetar a divulgação das ideias de Aepinus. Com essas cópias, contudo, Aepinus conseguiu evitar um afastamento completo dos círculos acadêmicos europeus. Até o fim dos anos de 1760 o livro aparecera em cidades como Berlim, Leipzig e Frankfurt. (19, p. 189-190)

Aepinus também divulgou seu livro mais pessoalmente quando, por exemplo, enviou uma cópia para o britânico Benjamin Wilson, com quem havia trocado correspondências sobre as propriedades elétricas do cristal de turmalina. Foi Wilson quem o apresentou à prestigiada Academia de Ciências de Londres (*Royal Society of London*), em novembro de 1762.

Henry Cavendish (1731-1810) provavelmente comprou sua cópia do *Tentamen*, em Londres, em junho de 1766. Além disso, uma cópia já circulava em Londres antes, pertencente a John Canton. Aliás, Joseph Priestley (1733-1804) possivelmente usou essa cópia quando trabalhava em seu livro *The History and Present State of Electricity*. Aepinus também enviou uma cópia a Franklin, que a recebeu em novembro de 1762⁶⁸. (19, p. 191-192)

Na França, para Nollet e seus apoiadores, a obra de Aepinus estava muito afastada de suas ideias e, devido a uma certa incomensurabilidade, qualquer experiência de troca de informação entre essas teorias ficara debilitada e ruidosa. (19, p. 201) As ideias de Aepinus provavelmente não chegaram a Coulomb por Nollet e seus apoiadores, mas sim por apoiadores de Franklin, já que Benjamin Franklin se interessou pelo livro de Aepinus e o divulgou para diversos de seus correspondentes; entre eles, o francês Jacques Barbeu Dubourg (1706-1779).

Em uma carta de 10 de março de 1773 a Dubourg, Benjamin Franklin descreve os pontos básicos da teoria magnética de Aepinus. Essa carta aparece traduzida para o francês pelo destinatário quando ele preparava um livro sobre a filosofia natural de Benjamin Franklin, especialmente sobre sua teoria da eletricidade. (84, p. 277-279) Nela, “o excelente filósofo de Petersburgo, Sr. Aepinus” tem sua teoria magnética elogiada como “engenhosa e sólida”. (84, p. 279) Além disso, Aepinus aparece na parte final do livro, quando Dubourg analisa paralelamente os trabalhos de Franklin e Nollet.

⁶⁸ Franklin agradeceu esse envio em uma carta a Aepinus datada de junho de 1766. (86, p. 12)

Portanto, Aepinus era conhecido (e elogiado) por importantes pesquisadores sobre eletricidade, ao lado de Musschenbroek e Benjamin Wilson. (84, p. 335) Além disso, em 1771, o livro de Priestley sobre a história da eletricidade ganhou uma versão em francês onde o trabalho de Aepinus é mencionado. (85)

Jean Baptiste Le Roy (1720-1800), importante apoiador das ideias de Franklin na França, era amigo da família de Coulomb. (82, p. 7-8) Portanto, não é difícil imaginar que a obra do eletricitista de São Petersburgo tivesse sido citada em conversas pessoais ou cartas entre Le Roy e Coulomb. Seu interesse em Aepinus também pode ter sido estimulado pela leitura das obras de – ou sobre – Franklin em francês. Qualquer que tenha sido a forma específica com que Coulomb soube de Aepinus, ele, em seu trabalho de 1777 sobre magnetismo, cita um experimento envolvendo magnetos que aparece no *Tentamen* – e cita Aepinus nominalmente. (83, p. 185)

Nesse trabalho, Coulomb trata das teorias vigentes para o magnetismo. Em primeiro lugar, ele critica a teoria mais comum da época para o magnetismo – a dos vórtices. Coulomb se opõe a ela em prol de uma visão mais newtoniana de ação à distância para a atração e a repulsão. (82, p. 176-180) Porém, ele também trata de duas outras teorias, a de dois fluidos magnéticos, que ele identifica como uma teoria de Anton Brugmans (1732-1789) e Johan Carl Wilcke, e a de um fluido magnético, que ele atribui a Aepinus. (83, p. 256-258) Coulomb termina por criticá-las, pois não as considerava aptas a explicar todos os fenômenos magnéticos, em especial a partição de um magneto em dois menores. (82, p. 180-182) Portanto, qualquer que tenha sido a forma com que Coulomb soube de Aepinus, ele mostra que leu o *Tentamen* e estava familiarizado tanto com a suas teorias para a eletricidade e o magnetismo quanto com a sua forma físico-matemática de argumentar.

Além de boa formação em matemática, Coulomb era bastante familiarizado com técnicas experimentais. Dessa forma, ele pode ser visto como uma boa fonte de divulgação da obra de Aepinus e, na esteira disso, uma boa fonte de articulação para o estilo de matematização presente no *Tentamen*.

A teoria elétrica de Aepinus se difundiu na França apenas por volta dos anos de 1770 e 1780⁶⁹. A título de exemplo, Joseph-Aignan Sigaud de Lafond (1730-1810) se vale dela, em 1781. Depois, Georges-Louis Leclerc (1707-1788), o conde de Buffon, também a cita, em 1788. (19, p. 214-220) Ou seja, o interesse pela teoria de Aepinus na França veio na esteira da

⁶⁹ Por volta de 1765, ainda era muito difícil encontrar uma cópia do *Tentamen* na França. Isso fica evidente quando um francês apoiador das ideias de Franklin, Jean Baptiste Le Roy, pede que Benjamin Wilson traga uma cópia do *Tentamen* de Londres para Paris, pois não conseguia encontrar nenhuma em sua cidade. Infelizmente, Wilson parece ter esquecido desse pedido devido a problemas pessoais. (19, p. 213)

aceitação da teoria de Franklin por lá, que ocorreu ao longo dos anos de 1770 e início dos de 1780, quando ela começou a tomar o espaço da teoria de Nollet. (21) Não obstante, esse interesse veio acompanhado de disputas entre a teoria de um fluido e a de Robert Symmer, que postulava a existência de dois fluidos elétricos. (23, p. 19)

Coulomb começou a publicar seus trabalhos sobre eletricidade a partir de 1785, com uma obra sobre magnetismo antes, em 1777. Essas datas são próximas da publicação da principal obra de divulgação sobre Aepinus em toda a Europa, em 1787, escrita pelo francês e membro da Academia Real de Ciências (*Académie Royale des Sciences*) de Paris René-Just Haüy (1743-1822).

O livro de Haüy se intitula *Exposition raisonnée de la théorie de l'électricité et du magnétisme, d'après les principes de M. Aepinus*. Em resumo, é uma apresentação das ideias de Aepinus, sem matemática, para não afastar o leitor menos familiarizado com ela. Haüy chama o leitor que conhece matemática de “físico geômetra”, e diz que estes poderiam procurar os detalhes dos cálculos no próprio livro original. Ademais, Haüy analisa com mais profundidade certos fenômenos não discutidos (ou apenas citados) por Aepinus, como o poder das pontas, e atualiza o livro de Aepinus com o resultado experimental de Coulomb de 1785 – a medição da relação entre repulsão elétrica e distância com a balança de torção. René Haüy queria que “[essa] obra tão pouco conhecida” ganhasse o lugar de respeito que, segundo ele, ela merecia “na História das Ciências”. (71, p. xxvii)

A academia parisiense montou um comitê em 24 de março de 1787 para redigir um relatório sobre o livro de Haüy formado por Coulomb, Laplace (1749-1827), Legendre (1752-1833) e Cousin⁷⁰. (87)⁷¹ O relatório do comitê impresso junto com o livro de Haüy elogia bastante o *Tentamen*. Para eles, a “obra do Sr. Aepinus é sem dúvida uma dessas que devem fazer época na História das Ciências”. Ela também “possui o mérito da exatidão que os cálculos a introduziram. Exatidão que só pode acontecer em uma ciência já aperfeiçoada”. (71, p. xxviii-xxx) O relatório, presente também no *Procès-verbaux* de 21 de julho de 1787, é assinado apenas por Laplace, Cousin e Legendre. (88)⁷² Coulomb não participou de sua confecção, pois havia viajado para a Inglaterra logo após ser nomeado para o comitê. (82, p. 176) Mesmo assim, Coulomb certamente compartilhava dos elogios. O livro de Haüy chegou a receber uma edição em alemão, ajudando na expansão das ideias presentes no *Tentamen*. (19, p. 222)

⁷⁰ Provavelmente o matemático Jacques Antoine Joseph Cousin (1739-1800).

⁷¹ O relatório dessa reunião pode ser lido em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k557829/f251.item.r=28>.

⁷² O relatório dessa reunião pode ser acessado em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k557829/f580.item.r=28>.

5.3 O primeiro trabalho de Coulomb em eletrostática: a repulsão elétrica

Em 1784, Coulomb apresentou um trabalho sobre torções em um fio de metal, chegando a uma equação geral que relaciona o momento da força de torção do fio – próximo à nossa ideia de torque – com o ângulo que configura tal torção. Nela, temos que $M = \frac{\mu B D^4}{l}$, onde M é o momento (torque), B é o ângulo, μ é uma constante que depende do material do fio, D é o diâmetro do fio e l é seu comprimento⁷³. (82, p. 150-156)

Em 1785, Coulomb publica seu primeiro trabalho sobre a eletricidade. Era um experimento envolvendo uma balança de torção, fazendo uso da fórmula geral encontrada em 1784. Seu objetivo era descobrir a relação (isto é, a lei de função) entre a força elétrica entre dois corpos eletrizados e a distância entre eles. A figura (5.1) ilustra esse experimento.

Figura 5.1 – Imagem ilustrando o experimento de Coulomb sobre a dependência da força de repulsão elétrica para com a distância. Nela, a montagem completa aparece à esquerda, em destaque. Cada pedaço que constitui a montagem aparece em lugares diferentes da imagem: nesse caso, em sequência de cima para baixo e da direita para a esquerda, o micrômetro preso ao fio que é torcido no experimento; a parte inicial do tubo no qual esse fio se encontra; a balança, composta de uma bola eletrizável e um contrapeso; o objeto usado para eletrizar as duas bolas; por último, a bola inserida no buraco não concêntrico do cilindro de vidro. O artigo de Coulomb possui uma imagem ilustrativa semelhante, mas de baixa qualidade, esta imagem foi retirada de outra referência.

Fonte: POTIER. (90, p. 109)

⁷³ Sobre os experimentos de 1784 e seu contexto histórico, além do livro de Gillmor (1971, p. 139-174), pode-se consultar também: (89).

A montagem, presente na figura acima, consistia em um cilindro de vidro tampado cuja lateral possuía uma escala para medir ângulos. A tampa tinha dois buracos, por um deles pendurava-se uma pequena bola de material elétrico *per se* (isolante), pelo outro, uma balança. Essa balança tinha uma bola igual a primeira, com um contrapeso do outro lado. Ela era pendurada por um fio de metal preso a um micrômetro que torcia o fio e que possuía uma gradação para medir ângulos. Para eletrizar as duas bolas, Coulomb usava um alfinete eletrizado e isolado eletricamente. Ele tocava o alfinete nas duas bolas, assim elas se afastavam. Coulomb media esse afastamento em ângulos pela gradação no cilindro de vidro, anotando também o ângulo marcado no micrômetro. Em seguida, ele girava o micrômetro, torcendo o fio, para diferentes valores e anotava os novos resultados da distância, medindo assim a gradação lateral do cilindro. (82, p. 182-184; 91, p. 569-572) Coulomb apresenta apenas três resultados de medidas da seguinte forma:

Eu [Coulomb] apresentarei aqui somente alguns testes que são fáceis de serem repetidos e que colocam rapidamente em evidência sob os [nossos] olhos a lei da repulsão.

Primeiro teste: tendo eletrizado as duas bolas com uma cabeça de alfinete, o índice do micrometro encontrando-se no 0, a bola *a* da agulha [a balança] é afastada da bola *t* por 36 graus.

Segundo teste: Tendo torcido o fio de suspensão [que suspende a balança] por meio do [giro] do botão 0 do micrometro [até] 126 graus, as duas bolas se aproximam e param a 18 graus de distância uma da outra.

Terceiro teste: Tendo torcido o fio de suspensão por 567 graus, as duas bolas se aproximam a 8 graus e meio [uma da outra]. (91, p. 572-573)

O momento da força (torque) no fio é linearmente proporcional à força que torce o fio. Como essa torção é resultado da força elétrica que afasta as duas bolas, então temos que o torque é proporcional à repulsão elétrica. Consequentemente, a análise dos resultados é por meio do torque M do fio, que no primeiro caso é $M_{36^\circ} = k36^\circ$, onde k é uma constante. No segundo teste temos que a distância é de 18° , mas o fio foi torcido 126° , resultando em um ângulo de torção total de 144° e, assim, $M_{18^\circ} = k144^\circ$. A distância cai pela metade, de 36° para 18° , e o torque quadruplica nessa aproximação, pois $\left(\frac{M_{18^\circ}}{M_{36^\circ}}\right) = 4$. O mesmo ocorre entre o segundo e o terceiro testes. No terceiro, tem-se $M_{8,5^\circ} = k576,5^\circ$, onde $8,5^\circ$ é aproximadamente a metade da distância anterior, 18° . A razão entre os torques é, então, $\left(\frac{M_{8,5^\circ}}{M_{18^\circ}}\right) \approx 4$. (91, p. 573-574)

Com esses resultados Coulomb sustenta sua “lei fundamental da eletricidade” de que “a força repulsiva de duas pequenas bolas eletrizadas da mesma natureza elétrica é em razão inversa do quadrado da distância do centro das duas bolas”. (91, p. 572) Pois, como a diminuição da distância por um fator de dois gera um aumento por um fator de quatro no

torque, então a força elétrica, proporcional ao torque, segue uma lei do inverso do quadrado com relação à distância. Essa montagem experimental não era capaz de analisar a atração elétrica, já que se as duas bolas tivessem eletricidades opostas, atrair-se-iam até o toque, anulando assim seus estados elétricos e impossibilitando qualquer medição.

Algumas considerações nos cálculos de Coulomb merecem comentários. Por exemplo, a distância entre os centros das bolas não deveria ser medida pelo ângulo do arco entre as bolas, mas sim pela corda de arco que cruza esses dois centros. Da mesma forma, o braço no qual a bola eletrizada se encontra, onde a força é, portanto, exercida, não é igual a metade do tamanho da balança, mas é essa metade projetada na ortogonal da corda de arco. Ou seja, o braço é a metade da balança multiplicada pelo cosseno da metade do ângulo do arco. Coulomb nota essas duas considerações. Porém, ele argumenta que mudar a medida da distância, do ângulo para a corda, diminui a distância, aumentando a força e, com isso, o torque. Entretanto, mudar a medida do braço da balança por um cosseno causaria um efeito contrário. Assim, esses dois fatores se compensam caso o ângulo entre as bolas não supere 25 a 30°, justificando as aproximações (91, p. 575-576); analisemos isso em maior detalhe abaixo.

Coulomb não é claro nesse ponto, assim como o historiador S. Gillmor (82, p. 184-185), mas seu raciocínio se baseia em um aumento ou diminuição do torque. Se mudarmos a medida da distância para um valor menor (para a corda de arco), a força aumentaria. Porém, o braço também muda, ele diminui. Como o torque é a multiplicação da força pelo braço⁷⁴, o aumento da força e a diminuição do braço se contrabalanceariam. Portanto, para ângulos pequenos, os dois fatores se cancelam no cálculo do torque. René Haüy coloca, em seu livro sobre as teorias de Aepinus (com comentários sobre esse experimento de Coulomb), que “os dois erros são aproximadamente proporcionais, de forma que a exatidão do resultado [final] não é alterada”. (71, p. 43-44) Isso está parcialmente correto. As duas aproximações não se cancelam, mas para ângulos pequenos elas não influem no resultado.

Podemos checar esse resultado com os cálculos abaixo, nos quais usamos a mecânica clássica (como a entendemos atualmente e assumindo que a lei do inverso do quadrado está correta).

⁷⁴ Essa relação vem, em última instância, da lei da alavanca de Arquimedes (c. 187-212 AEC) (92), apesar dos conceitos de torque e força serem bem posteriores a ele. Essa lei pode ser ainda mais antiga, vindo de um trabalho intitulado “Problemas Mecânicos”, incorretamente atribuído a Aristóteles (384-322 AEC). (93, p. 353-355) O texto provavelmente foi escrito por algum peripatético (ou seja, da escola de Aristóteles), possivelmente Estratão de Lâmpsaco (335-269 AEC). (94, p. 302) Leonhard Euler já havia escrito essa lei de uma forma mais próxima da que reconhecemos hoje. (60, p. 24; 95, p. 41) Ou seja, é bem provável que Coulomb estivesse pensando nela em seu raciocínio.

O torque total na agulha, M , é, depois da torção aplicada no micrômetro, que adiciona um torque externo, igual a $r \cos(\theta/2) F_{elétrica}$, onde θ é o ângulo que a balança faz ao se mover, e a força elétrica, $F_{elétrica}$, é igual a k/ρ^2 , onde k é uma constante e ρ é a corda de arco. Por geometria, $\rho = 2r \sin(\theta/2)$. Diminuindo a distância no cálculo da força, do segmento de arco, $r\theta$, para ρ , onde $\rho < r\theta$ para θ positivo, temos um aumento na força $F_{elétrica}$. Mas, mudar o valor do braço de r para $r \cos(\theta/2)$ o diminui, diminuindo o torque M . Multiplicando a força pelo braço, temos que $M = \frac{k}{4r(2 \sin^3(\theta/2) \csc(\theta))}$. Isto é, não há cancelamento, mas para ângulos pequenos (*i.e.*, $\theta \ll 1$), $M \cong \frac{k}{2r\theta^2}$ e $F_{elétrica} \cong \frac{k}{4r^2\theta^2}$, o que justifica a aproximação de que o torque e a força podem ser medidos pelo ângulo⁷⁵.

Além disso, na primeira aproximação de Coulomb, ele também assumiu implicitamente uma relação inversa entre a distância e a força. Apesar de parecer justamente aquilo que Coulomb queria provar experimentalmente, isso não torna seu raciocínio tautológico. Pois já era comum, como na obra de Aepinus, assumir que a força elétrica diminuía com a distância, sem especificar uma lei de função.

Os dados experimentais de Coulomb tiveram uma aceitação difusa, gerando certo debate, em particular no círculo científico germânico. Vejamos um resumo disso antes de passarmos para o caso da atração elétrica.

5.3.1 Considerações acerca das medidas de Coulomb

A lei do inverso do quadrado da distância já havia sido sugerida, via experimentos, por outros. Daniel Bernoulli (1700-1782), aproximadamente em 1760, havia chegado nela usando um hidrômetro modificado, porém o experimento continha muitas fontes de erro e, provavelmente por isso, não foi publicado por inteiro. Joseph Priestley também sugeriu uma lei semelhante após analisar experimentos de Franklin envolvendo uma bola de cortiça dentro de um copo de metal eletrizado. (19, p. 217-218) Lord Stanhope (1753-1816) também faz parte desse grupo, com um experimento de 1779, assim como Henry Cavendish (1731-1810) e John Robison⁷⁶ (1739-1805). No caso de Cavendish e Robison, apesar de terem realizado bons experimentos, seus trabalhos só se tornaram famosos no século XIX. (96, p. 48; 97, p.

⁷⁵ A medida deve ser no segmento do arco, ou seja, $r\theta$. Mas, como r é constante, podemos simplificar afirmando que a medida é apenas do ângulo.

⁷⁶ John Robison escreveu o artigo sobre eletricidade para um suplemento à Enciclopédia Britânica no início do século XIX. Nesse verbete ele diz ter feitos experimentos que mostravam isso. Ele escreve que “o autor deste artigo [J. Robison] fez diversos experimentos com isso [relação força-distância] há uns 30 anos atrás (...). Eles foram realizados da maneira mais óbvia e simples, sugeridos pelos raciocínios do Sr. Aepinus”. (98, p. 578)

110) Assim, foi o experimento de Coulomb aquele que mais marcou a procura pela relação exata entre força e distância.

As primeiras críticas ao experimento de Coulomb surgiram em torno de 1790, na Grã-Bretanha, com Deluc (1727-1817), que o interpretara de outra forma. Apesar de aceitar os dados de Coulomb, para Deluc, a distância das duas bolas não importava, mas sim encontrar um ponto entre elas onde não houvesse ação eletrostática (força nula). Em 1836, William Snow Harris (?-?) rejeitou os dados de Coulomb, justamente na época em que Poisson publicava sua teoria (matematizada) que concordava com a lei do inverso do quadrado. Mas esses dois casos são exceções na Grã-Bretanha; em geral, tanto britânicos quanto franceses aceitaram bem os resultados publicados por Coulomb. Na Alemanha, entretanto, houve uma maior disparidade de opiniões e resultados. (99, p. 991-992)

Em 1807, Peter Ludwig Maréchaux (1764-?) escreveu na *Annalen der Physik* que Alessandro Volta (1745-1827) estava preparando uma publicação que invalidaria Coulomb e provaria que a relação força-distância é pelo inverso ($F \propto 1/r$), não pelo inverso do quadrado ($F \propto 1/r^2$). Após essa publicação, e em partes graças a ela, em 1808, Paul Louis Simon (1767-1815) publicou seu experimento sobre a dependência da força com a distância. Ele não usou a balança de torção, mas sim uma balança de pesos. Dessa forma, Simon chegou na lei do inverso, isto é, de que a força varia pelo inverso da distância; $F \propto \left(\frac{1}{r}\right)$.

Com isso, vários cientistas germânicos usaram o trabalho de Simon, ou de experimentos próprios, para desacreditar o resultado de Coulomb, ou desacreditar os resultados tanto de Coulomb quanto de Simon. Em 1823, para dar um exemplo, Ludwig Friedrich Kämtz (1801-?) realizou os experimentos da balança de torção e concluiu que a força aumentava conforme a distância caía pela potência de 1,2. Apenas em 1840 ele discordou do resultado que havia encontrado. (96)

Em 1825, P. N. C. Egen (1793-1849) defendeu a plausibilidade do resultado de Coulomb, criticando os cientistas germânicos, como Simon. Em especial, Egen notara que a distância entre as duas bolas na balança de peso de Simon fora calculada entre as superfícies, e não entre seus centros, como no caso de Coulomb. Então, Egen corrigiu os dados de Simon e obteve a lei do inverso do quadrado da distância. Mesmo assim, dúvidas continuaram. G. W. Muncke (1772-1847) criticou, em 1827, alguns pontos de Egen e citou os trabalhos de Volta. Em 1828, Egen reafirmou seu ponto de vista. Nesta altura do debate, entretanto, a relação de Coulomb já estava bem aceita e o debate evanesceu. (96)

O “erro” de Simon é na verdade um sintoma de algo subjacente; os condicionantes teóricos dos experimentos. Coulomb entendia a eletrostática em analogia com a gravitação de Newton. Isto é evidente no seu uso da ação à distância. Por exemplo, Coulomb não entendia o meio no qual o experimento se encontrava como relevante, por isso o realizou apenas no ar. Além do mais, ele assumia uma distribuição uniforme de carga nas bolas, o que o permitiu representá-las como cargas pontuais nos seus centros, assim como Newton fizera com os planetas na teoria da gravitação.

Os cientistas germânicos que o criticaram e duvidaram de seu resultado não seguiam a visão newtoniana. Deluc, por exemplo, era adepto do modelo das atmosferas elétricas⁷⁷. Nele, a atmosfera elétrica poderia ter características similares às de um gás. Johann S. C. Schweigger (1779-1857) usou essa possibilidade para defender uma analogia entre a lei de Simon ($\frac{1}{r}$) e a lei de Mariotte-Boyle⁷⁸, válida para gases. Nessa teoria, a medição de Simon, feita entre as superfícies e não entre os centros, faz sentido. (96, p. 63-65)

Ao refazer o experimento de Coulomb com a balança seguindo a descrição original, o historiador Peter Heering só conseguiu reproduzir os resultados de Coulomb quando protegeu a balança por uma gaiola de Faraday. Dessa forma, ele conseguiu evitar que a eletrização do próprio experimentador influenciasse o experimento. Coulomb poderia ter feito isso (ou algo semelhante), mas esse não parece ser o caso. Algumas dificuldades que Coulomb descreve indicam que ele não conseguiu anular essa interferência. (96)

Assim, os dados que Coulomb apresenta são complicados de serem reproduzidos e, até certo ponto, são questionáveis. Por exemplo, o terceiro dado dependia da torção do micrômetro em 567°. Porém, Coulomb descreve que “deve-se ainda advertir que empregando esse último fio de prata, não se pode jamais torcê-lo para além de 300 graus porque passado esse valor de torção, ele [o fio] começa a endurecer e não reage mais”. (91, p. 575) Assim, ou ele não usou o fio que descreveu, ou tem algo a mais na maneira como Coulomb chegou nesses dados que desconhecemos.

Não obstante, as complicações e observações que Coulomb descreve mostram que, segundo Heering (96, p. 65), ele realizou o experimento⁷⁹. Porém, ele não chegou na lei do inverso do quadrado puramente via seus resultados experimentais, pois seu newtonianismo,

⁷⁷ Nos anos de 1760, John Canton, mesmo elogiando o trabalho de Aepinus (com a ação à distância), continuou apoiando as atmosferas elétricas. De fato, isso deu a elas uma sobrevida na Inglaterra. Nessa versão das atmosferas, a presença de corpos eletrificados modificava o estado elétrico do meio ao redor. (19, p. 196-197)

⁷⁸ Onde assumisse que pV é constante. Como $p = F/A$ e $V = Ad$, Fd é constante. Logo, $F \propto 1/d$. Onde temos que F é força, V é volume, A é área superficial, p é pressão e d é a distância. (96, p. 64)

⁷⁹ Para uma análise bastante completa dos erros experimentais presentes na balança de torção, ver: (96, 99).

uma escolha teórica, também é um fator relevante aqui – por exemplo, na seleção de valores relevantes para serem usados no trabalho publicado. (96, 99) Note que Coulomb parece ter selecionado apenas alguns dados, como ele mesmo afirma: “Eu [Coulomb] apresentarei aqui somente alguns testes que são fáceis de serem repetidos e que colocam rapidamente em evidência sob os [nossos] olhos a lei da repulsão”. (91, p. 572-573)

5.4 O segundo trabalho de Coulomb sobre eletrostática: a atração elétrica

O caso da atração elétrica é abordado no segundo trabalho, de 1787. Para isso, Coulomb usa outra montagem experimental, presente na figura abaixo. Nela, um disco proveniente de uma folha dourada é fixado em uma agulha de goma-laca, pendurada por um fio de seda e, assim, servindo como uma balança (a agulha possui um contrapeso na outra ponta). Um globo é fixado a uma distância do disco. Esse globo é isolado eletricamente do chão e eletrizado por uma faísca de uma garrafa de Leiden. O disco na agulha era eletrizado por um contato rápido com um pequeno condutor aterrado (ou seja, eletrizado por indução). Depois, a agulha era posta para oscilar em uma amplitude menor que 30° . (99, p. 988-989)

Figura 5.2 – Imagem ilustrando o experimento de Coulomb sobre a dependência da força de atração elétrica para com a distância. Nela, um disco proveniente de uma folha dourada, à direita na imagem, é fixado em uma agulha de goma-laca, pendurada por um fio de seda e, assim, servindo como uma balança. A agulha possui um contrapeso também. Um globo, à esquerda, é fixado a uma distância desse disco. Esse globo é isolado eletricamente do chão e eletrizado por uma faísca de uma garrafa de Leiden. O disco na agulha era eletrizado por um contato rápido com um pequeno condutor aterrado (isto é, eletrizado por indução).

Coulomb faz duas suposições em sua análise desse experimento. A primeira, as forças elétricas atuantes na esfera o fazem como se concentradas em seus centros. Uma suposição que evidencia, mais uma vez, uma influência newtoniana. A segunda, as dimensões dos corpos no experimento são pequenas com relação às distâncias medidas. (82, p. 186)

Com efeito, tendo essas duas condições satisfeitas, a força ϕ que faz a agulha oscilar se relacionará com o tempo T “de uma certa quantidade de oscilações” – ou seja, o período (multiplicado por 15 nesse caso, pois são 15 oscilações) – de forma que $T \propto \left(\frac{1}{\sqrt{\phi}}\right)$. (100, p. 584) Essa relação entre força oscilante e período já havia sido demonstrada matematicamente, em 1777, para o caso de agulhas imantadas. (83, p. 174-176) Além disso, a distância d entre o centro do disco e o da esfera é supostamente relacionada com a força de maneira que $\phi \propto \left(\frac{1}{d^2}\right)$ – esse é o ponto que Coulomb quer provar. Portanto, Coulomb sabe que “ T será proporcional [linearmente] a d ” caso a lei do inverso do quadrado da distância for válida. (100, p. 584) Assim, Coulomb procura, experimentalmente, uma relação linear entre o período e a distância.

O tempo para uma quantidade determinada de oscilações e a distância entre o centro dos dois objetos foi medida. Depois, a distância entre a esfera e o disco é aumentada e as medidas de tempo e número de oscilações são refeitas. (99, p. 989) Os três resultados que Coulomb apresenta são:

Primeiro teste: a chapa [disco] l , colocado a 3 polegadas da superfície do globo, ou a 9 polegadas de seu centro, deu 15 oscilações em 20” [segundos].

Segundo teste: a chapa l , afastada 18 polegadas do centro do globo, deu-lhe 15 oscilações em 40”.

Terceiro teste: a chapa l , afastada 24 polegadas do centro do globo, deu-lhe 15 oscilações em 60”. (100, p. 583)

Para analisar esses dados, basta observar se o tempo e a distância crescem na mesma proporção. Nesse momento, Coulomb troca uma das medidas de tempo e, assim, 40” torna-se 41”. (100, p. 584) Uma mudança pequena. É provável que na primeira vez que ele mostrou seus dados – a citação acima traduzida – ele apenas tenha errado o valor. Agora, com o dado modificado no segundo teste, temos que a distância muda de 9 para 18 polegadas, ou seja, o dobro. Com essa mudança, o tempo muda de 20” para 41”. O que se esperaria, seguindo a lei do inverso do quadrado, era o dobro (de 20” para 40”). Assim, entre o primeiro e o segundo dado, a lei do inverso do quadrado é satisfeita razoavelmente bem.

Depois, a medida muda de 18 para 24 polegadas, isto é, 33,33%. Aqui, porém, o tempo vai de 41'' para 60''; ao invés de seguir a teoria e passar de 41'' para 54''⁸⁰. Essa incongruência de $\left(\frac{1}{10}\right)$ entre teoria e experimento tem explicação. Segundo Coulomb, deve-se “notar que [o experimento] demorou quase quatro minutos para realizar os três testes [e] que, embora a eletricidade tenha durado bastante tempo no dia desta experiência, ela perdera, entretanto, $\frac{1}{40}$ de ação por minuto”. (100, p. 584-585) Para isso, Coulomb precisa explicar sobre o vazamento de eletricidade para o ar⁸¹ que um corpo sofre.

Essa perda é o tópico do seu terceiro trabalho em eletricidade, também de 1787. (101) Mas, no segundo trabalho, Coulomb não entra em detalhes e apenas afirma que “a ação elétrica de dois corpos eletrizados diminui, dentro de um tempo dado, exatamente como a densidade elétrica, ou como a intensidade da ação”. (100, p. 585) Como o experimento durou quase quatro minutos, a intensidade da ação elétrica (independente da distância), cai aproximadamente por um décimo. Apesar de não mostrar as contas, Coulomb corrigi o valor do tempo no terceiro experimento. Dessa forma, a medida de 60'' muda para 57''. (100, p. 585) A diferença entre a medida corrigida e a previsão teórica é, portanto, de $\left(\frac{1}{18}\right)$, diminuindo a diferença e, assim, satisfazendo melhor a lei do inverso do quadrado para a atração elétrica.

Em suma, observamos uma relação experimento-matemática que flui do experimento para a matemática, pois os resultados experimentais que vimos nas seções 5.3 e 5.4 dão sustentação a lei de função segundo a qual a força elétrica varia com o inverso do quadrado da distância – conhecida atualmente como lei de Coulomb. Contudo, esses resultados não são “puros”. Eles estão imbrincados em pressupostos e condicionantes teóricos presentes nesses experimentos – em particular, a visão-de-mundo newtoniana.

Coulomb resume seus achados sobre as forças de atração e repulsão. Nesse ponto ele deixa claro sua adesão à teoria de dois fluidos elétricos, não à teoria de um fluido elétrico, defendida por Franz Aepinus.

nós podemos aqui concluir a atração recíproca do fluido elétrico chamado *positivo* sobre o fluido elétrico nomeado comumente *negativo* se dá em razão do inverso do quadrado das distâncias. Do mesmo jeito que nós achamos, no nosso primeiro *Mémoire* [de 1785], que a ação recíproca de um fluido elétrico de mesma natureza se dá em razão do inverso do quadrado das distâncias. (100, p. 585)

⁸⁰ Coulomb não usou Algarismos depois da vírgula, o valor exato da conta é 54,65''.

⁸¹ Esse fenômeno é pouco relevante no primeiro trabalho, analisado aqui na seção 5.3, com a balança de torção. Isso porque Coulomb, sabendo desse vazamento, toma o cuidado de não demorar muito tempo para fazer a medição naquele caso. (91, p. 575)

Coulomb se apoia na teoria dos dois fluidos de Robert Symmer, já citada no capítulo 1 desta tese. Porém, como veremos, essa questão, de caráter mais mecanicista, era pouco relevante para ele, já que os resultados matemáticos obtidos independiam, segundo o próprio Coulomb, de considerações sobre a natureza do fluido (ou fluidos elétricos). Como argumentaremos nas seções 5.5 e 5.6, apesar de priorizar a matemática da mesma maneira que Aepinus, Coulomb leva o primado da matemática para além daquele presente no *Tentamen*, quebrando a interação construtiva entre os polos da matematização e do mecanicismo que vimos no caso de Aepinus. Ficará claro, portanto, que seu estilo de matematização é diferente do que vimos no capítulo 4. Ele é um estilo de matematização antagônico.

Antes disso, entretanto, discutiremos rapidamente a dependência da força com a quantidade de fluidos elétricos nos corpos.

5.4.1 A proporção entre força e quantidade de fluidos elétricos

No seu segundo trabalho sobre eletricidade, Coulomb recapitula seus achados sobre a força elétrica. Assim, no fim do texto, ele afirma que

a ação, seja repulsiva, seja atrativa, dos dois globos eletrizados e, por consequência, de duas moléculas elétricas, está na razão combinada das densidades dos fluidos elétricos das duas moléculas eletrizadas, e [é] inversa ao quadrado das distâncias. (100, p. 611)

A dependência com a distância já foi bem discutida aqui. Mas a relação entre força e quantidade dos fluidos elétricos não é analisada experimentalmente por si só em lugar nenhum das obras de Coulomb. Ela é apenas tomada como válida.

Quando Coulomb faz a mesma afirmação para o caso da força magnética, ele afirma que “a primeira parte dessa preposição [força magnética é proporcional à densidade do fluido] não precisa ser provada”. (100, p. 593) Na verdade, ele supõe essa relação sem prova experimental explícita tanto no magnetismo quanto na eletrostática. Como ela é muito semelhante ao caso da gravitação e Coulomb foi influenciado por uma analogia com a teoria gravitacional de Newton, segundo o historiador S. Gillmor (82, p. 191-192), parece, portanto, explicar essa suposição. No máximo, Coulomb realizou um experimento que, se interpretado diferente de sua interpretação original, poderia ser visto como um experimento sobre a relação entre força e quantidade dos fluidos elétricos; vejamos abaixo.

Em seu quarto trabalho, datado de 1787, Coulomb realiza um experimento que podemos, atualmente, interpretar como uma possível prova experimental da razão direta entre

força e quantidade dos fluidos elétricos. Quando estudou a difusão de fluido elétrico em corpos condutores em função de suas composições químicas, ele utilizou uma balança de torção para medir a força entre duas bolas. O experimento consistia em duas bolas, sendo uma delas de cobre, afastadas pela repulsão, dentro de uma balança de torção como a da figura (5.1). Depois, a bola de cobre, inserida pelo buraco não-concêntrico da balança, era tocada por outra bola de igual tamanho, mas de um material diferente, baseado no sabugueiro. Esta era retirada após o toque, para não interferir no balanço entre as duas que ficam dentro do aparato. Após o toque, as duas bolas iniciais, dentro do aparato, aproximam-se. Para levá-las à distância inicial, Coulomb destorcia o fio pelo micrômetro. Ou seja: no início, a distância era de 28° com o micrômetro torcido a 120° . Depois do toque, a distância entre as bolas é mantida no 28° , mas apenas após o micrômetro indicar 44° . Assim, “a força de torção total, igual a força repulsiva das duas bolas, era de 72 graus”. (102, p. 70-71) Coulomb também fez esse experimento trocando a bola de cobre por um círculo de ferro, que era tocado, nesse caso, por um círculo de papel de mesmo diâmetro. Em conclusão, Coulomb afirma que

já que nas duas observações, a distância entre as duas bolas manteve-se exatamente a mesma, e que a ação [força elétrica] é em razão inversa do quadrado da distância e direta [em relação] as densidades do fluido elétrico, resulta disso que a bola [feita] de sabugueiro tomou exatamente a metade do fluido elétrico da bola de cobre. Assim, a bola de metal não tem uma afinidade ou atração eletiva para com o fluido elétrico maior que aquela [da bola] de sabugueiro. (102, p. 71)

Portanto, como Coulomb assumiu a proporcionalidade entre força e densidade (*i.e.*, quantidade) de fluido elétrico, ele assumiu também que o fluido elétrico da bola eletrizada acaba dividido por dois depois do contato com a bola inicialmente neutra. Com isso, seguindo Coulomb, depois de fazer esse experimento com outros materiais e diferentes tamanhos de bolas e formatos, ele concluiu que não havia materiais com mais ou menos afinidade com o fluido elétrico. (102, p. 69-71) Assim, a distribuição do fluido elétrico seguia a geometria do corpo, sem depender de seu material. Porém, podemos, atualmente, reinterpretá-lo para estabelecer a relação de proporção entre quantidade de fluido elétrico e força.

Para tal, basta assumir o que Coulomb tentou provar – a independência do fluido para com os materiais e que a repartição do fluido depende apenas de fatores geométricos. Assumindo isso, vemos pelo experimento com a bola de cobre que o ângulo total de torção no fio caiu de 148° para aproximadamente a metade, 72° . Como vimos, Coulomb já havia mostrado que o torque em um fio é linearmente proporcional ao ângulo de torção. Portanto, o torque total no fio caiu pela metade após o contato entre a bola de cobre e a de sabugueiro. Logo, a relação entre o torque depois do contato, M' , e o toque antes do contato, M , é tal que

$M'/M = (1/2)$. Como a força elétrica nos dois momentos é proporcional a força elétrica multiplicada pelo braço (metade da balança, uma constante), pois não há torque externo, temos então que a força elétrica entre as duas bolas dentro do experimento caiu em $1/2$. Como o valor da distância manteve-se o mesmo, a queda na força é mais bem explicada por uma queda na densidade de fluido na bola tocada, de cobre, pela metade de seu valor inicial. Isso indica que a dependência da força para com a densidade de fluido elétrico se dá por uma proporção linear – $F \propto q_1$, onde q_1 é a densidade em uma das bolas. Refazendo o raciocínio para a outra bola, que ficava presa na agulha do aparato, temos que $F \propto q_1 q_2$, confirmando a proporcionalidade que foi assumida por Coulomb.

Há, portanto, uma margem para discutirmos se essa relação entre força e fluido é estabelecida experimentalmente ou se é uma definição de densidade de fluido elétrico. (103) O que parece claro é que Coulomb não se importou em demonstrá-la experimentalmente. Ele nunca se atentou a isso porque não precisava. Sua analogia com a gravitação já o permitia afirmá-la.

Não obstante a analogia newtoniana, ela não parece ser toda a explicação para essa suposição entre força e fluido elétrico. Como argumentamos antes, Aepinus foi uma forte influência para Coulomb. No livro de Aepinus, vimos que ele supôs que a força repulsiva entre uma porção de fluido elétrico e uma partícula B de fluido elétrico é proporcional à quantidade de fluido (19, p. 246-247); chamamos isso de hipótese físico-matemática na seção 4.2. Com esse resultado em mãos, Aepinus chega a uma expressão matemática para a força entre dois corpos eletrizados, a equação (4.4.1), que depende da multiplicação entre os excessos (ou deficiências) de fluido elétrico em cada corpo. (19, p. 262-263)

A suposição de Coulomb se parece muito com o resultado obtido por Aepinus, com poucas diferenças: Aepinus não falou de uma densidade de fluido elétrico, como Coulomb faz depois dele, e, além disso, ele dividiu o excesso (ou deficiência) pela quantidade de fluido natural de cada corpo, algo que Coulomb também não faz – ou, pelo menos, não faz explicitamente. Podemos conjecturar que Aepinus influenciou a suposição de Coulomb. Porém, como não conseguimos identificar cartas entre eles e não tivemos acesso às notas de estudo de Coulomb, que possivelmente não sobreviveram ao tempo, não podemos afirmá-la com precisão.

Coulomb chega às expressões para a repulsão e a atração elétricas em relação à distância. Com isso, a base da teoria eletrostática, articulada por Coulomb, está posta. Veremos agora como Coulomb prioriza deduções matemáticas e leva o primado da matemática para além do *Tentamen*, quebrando qualquer interação construtiva entre os polos

da matematização e do mecanicismo que caracterizaram o estilo de Aepinus, visto no capítulo 4.

5.5 A distribuição superficial de fluido elétrico

Em seu quarto trabalho sobre a eletricidade, Coulomb analisa a distribuição de fluido elétrico em um corpo condutor. Nesse caso, um pequeno papel envolto em ouro foi isolado de outros corpos na extremidade de um cilindro de goma-laca ('isolante'), que funcionava como um absorvedor de eletricidade. O corpo condutor em questão era um cilindro de madeira⁸², com vários buracos de pouca profundidade em sua superfície. Esse cilindro era eletrizado por uma garrafa de Leiden (ou pela placa metálica de um eletróforo). Para medir a presença de eletricidade, Coulomb usa uma balança de torção nos moldes do seu trabalho de 1785, mas muito mais sensível.

Quando o papel dourado era encostado na superfície do cilindro de madeira eletrizado e, depois, levado até a agulha dentro da balança de torção, ela se afastava do papel com força. Porém, se o papel dourado tocava o fundo de um buraco do cilindro e, após isso, era aproximado da agulha, ela não se movia – sinal de que o papel não estava eletrizado⁸³. (102, p. 72-73) Com isso, Coulomb afirma que um corpo condutor eletrizado tinha seu fluido elétrico distribuído em sua superfície, sem penetrar o seu interior, assim que “chegava a um estado de equilíbrio”. (102, p. 75)

Não obstante essa demonstração experimental, Coulomb deduz um teorema com o intuito de provar que esse resultado era uma consequência direta da lei do inverso do quadrado da distância. Essa dedução generaliza o resultado experimental e nos permite observar um tipo de uso da matemática – a dedução de um teorema para um caso imaginário; quando a força elétrica decresce pelo *cu*bo da distância. O ponto crucial dessa dedução se encontra em uma nota de rodapé em seu segundo trabalho (não no quarto). Lá, ele deduz os efeitos da atração elétrica de um tronco de cone caso a lei da atração elétrica siga o inverso da distância elevada a $(2 + n)$. Para entendermos essa dedução, precisamos da figura abaixo, que Coulomb faz uso:

⁸² Para experiências em eletrostática, a maioria dos tipos de madeira crua comporta-se como um material condutor. (104, p. 125-127)

⁸³ Às vezes, o papel, quando encostado no fundo do buraco, parecia eletrizado em um estado contrário ao do cilindro. Isso não ocorria quando ele tocava a superfície do cilindro, pois ele “pegava (...) uma quantidade de fluido elétrico igual àquela contida em uma parte da superfície [do cilindro] igual à do pequeno círculo [papel]”. (102, p. 74) O motivo disso, segundo Coulomb, é que a eletrização medida aqui é do suporte do papel, feito de goma-laca, e não do papel em si. Para mostrar isso, ele tenta destruir a eletrização do papel com seu toque e, mesmo assim, o fenômeno continuava ocorrendo. (102, p. 74-75)

Figura 5.3 – Na figura acima temos um tronco de cone com as superfícies circulares e paralelas pm e AB . Há um ponto c minúsculo não-nomeado na figura que está colinear com o centro dos círculos pm e AB . O ponto C está no vértice da projeção completa do tronco de cone.

Fonte: COULOMB. (100, p. 610)

Coulomb então descreve sua dedução da seguinte forma:

A figura *aa* [figura (5.3)] representa um cone ou uma pequena pirâmide muito afiada, da qual todas as [suas] partes atraem o ponto C seguindo a razão inversa [de] $(n + 2)$ das distâncias. Seja $x = cp$, a ação da zona circular pm sobre o ponto C será $\frac{m \partial x x^2}{x^{2+n}}$, cuja integral será $\frac{m}{1-n} (k + x^{1-n})$. Para ter o valor de k , deve-se supor a pirâmide truncada, ou que a ação se evanesça em D quando $x = CD = A$, o que dá para a integração completa $\frac{m}{1-n} (-A^{1-n} + x^{1-n})$, onde deve-se notar que, quando A é igual a 0, se n é maior que 1, A^{1-n} será igual a $\frac{1}{0}$; ou infinito. Se n é menor que a unidade, então A^{1-n} será igual a 0; ou, se quisermos, toda a força atrativa será $\frac{m x^{1-n}}{(1-n)}$.

Isto é, no caso em que n é maior que a unidade, ou quando a repulsão ou a atração diminui em uma razão igual ou maior que o cubo das distâncias, o valor da constante é infinito relativamente ao valor da variável que exprime a maior ou menor extensão do cone. Assim, a atração ou repulsão só ocorre no ponto de contato, e que aquela das partes mais distantes é infinitamente pequena relativamente àquela do contato. Mas, no caso em que n é menor que a unidade; isto é, todas as vezes que a ação decresce em uma razão menor que o cubo das distâncias, então a ação [elétrica] das partes distantes influencia a atração total, que é nula para uma pirâmide infinitamente pequena e proporcional a x^{1-n} , para a pirâmide cujo comprimento é x . (100, p. 587-588)

Com esse cálculo, Coulomb mostra que a secção do cone centrada no círculo pm com espessura dx age sobre o ponto C com uma força de valor igual a $\frac{mx^2dx}{x^{2+n}}$. Com uma condição de contorno, na qual essa força zera a partir de uma certa distância, ele a integra e termina em um impasse. Se $n > 1$, a força em uma partícula de fluido elétrico em contato com a superfície do tronco só possui contribuição do ponto de contato; assim, as partes mais distantes não influenciam a força total. Se $n < 1$, partes mais afastadas – mas não infinitamente distantes – influenciam na força total. O único problema é se $n = 1$ e, assim, a força for com o cubo das distâncias. Pois, neste caso obtém-se zero elevado a zero; 0^0 . Aqui, ele assume que este valor é $+\infty$. Na época, diferente de hoje, isso não era visto como uma indeterminação. Os matemáticos do século XVIII entendiam que $\frac{a}{a} = 1$ para qualquer valor de a e, assim, $\frac{a}{a} = a^{1-1} = a^0 = 1$, mesmo quando $a = 0$. (105, p. 71)⁸⁴

Portanto, Coulomb monta sua dedução matemática sobre a distribuição de fluido elétrico partindo do que ele acreditava já ter mostrado experimentalmente; que a força elétrica está em razão inversa ao quadrado da distância e, por isso, $n = 0$. Finalmente podemos entrar na parte final de sua demonstração, que se encontra no seu quarto trabalho e faz uso da seguinte imagem:

⁸⁴ Esse geralmente era o valor aceito para 0^0 . O matemático Guglielmo Libri (1803-1869), por exemplo, tentou deduzir que tal expressão é sempre 1, assim como outros matemáticos no início do século XIX. (106, p. 4-6) A concepção de que tal expressão é indeterminada surge de maneira contundente com Augustin-Louis Cauchy (1789-1857). (107, p. 47-48) É estranho que a resposta de Coulomb não esteja em concordância com o que se entendia na época, especialmente porque ele não dá razões para seu resultado diferir.

Figura 5.4 – Um corpo condutor $aAFBa$ de formato qualquer é dividido em três partes. Os trechos de igual quantidade de fluido elétrico $adbca$ e $dbecd$, e a parte $dAFBecd$. Este corpo encontra-se eletrizado. A suposição feita é a de que, no início, tal distribuição encontra-se permeando todo o corpo, superfície e interior.

Fonte: COULOMB. (102, p. 76)

Nela, temos um corpo AaB de um formato qualquer preenchido por fluido elétrico e eletrizado. As partículas desse fluido interagem umas com as outras pela lei do inverso do quadrado da distância. No ponto a , Coulomb desenha uma normal à superfície naquele ponto, que passa pelo ponto b e é infinitamente pequena. No ponto b , ele traça um plano perpendicular a essa normal ab . Dessa forma, o corpo fica dividido em dois pedaços; um infinitamente pequeno $daeb$, e outro finito $dAFBeb$. Coulomb monta, então, uma segunda calota, $dceb$, de mesmo volume que $daeb$. Assim, supondo que o fluido elétrico se encontra inicialmente distribuído no corpo de maneira uniforme por todo seu volume, as forças geradas por cada calota em uma partícula de fluido em b se cancelam. A única força que não é anulada é a que vem do resto do corpo.

Como a lei segue o inverso do quadrado da distância (com $n = 0$), essa força do fluido elétrico no resto do corpo não é infinitamente pequena se comparada com as forças produzidas próximas ao ponto b em questão – isso vem da dedução que acabamos de mostrar. (102, p. 76-77) Finalmente, “no estado de estabilidade do fluido elétrico, todo esse fluido se carregará até a superfície do corpo, que nada terá [de fluido] em seu interior”. (102, p. 77)

Como vimos no caso da balança de torção em 1785, nem todos que estudaram a relação força-distância observaram uma relação baseada no inverso do quadrado. Alguns

mediram relações como a de Simon, onde $F \propto \left(\frac{1}{r}\right)$. Nesse caso, temos $n = -1$ e, mesmo assim, a dedução de Coulomb para a distribuição de fluido em um condutor nos retorna a mesma resposta que $n = 0$. Assim, a relação $F \propto \left(\frac{1}{r^2}\right)$ não era a única possibilidade e parece ter sido a resposta mais aceita, graças – em grande parte – à analogia com a lei da gravitação de Newton⁸⁵. Isso é mais um caso da polivalência da matemática, vimos algo similar na seção 4.3. Isto é, a matemática produz mais resultados do que a teoria pede e, por vezes, isso acarreta mais de uma solução possível para uma questão formulada no bojo de uma teoria.

Porém, o que mais nos chama a atenção não é a relação força-distância, mas sim que essa dedução não é rigorosa para uma teoria de dois fluidos elétricos, um positivo e um negativo. Em casos em que o valor da força é da ordem da distância elevada a $-m$, com $m \neq 2$, certas distribuições volumétricas dos dois fluidos poderiam anular a força elétrica total nos pontos pertencentes ao interior do condutor, com a exceção de um condutor perfeitamente esférico. (108, p. 231) Coulomb era adepto da teoria de dois fluidos, não da teoria de um fluido (82, p. 209) e ele não nota essa falha, indicando uma relação antagônica entre mecanicismo e matematização em seu estilo. Discutiremos na seção abaixo e nas conclusões deste capítulo as implicações disso para esta tese.

5.6 Um fluido *versus* dois fluidos

Coulomb, apesar de conhecer a teoria de um fluido elétrico presente em Aepinus, não era adepto dela. Para ele, a melhor teoria era a de dois fluidos elétricos, um positivo e um negativo. Em seu sexto trabalho, de 1790, Coulomb deixa seu posicionamento claro:

qualquer que seja a causa da eletricidade, nós a explicaremos em todos os fenômenos, e o cálculo se encontrara conforme os resultados das experiências. Supondo dois fluidos elétricos, as partes do mesmo fluido se repelem na razão inversa do quadrado das distâncias, e atraem as partes do outro fluido na mesma razão inversa do quadrado das distâncias. Essa lei foi encontrada pela experiência para a atração e a repulsão elétricas nos meus primeiro e segundo trabalhos sobre eletricidade. (109, p. 671)

Ele menciona a teoria de Aepinus, com um fluido elétrico e as partículas de matéria comum (leia-se, não-elétrica) se repelindo. Para Coulomb, “a suposição do Sr. Aepinus dá, no

⁸⁵ Aepinus não observou essa consequência da lei do inverso do quadrado, afirmando que o fluido elétrico tende a se distribuir uniformemente em um corpo condutor até que sua densidade seja igual em todas as suas partes. (19, p. 350-351) O historiador Roderick W. Home afirma que isso é inconsistente com a lei do inverso do quadrado (19, p. 125-126), mas Aepinus nunca aceitou essa relação, deixando tal questão em aberto. Além disso, a dedução de Coulomb funciona para uma relação do tipo $(1/r)$.

que diz respeito aos cálculos, os mesmos resultados que aqueles [na teoria] dos dois fluidos”. Mesmo assim, “eu [Coulomb] prefiro aquela dos dois fluidos”. (109, p. 672)

Essa afirmação é incorreta, pois, como vimos na seção 5.5, os resultados não são os mesmos em todas as situações. A escolha de Coulomb pela teoria de dois fluidos ocorre por dois motivos: I) parecia contraditório atribuir às partes do corpo (matéria comum) uma força atrativa devido à gravitação universal que cai com o inverso do quadrado da distância e, além dela, uma força repulsiva na mesma proporção, agora devido a repulsão elétrica. Onde a força elétrica é necessariamente mais forte⁸⁶; e, II) a suposição de dois fluidos elétricos se conforma aos resultados da química da época; pois, segundo Coulomb, já havia sido mostrado que diferentes gases misturados em certas proporções tinham suas “elasticidades” destruídas, o que não condiz com partículas de um único fluido (elétrico) se repelindo. (109, p. 672-673)

Segundo o historiador C. S. Gillmor (82, p. 209-210), Coulomb apenas afirmava a teoria de dois fluidos em um caráter mais hipotético. Isso parece ser verdade, mas há mais aqui do que hipóteses. Em seu quarto trabalho, Coulomb defende a teoria dos dois fluidos (102, p. 67) Como observamos na seção 5.5, o cálculo daquele trabalho não funciona de maneira generalizada na teoria de dois fluidos elétricos.

Logo, temos uma inconsistência que nos revela implicações do estilo de matematização presente em sua obra. Essa inconsistência mostra o quão pouco mecanicista (*i.e.*, referente aos entes físicos tangíveis) sua teoria era. Pois, Coulomb parece levar às últimas consequências a desmecanização que o estilo de matematização focado no aparato e nos cálculos matemáticos implica. Nele, questões como um fluido elétrico ou dois fluidos elétricos se mostram desinteressantes e sem solução; são perguntas marginalizadas, que podem ser deixadas de lado já que seus cálculos as prescindem. A razão disso é o estilo de matematização adotado por Coulomb. Como ele supõe, os cálculos utilizando as diferentes hipóteses produzem resultados iguais e, justamente por isso, a escolha entre ambas é dada como uma preferência quase pessoal. Assim, não haveria como pontuar qual teoria é a certa, já que os resultados matemáticos são os mesmos. A razão de sua escolha teórica fica clara em seu último parágrafo sobre a natureza da eletricidade. Nele, Coulomb afirma que

como essas duas explicações [um fluido elétrico ou dois fluidos elétricos] só têm um [certo] grau de probabilidade mais ou menos grande, eu aviso, para colocar a teoria que seguirá sob a proteção de toda disputa sistemática, que na suposição de dois fluidos elétricos, eu não tenho outra intenção que a de apresentar, com o menor

⁸⁶ A primeira razão foi abordada pelo próprio Aepinus e a mostramos no capítulo anterior; ele afirmou que a força gravitacional e a força elétrica tinham causas mecânicas diferentes e atuavam em condições físicas diferentes, logo, não haveria problemas.

número de elementos possíveis, os resultados do cálculo e da experiência. E não de indicar as causas verdadeiras da eletricidade. (102, p. 673)

Ou seja, ele tenta dialogar com a teoria elétrica do futuro, pedindo que se entenda sua citação à teoria dos dois fluidos como uma necessidade para descrever seus resultados matemáticos e experimentais. Logo, ele tenta se desvencilhar da sua própria escolha teórica, mas sua dedução para a distribuição de fluido elétrico em um condutor não se aplica à teoria que ele usa, como mencionado acima. Portanto, concluímos que Coulomb não estava comprometido ontologicamente e teoricamente com a teoria dos dois fluidos, ou com a de um fluido, mas sim com os cálculos matemáticos e com os resultados que ele deduz a partir deles.

Para relembrar, como argumentamos antes, a dedução matemática para a distribuição do fluido elétrico em um condutor, vista na seção acima, não é transportável para a teoria de dois fluidos elétricos. Dessa forma, a interação matematização-mecanicismo se torna antagônica aqui, pois esses dois polos, diferentemente dos casos vistos em J. Euler e Aepinus, não somam esforços, mas sim competem e se enfraquecem mutuamente.

5.7 Conclusões

Nos experimentos que Coulomb realizou a respeito da relação entre força e distância, vemos uma influência dos resultados experimentais na expressão matemática, já que os resultados que vimos nas seções 5.3 e 5.4 permitiram Coulomb postular a lei de função, ou seja, a relação matemática, segundo a qual a força elétrica varia com a distância. Logo, o movimento epistêmico se dá *do experimento para a matemática*, com o experimento possuído por uma visão de mundo newtoniana que aparece como um condicionante teórico dele. Na dedução matemática, vista na seção 5.5 e analisada na seção 5.6 à luz dos polos matematização-mecanicismo, concluímos que o estilo de matematização de Coulomb é aproxima-se do de Aepinus por priorizar a matemática em sua explicação. Assim, o estilo de matematização de Aepinus é um dos pilares da pesquisa de Coulomb e, por consequência, das pesquisas elétricas da época. Além disso, os trabalhos de Coulomb com a balança de torção e as oscilações resolvem, para a maioria dos físicos da época, a procura pela relação força-distância na eletrostática.

Como concluímos nos dois capítulos anteriores, o caso de J. Euler e o de Aepinus mostram uma interação construtiva entre os polos matematização-mecanicismo nas explicações para os fenômenos elétricos. No caso de Coulomb, isso não acontece, como

podemos ver na dedução para a distribuição de fluido elétrico. Com isso, observamos que os estilos em Coulomb e em Aepinus, apesar de similares, não são iguais.

Para Coulomb, a disputa entre as teorias de um fluido ou dois fluidos elétricos não era importante, justamente porque seus cálculos não indicavam uma diferença entre essas duas teorias. Para ele, bastava os cálculos e os experimentos, as causas mecânicas e físicas da eletricidade estavam em segundo plano e tinham pouca relevância. Porém, sua dedução para a distribuição de fluido elétrico não valia dentro de sua própria teoria física já que a suposição de Coulomb quanto à aplicação de seus cálculos estava errada. Ou seja, há aqui um antagonismo, no sentido de um enfraquecimento, entre os polos matematização-mecanicismo no estilo presente em Coulomb. Portanto, o estilo de matematização que vemos em Coulomb é antagônico na relação matematização-mecanicismo.

O estilo de matematização em Coulomb é, portanto, uma mutação do estilo em Aepinus. Como vimos, Coulomb apenas privilegia ainda mais a matemática em suas explicações do que Aepinus. Nesse caso, podemos pensar que há um *projeto epistêmico* em curso, abarcando a matematização de Aepinus a Coulomb. No capítulo 2, definimos projeto epistêmico como um ensemble de estilos paralelos, ou seja, de estilos similares no uso da matemática nas suas explicações. O de Aepinus prioriza a matemática, usando-a construtivamente com o polo mecanicista de sua teoria, o de Coulomb também prioriza a matemática, mas a usa antagonicamente com o polo mecanicista – uma diferença que não afasta os dois autores por completo. Portanto, os estilos de Aepinus e Coulomb se encaixam em um mesmo projeto epistêmico. O estilo de matematização em Johann Euler não participa desse projeto, pois ele inverte o sentido dessa prioridade, privilegiando o mecanicismo em suas explicações.

Finalmente, há, no estilo de Coulomb, uma perda epistêmica para a física. Perdeu-se o interessante em investigar os mecanismos subjacentes aos fenômenos físicos, que eram bastante importantes para os eletricitistas da primeira metade do século XVIII como Gray, Franklin, Dufay e outros. Porém, também há um ganho epistêmico, já que quando essas questões foram postas de lado, Coulomb conseguiu aprofundar experimentos sobre uma questão importante da época, a relação força-distância, e analisar consequências matemáticas dessa relação, como a distribuição do fluido elétrico. Pragmaticamente, o estilo de matematização em Coulomb mostra-se frutífero e, provavelmente por isso, ele se difundiu subjacente aos resultados de Coulomb, colocando a matemática como indispensável à física que viria. Veremos mais sobre projetos epistêmicos e ganhos e perdas epistêmicas em relação a matematização no capítulo 6, a seguir.

6 Conclusões

Neste capítulo, resumiremos as principais conclusões abordadas nos capítulos 3, 4 e 5. Dessa forma, discutiremos mais a fundo a ideia de estilo de matematização, mencionada primeiramente no capítulo 2. Com isso, integraremos por completo nossa proposta de análise de episódios históricos envolvendo matematização com os estudos históricos dos outros capítulos. Como resultado, veremos como os estilos levam a outro termo nosso, de projetos epistêmicos. Assim, abordaremos novamente a comparação que fizemos entre eles e os conceitos de ruptura e obstáculo epistemológicos de Gaston Bachelard. Por último, discutiremos como avaliar ganhos e perdas (em um sentido epistemológico) nos diferentes estilos de matematização das teorias elétricas estudadas.

6.1 Os dois polos das explicações científicas

Como vimos nos capítulos 3, 4 e 5, as explicações matematizadas presentes nas teorias apresentadas oscilavam entre dois polos – o matemático e o mecanicista. Isto é, entre dois polos que definem formas diferentes de explicar um fenômeno: o matemático (ou matematizado) implica em explicações com uso do aparato matemático; o segundo indica explicações físicas, baseadas em entes físicos tangíveis e, por vezes, dependem do contato entre os corpos e esses entes. Quando Johann Euler estudou os fenômenos elétricos supondo a existência de um éter e construindo uma explicação mecanicista para a atração elétrica, o uso de expressões matemáticas por ele deduzidas era circunscrito a um papel secundário, um auxílio nas suas explicações. Os dois polos não constituem uma dicotomia, pois o mecanicismo não nega a matematização (e vice-versa). De fato, ambos aparecem lado a lado na construção das explicações em uma teoria. No caso de J. Euler, os dois polos aparecem, e trabalham juntos construtivamente, tendo o polo mecanicista certa prioridade frente ao matemático. A característica polar das explicações de J. Euler não é contemplada por completo pela concepção inferencial; podemos ver que esse referencial filosófico, apesar de razoável para avaliar a aplicação da matemática, não basta na análise de um processo histórico de matematização. Ele não consegue lidar com certos estilos de matematização, com características que vão além do puro uso da matemática em explicações, como o caso do *Recherches* de Johann Euler. Em suma, a concepção inferencial não consegue captar a

polaridade das explicações físicas, mesmo as matematizadas. Por isso, nossa proposta foca justamente nessa característica.

No caso de Aepinus, a prioridade não é o polo mecanicista, mas sim o matemático. Na seção 4.2 expusemos como a matematização de Aepinus influi em diversos aspectos de sua teoria elétrica baseada em um fluido elétrico. Por exemplo, Aepinus construiu uma hipótese para a relação entre força elétrica e quantidade de fluido elétrico que entendemos ser parcialmente física, parcialmente matemática.

Além disso, na seção 4.3, vimos que, no *Tentamen*, a matemática articula a teoria de Franklin do fluido elétrico para deduzir, de maneira não *ad hoc*, a repulsão matéria-matéria. Essa dedução leva a teoria elétrica do *Tentamen* para uma contradição frente à gravitação, algo que Aepinus notou e só conseguiu evitar com uma explicação mecanicista. Ademais, vimos lá discordâncias com relação a esse resultado. Jan Hendrik van Swinden, por exemplo, discordara da articulação matemática de Aepinus e, usando a matemática, tentou provar que não era possível saber se partículas de matéria interagiam eletricamente entre si.

Em resumo, no contexto dos polos mencionados, o estilo de matematização em Aepinus mostra que, mesmo com a matemática em primeiro plano, é possível haver uma interação construtiva entre os dois polos mencionados. Em contraste, o estilo em Coulomb mostra o oposto.

No capítulo 5, vimos que na dedução matemática a respeito da distribuição de fluido elétrico em um condutor de Coulomb apenas valia claramente para a teoria de um fluido elétrico, da qual ele não era adepto. Mas ele não notou que sua dedução não poderia ser aplicada automaticamente para a teoria de dois fluidos, que ele defendia. Esse lapso de Coulomb fica claro quando, no capítulo 5, vimos que, para ele, o importante eram os cálculos matemáticos. A priorização do polo matemático, comprometeu seus raciocínios físicos. Portanto, a matematização em Charles Coulomb não responde, e até mesmo contradiz, questões mecanicistas (*i.e.*, referentes aos entes físicos concretos) de sua própria teoria. O mecanicismo subjacente a sua teoria – baseado em dois fluidos elétricos – fica, no fim das contas, marginalizado.

Logo, temos um caso no qual o mecanicismo tem prioridade, capítulo 3, e dois casos, capítulos 4 e 5, nos quais é a matemática que ganha prioridade. Nestes dois últimos, o primeiro deles envolve uma interação construtiva entre os polos mecanicista e matematizado, o outro mostra uma interação antagônica. Dependendo do caso em análise, um polo terá maior protagonismo que o outro. Em alguns casos, eles interagem harmonicamente; em outros,

como no caso do capítulo 5, elas não interagem bem, mostrando disfuncionalidades. As imagens abaixo ilustram essa analogia.

(a)

(b)

(continua)

(continuação)

Figura 6.1 – Os polos nas figuras 6.1 (a), (b) e (c) representam os polos matematizado e mecanicista (representando o mecanicismo) de uma explicação em estilos de matematização diferentes. O caso (a) representa o estilo de matematização em Johann Euler. O caso (b) representa o estilo em Franz Aepinus. O caso (c), no final, representa o estilo em Charles Coulomb, no qual não há boa harmonia entre os dois polos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, as diferenças entre cada estilo de matematização presentes neste trabalho se tornam claras. O estilo em Johann Euler é um estilo de *matematização mecanicista*. As explicações de sua teoria etérea são primordialmente subordinadas aos seus raciocínios mecanicistas. Portanto, o lado matemático (isto é, matematizado) presente nessas explicações pode ser visto como secundário. O estilo *meccanicista* em Johann Euler também é construtivo na sua relação matemática-mecanicismo, já que a matemática usada – fortemente baseada na hidrodinâmica – ressoa positivamente com sua teoria etérea.

O estilo em Franz Aepinus é um estilo de *matematização construtivo*. As suas explicações para diversos fenômenos elétricos são fortemente guiadas pela matemática, assim

como as articulações que ele promovera na teoria de um fluido elétrico. Além disso, pode-se observar uma tessitura bastante orgânica e construtiva entre matemática e mecanicismo.

O estilo em Charles Coulomb é um estilo de *matematização antagônico*. Assim como no caso de Euler e Aepinus, também há aqui dois polos – matemático e mecanicista –, sendo o matemático aquele que guia a articulação da teoria, similar ao caso do capítulo 4. Porém, como apresentado antes, observamos uma interação conflituosa entre esses dois polos. Pois, um deles, o mecanicista, referente às explicações baseadas em entes físicos – os dois fluidos elétricos, nesse caso –, acaba ignorado em uma explicação de Coulomb sobre a distribuição de fluido elétrico em um corpo condutor.

6.2 Matemática, teoria e experimentação

Quando estudamos a matematização presente no *Tentamen*, especificamente na seção 4.4, vimos que Aepinus desafiara observações empíricas bastante conhecidas – a atração entre um corpo eletrizado e outro eletricamente neutro, pois sua matemática sugeria que elas estavam incompletas ou erradas. Após colocar resultados matemáticos em maior grau de importância, Aepinus realizou um experimento para mostrar que antes da atração ocorrer, o corpo neutro se encontrava ‘polarizado’. Assim, o uso da matemática em sua teoria representa um artifício bastante inovador para lidar com discrepâncias entre os pressupostos físicos e as observações empíricas. Na subseção 4.4.2, pudemos ver que os cálculos do autor eram, por si só, capazes de sugerir que existiria uma ‘polarização’, ou seja, a matemática é capaz de induzir pressupostos e fenômenos que pertencem à configuração empírico-teórica.

Nessa mesma subseção (4.4.2), comparamos as explicações de Aepinus e Johann Euler para o contraintuitivo fenômeno da atração elétrica entre corpos no mesmo estado elétrico. Concluímos lá que a explicação de Aepinus, mais matematizada do que mecanicista, é mais completa e profunda para esse fenômeno quando comparada à explicação de J. Euler. Com seus cálculos, Aepinus também foi capaz de deduzir dois cenários onde o fenômeno de atração ocorreria (um envolvendo a distância dos corpos e outro, a razão de suas eletrificações); depois, demonstrou-os experimentalmente. Assim, vemos uma relação positiva, construtiva, entre os conceitos trabalhados matematicamente e a experimentação. Isso nos levou ao estudo de Aepinus sobre a garrafa de Leiden.

Nas seções 4.5 e 4.6, analisamos a explicação matematizada de Aepinus para a eletrização da garrafa de Leiden e como essa explicação o levou a corrigir a teoria de Franklin sobre o funcionamento do dispositivo. Neste último caso, concluímos que Aepinus prioriza os

resultados matemáticos e, por isso, é levado a duvidar de um dos resultados experimentais de Franklin. Com isso, Aepinus foi obrigado a refazer o experimento de Franklin com mais sensibilidade, o que o levou a comprovar sua correção. Com isso, pudemos finalmente observar, nas conclusões do capítulo 4, um “triângulo de ferro”, a figura (4.7), entre pressupostos físicos, experimentação e aparato matemático em Aepinus.

Relações produtivas entre matemática, teoria e experimento são muito evidentes no caso de Aepinus, mas não são exclusivas dele. No capítulo 5, quando nos aprofundamos nos trabalhos de Coulomb, observamos como experimentos foram usados para mostrar – ou, mais precisamente, confirmar – uma relação (que muitos já imaginavam ser válida) entre distância e magnitude da força elétrica, seja repulsiva ou atrativa. Para tal, Coulomb usou um experimento com a balança de torção e um com oscilações de uma agulha, respectivamente.

Porém, a relação entre a magnitude da força elétrica e as quantidades dos fluidos elétricos nos corpos eletrizados não se encontra demonstrada por experimentos, sendo um sintoma de sua visão de mundo newtoniana (que Aepinus compartilhava).

Pudemos, então, observar as várias formas em que ocorrem interações entre matemática, pressupostos teóricos (*i.e.*, entidades físicas postuladas, suposições e relações entre conceitos que compõem o cerne de uma teoria) e experimentos no âmbito do nosso recorte. Logo, observamos que, apesar das diferenças entre os estilos de Coulomb e Aepinus, explicitadas na seção 6.1, há certa congruência em seus estilos – isso nos leva à próxima seção.

6.3 Projetos epistêmicos

Como vimos na seção 2.4, uma ruptura epistemológica é, segundo Gaston Bachelard, o resultado de esforços para se desvincular de concepções anteriores que atrapalham, ou dão apenas uma ilusão de explicação. (48, p. 234-235) Como vimos, para Bachelard a matematização da mecânica promovida por Newton representou uma ruptura com relação a outras formas de pesquisa, mais engessadas e sem espaço para realizações empíricas, como mencionado na seção 2.4. Assim, a passagem de uma visão de mundo mais mecanicista para outra mais matematizada pode representar uma ruptura na maneira de validar conhecimentos acerca do mundo (por um filósofo natural da época).

Como citado no fim do capítulo 2, Bachelard entendia a matematização realizada por Newton na mecânica como positiva e sadia, formando “um plano que pode reunir numa mesma visão geral até as atrações e as repulsões elétricas”. (47, p. 286) Bachelard via em

Coulomb um exemplo de ruptura epistemológica na eletrostática. Por exemplo, ao comentar sobre a eletrostática no século XVIII, Bachelard comenta:

veremos como foram tardias e excepcionais as tentativas de geometrização nas doutrinas da eletricidade estática, visto que foi preciso aguardar a ciência *enfadonha* de Coulomb para encontrar as primeiras leis científicas da eletricidade. Em outros termos, ao ler vários livros dedicados à ciência da eletricidade no século XVIII, o leitor moderno perceberá, a nosso ver, a dificuldade que tiveram para deixar de lado o aspecto pitoresco da observação primeira, para descolorir o fenômeno elétrico, para expurgar da experiência os elementos parasitas e os aspectos irregulares. Ficará claro que a primeira visão empírica não oferece nem o *desenho* exato dos fenômenos, nem ao menos a descrição bem ordenada e hierarquizada dos fenômenos. (47, p. 36-37)

Então, seguindo Bachelard, Coulomb representa uma ruptura com a ciência da época por adicionar leis científicas ao que antes era pitoresco, confuso e inexato. Porém, os trabalhos de Coulomb são baseados em partes nessa ciência pitoresca. A título de exemplo, Coulomb defende a teoria de dois fluidos elétricos de Symmer, baseada primeiro em observações com meias eletrificadas de cores diferentes (branca e preta). Para Bachelard, isso indica um “espírito pré-científico”, que supervaloriza todas as variáveis de um fenômeno. (47, p. 268-269) Nesse caso, para Bachelard:

A cor de um projétil não modifica suas propriedades balísticas. Talvez interesse ver como o espírito científico reduz as circunstâncias inúteis. É conhecida a teoria dos dois fluidos de Symmer, mas o que talvez não se conheça é que ela foi, primeiro, de certa forma, a teoria de suas meias. (47, p. 273)

Assim, segundo Bachelard, uma teoria científica tentaria separar qual a relação entre a natureza química, que colore os objetos, e a eletricidade, desprezando a coloração em si. (47, p. 273-274)

Porém, nossa proposta encontra-se como contraponto ao conceito de ruptura e a filosofia de Bachelard aplicada à matematização, pois observamos na história da matematização da eletrostática no século XVIII uma diversidade de estilos de matematizações coexistindo. Observamos concordância entre explicações matematizadas e mecanicistas, o caso do capítulo 3 e 4. Mas, em outros, há uma interação antagonica e conflituosa entre eles, como no caso do capítulo 5.

Com os estilos definidos como uma substituição às rupturas, observamos no capítulo 5 que alguns estilos são mais próximos de outros, apesar de dissimilaridades. Além disso, alguns estilos influem na formação de outros – o caso de Aepinus provavelmente influenciando Coulomb, por exemplo. Para abarcar esses estilos ressoantes, concluímos definindo um *projeto epistêmico* de matematização.

Um projeto epistêmico de matematização é definido por um conjunto de estilos de matematização que compartilham táticas de matematização e prioridades ao uso da matemática em suas teorias e nas explicações construídas no bojo destas. Assim, como os estilos em Aepinus e em Coulomb priorizam a matemática frente aos pressupostos físicos e aos experimentos, temos um projeto; isto é, características em comum. Como os dois autores demonstravam um viés newtoniano, podemos chamar esse projeto de um *projeto newtoniano* de matematização.

O trabalho de Johann Euler, por outro lado, não foi muito difundido na época. Por isso, no século XVIII, ele não parece ter feito parte de nenhum projeto epistêmico. Porém, no século XIX, o eletromagnetismo de Faraday, no qual as forças eletromagnéticas eram mediadas pelas “linhas de força”, ganhou status de matematizado devido aos desenvolvimentos de William Thomson (1824-1907) e James Clerk Maxwell (1831-1879). Com isso, abriu-se uma disputa entre o eletromagnetismo por meio mediado – via éter – e o eletromagnetismo de forças atuantes a distância⁸⁷. (70, p. 87-90)

Na teoria matematizada de Maxwell, suas equações eram formalmente semelhantes às equações de sólidos elásticos e da dinâmica de fluidos. Por isso, Maxwell supôs que todo o espaço era preenchido por uma substância, chamada éter, que transmitiria as forças elétrica e magnética. Na teoria de Maxwell, o éter era um ente físico real. Para ele, o campo elétrico era associado a tensões no éter; o campo magnético ficava associado, alternativamente, a um movimento de rotação no éter. Vemos, portanto, os campos elétrico e magnético sendo interpretados como propriedades mecânicas pertencentes a esse éter. Com isso, esse ente ganhava uma dinâmica própria, com forças, pressões, energia – a energia eletrostática era uma energia potencial associadas às tensões no éter; a energia magnética, a uma energia cinética de rotação –, entre outros conceitos dinâmicos. (70, p. 87-159) Dessa forma, seguindo a teoria de Maxwell, o éter do final do século XIX também possuía um caráter mecanicista.

Como Maxwell havia previsto teoricamente a existência de ondas eletromagnéticas no espaço vazio de matéria com velocidade igual à da luz, ele concluiu que a luz era um fenômeno eletromagnético e que o éter que transmitiria as forças eletromagnéticas era o mesmo pelo qual as ondas luminosas se propagavam. A partir de 1887, com os experimentos de Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) sobre polarização, comprimento de onda e velocidade

⁸⁷ Para um exemplo desse debate entre ação mediada e ação à distância no século XIX, pode-se consultar a seguinte referência: (110). Nela, vemos que Oliver Heaviside (1850-1925), por exemplo, era a favor da ação mediada.

de ondas eletromagnéticas, a teoria de Maxwell passou a ser mais aceita, em detrimento às teorias eletromagnéticas baseadas na ação à distância. (70, p. 87-90)

O éter eletromagnético estava, nesse processo, amalgamando-se com o éter óptico, que já era aceito por teorias ondulatórias da luz e que tomara o espaço de teorias ópticas corpusculares no início do século XIX, após estudos envolvendo a difração e a interferência. Duas importantes teorias etéreas para a luz eram a de Fresnel – com o arrastamento parcial de éter – e a de Stokes – com o éter viscoso –, ambas anteriores a 1873, data da publicação do principal trabalho de Maxwell sobre eletromagnetismo. (70, p. 39-90)

Assim, o estilo de matematização de Johann Euler, relacionando o éter que ele havia postulado a um fluido e seguindo a matematização já presente na hidrodinâmica, encaixa-se em um longo *projeto* de matematizar a física sem ação à distância que aparece nos séculos XIX e XX. Em outras palavras, matematizar a física priorizando teorias e explicações mecanicistas, já que o éter do século XIX também possuía tais características, apesar de estar restringido ao seu contexto histórico e, portanto, apresentar diferenças com relação ao éter postulado por J. Euler. Podemos, então, nomear esse projeto de *projeto hidrodinâmico*, pois o fio condutor entre esses estilos de matematização era tratar o éter como um fluido (ou um corpo elástico) dotado de propriedades que entendemos aqui como mecanicistas. Portanto, apesar de não parecer que haja uma influência explícita dos trabalhos de Johann Euler sobre eletricidade nos desenvolvimentos da física do século XIX (e começo do século XX), podemos enquadrar seu estilo mecanicista de matematização dentro de um projeto epistêmico maior que também faz uso do mecanicismo subjacente às teorias etéreas.

Atualmente, a física se afastou de teorias baseadas na ação à distância. Do ponto de vista quântico, interações a distância são trocas de partículas – como, por exemplo, fótons, para as forças eletromagnéticas. Do ponto de vista relativístico, uma interação gravitacional é mediada pelas propriedades do espaço-tempo. Apesar desse consenso, ainda é possível encontrar posições recentes favoráveis ao uso da ação à distância. (111-112)

O desenvolvimento da relatividade geral no começo do século XX permitia hipotetizar um éter, como Albert Einstein (1879-1955) notara. Além disso, nenhum experimento refutou o éter. (70, p. 256-263) Porém, a física atual, em sua grande maioria, afastou-se dessa entidade física postulada (apesar do vácuo possuir, segundo as teorias atuais, propriedades físicas próprias). Todavia, experimentos favoráveis à existência do éter foram realizados até a metade do século XX, por Leopold Courvoisier (1873-1955). (113) Ademais, é possível encontrar, até hoje, exemplos pouco conhecidos de teorias físicas matematizadas que assumem a existência de um éter, como o éter do físico romeno Ioan-Iovitz Popescu (1932-),

constituído de partículas e tratado como um fluido com o auxílio da termodinâmica e da hidrodinâmica. (114)

Em resumo, o *projeto newtoniano* de matematização suplantou por algum tempo o *projeto hidrodinâmico*. Em outras palavras, a matematização predominante foi, por um tempo, pertencente a diferentes estilos que se encaixavam na nossa definição de projeto newtoniano. Isso fica claro no estilo de matematização de Coulomb e no uso da ação à distância por algumas teorias eletromagnéticas no século XIX, como a de Wilhem Eduard Weber (1804-1891). (111) Mas, o projeto hidrodinâmico (*i.e.*, mais mecanicista) ganhou espaço ao longo do século XIX e encontra-se nas origens históricas da teoria da relatividade especial, especialmente graças aos trabalhos de Maxwell, Jules Henri Poincaré (1854-1912) e Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), que, na esteira da teoria eletromagnética de Maxwell, também postulavam um éter.

Em conclusão, nossos conceitos de *estilo* e *projeto epistêmico* para tratar da matematização da eletrostática no século XVIII nos auxiliam a apreciar nosso recorte histórico em um contexto mais amplo, mas que ao mesmo tempo preserva e valoriza suas nuances. Podemos, portanto, tecer os estilos vistos em um conceito maior, assim como a soma vetorial retorna um vetor resultante. Com isso, formamos a figura abaixo, que nos ajuda a visualizar a relação entre estilos e projetos. Nela, vemos os estilos de Franz Aepinus e Coulomb desparelhados, pois não são iguais; porém, eles se tocam, indicando influência – de Aepinus em Coulomb – e similaridade – com o polo da matematização sendo priorizado. O projeto newtoniano aponta para a matematização porque os estilos dentro dele priorizam mais facilmente esse polo em suas explicações. Por outro lado, o projeto hidrodinâmico aponta para o mecanicismo porque seus estilos conseguem priorizar o outro polo; isto é, têm mais facilidade em usar o polo mecanicista na construção de suas explicações.

Figura 6.2 – Vemos aqui os estilos de matematização em Franz Aepinus e Coulomb como próximos, sendo somados em um conceito maior – o de projeto newtoniano. O estilo em Johann Euler segue separado, formando outro projeto – o hidrodinâmico. Os círculos referentes à matematização e ao mecanicismo indicam para qual desses dois polos os projetos transitam mais facilmente; isto é, qual desses polos os estilos – com suas explicações e articulações teóricas – priorizam. Alguns estilos priorizam o polo da matematização – como Aepinus e Coulomb – e, assim, esse polo termina encabeçando vários aspectos da teoria, como a articulação de hipóteses e experimentos. Outros, por outro lado, priorizam o polo mecanicista, como o estilo em Johann Euler.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como definimos nossos conceitos em contraponto ao conceito de ruptura (e obstáculo) de Bachelard, podemos tentar entender esses eventos históricos à luz das rupturas epistemológicas: o projeto newtoniano foi o primeiro a se expandir, por volta do século XVIII, graças à aceitação dos trabalhos de Coulomb em boa parte da Europa e a expansão da teoria newtoniana da gravitação, entendida por muitos na época como uma teoria baseada em uma ação à distância inata ao mundo. (3, p. 48) Assim, poderíamos afirmar, seguindo Bachelard, que houve uma ruptura com a imagem de um fluido sutil espalhado por todo o espaço, que obstaculizava o pensamento científico.

Se seguirmos Bachelard, observaremos esse movimento de volta ao éter como uma nova ruptura e, por isso, teremos dificuldade em empregar seus conceitos, pois as teorias do século XIX estavam voltando para o que, em termos bachelardianos, seria um antigo obstáculo epistemológico. Pois, a ruptura ocorrida pelo newtonianismo de Aepinus e Coulomb rompeu, no caso da eletrostática no século XVII, justamente com o obstáculo causado pelo éter. Porém, o eletromagnetismo do século XIX retornou ao éter, suposto obstáculo, e se juntou a óptica, desenvolvendo explicações para fenômenos experimentais (quantitativos). Esse retorno ao éter pode ser visto como um movimento de “bate-e-volta”. A ruptura e o obstáculo epistemológicos não conseguem, por sua vez, capturar com sucesso esse

“bate-e-volta” e, assim, tornam-se conceitos inócuos para lidar com a história da eletricidade no século XVIII e, por consequência, do eletromagnetismo e óptica no século XIX. Além disso, a imagem desse fluido hipotético, chamado éter, nunca sumiu em definitivo na história da física e já havia sido matematizada, como o trabalho de Johann Euler nos mostra. Não obstante, o éter volta com bastante influência no século XIX junto com os desenvolvimentos das teorias óptica e eletromagnética, ambas matematizadas. Ele se encontra na gênese da teoria da relatividade especial.

Portanto, ao tentar transpor os conceitos bachelardianos de ruptura e obstáculo epistemológicos para a história da eletrostática no século XVIII, vemos que eles não se aplicam a esse recorte histórico. Julgamos, finalmente, que nossa análise pautada em estilos de matematização e projetos epistêmicos é mais adequada por descrever e resumir o retorno ao éter sem contradições, diferente do caso da ruptura epistemológica e do obstáculo epistemológico de Bachelard, que parecem perder esse movimento histórico de “bate-e-volta”.

6.4 O lugar da matemática: perdas e ganhos

Atualmente, o uso da matemática é onipresente na física. Mas nem todos os físicos sentiram-se confortáveis com o tamanho da importância que a matemática goza na física atual. Além dos exemplos citados na seção 2.1, David Bohm (1917-1992), já no século XX, afirmou que “eu [David Bohm] sinto que a atual ênfase na matemática foi muito longe”. (115, p. 7) Para ele, “*todo* tipo de pensamento, matemático incluso, é uma abstração que não é e não deve cobrir a realidade por inteiro”. (115, p. 8) Assim, a matemática não deve ser a única forma de raciocínio na física, apenas mais uma dentre outras.

O consenso atual é o de fazer uso da matemática sem receios. Porém, nas margens da física é possível encontrar discussões recentes sobre seu papel, por vezes negativo, nas explicações físicas. Além da opinião de Bohm, pode-se consultar alguns trabalhos⁸⁸, como o livro *Scientific Nihilism: On the Loss and Recovery of Physical Explanations*, de Daniel Athearn (116), para uma crítica da falta de conteúdo físico nas explicações físicas atuais, que se baseiam em um forte uso de modelos e teorias matemáticos. Para esta tese, o efeito negativo principal em relação ao uso da matemática é a relação conflituosa que ela apresenta

⁸⁸ Em certo sentido, o livro *Science Without Numbers* de Hartry Field (117) pode ser visto pela luz da aplicação da matemática e da suposta indispensabilidade de entidades matemáticas em teorias físicas. Nesse livro, Field descreve a física clássica e a teoria da gravitação newtoniana apenas quantificando regiões físicas do espaço e do tempo (sua componente empírica) e com o uso do formalismo lógico.

no estilo de Coulomb. Nesse caso, ela acaba prejudicando o raciocínio mecanicista de sua teoria.

O caso de J. Euler, por outro lado, tem uma interação construtiva entre os dois polos. Porém, ele não consegue explicar de forma razoável alguns fenômenos da época, como a garrafa de Leiden. Nesse mesmo sentido, vimos na subseção 4.4.2 que a falta de profundidade no estilo mecanicista de J. Euler o deixa deficiente em relação a outro estilo (e outra teoria) da época – a de Aepinus.

Em resumo, os casos de Coulomb e Johann Euler mostram dois tipos de *perda epistêmica* (ou *desvantagem epistêmica*) relacionadas à matematização. No primeiro, o mecanicismo perde relevância e sua teoria acaba com uma contradição. No segundo, J. Euler perde profundidade para estudar fenômenos mais complexos.

No entanto, cada um dos dois estilos mostra *ganhos epistêmicos* (ou *vantagens epistêmicas*). No caso de Coulomb, os ganhos se dão pela sua capacidade de relacionar experimentos quantitativos à resultados matemáticos, além de deduzir teoremas. No caso de J. Euler, o ganho está relacionado a manutenção da abstração física que seu mecanicismo permite. Portanto, as perdas e ganhos em ambos estão conectados à maneira pela qual cada estilo rege as explicações de cada teoria.

No caso de Franz Aepinus, não nos parece haver perdas. Assim, ele é capaz de prever matematicamente novos resultados e de conduzir diálogos entre matemática, teoria e experimentos, assim como Coulomb. Além disso, ele consegue seguir raciocínios mecanicistas quando necessário, um ganho também presente no trabalho de J. Euler. Dessa forma, o estilo construtivo que vemos em Aepinus mescla os ganhos (ou vantagens) presentes nos outros dois. Finalmente, podemos afirmar que o estilo de matematização construtivo é mais benéfico, de um ponto de vista epistêmico, à teoria, como o caso de Aepinus nos mostra.

Entretanto, deve-se ressaltar que o valor desses ganhos e perdas depende do ator histórico. Um ator histórico mais inclinado a acreditar e defender o éter – ou seja, mais inclinado ao mecanicismo – poderá atenuar o valor da perda epistêmica presente nas explicações de Johann Euler, dando maior relevância ao mecanicismo dele. De outro modo, um outro ator histórico mais inclinado à matematização (e à ação à distância) provavelmente não dará relevância à perda epistêmica em Coulomb. Nesse caso, ele poderia classificá-la como um problema irrelevante, ou até mesmo modificar a teoria de Coulomb para uma teoria de um fluido elétrico, sanando assim o antagonismo já discutido entre aquela dedução matemática – sobre a distribuição de fluido elétrico em um condutor – e a teoria de dois fluidos elétricos. Um ator histórico avesso a matemática pode, aliás, avaliar os usos da

matemática em Aepinus como uma perda epistêmica por si só, mesmo que ela tenha sido observada aqui como um ganho justamente por trazer novas possibilidades nas explicações e articulações teóricas. Neste último caso, um ganho acaba interpretado como perda; como se seu sinal algébrico mudasse do positivo para o negativo. Assim, há aqui uma variável individual que depende do ator histórico, de seu contexto e de suas preferências. Em conclusão, esses ganhos e perdas funcionam como um cálculo de *trade-off*; isto é, um custo-benefício avaliado por cada ator histórico e, portanto, dependem de como ele leva em consideração suas prioridades (em suas explicações) e suas estratégias e táticas de explicação e de matematização.

No final do capítulo 2, afirmamos que levaríamos em consideração a indistinguibilidade entre diversos processos históricos de diferentes matematizações, independentemente de serem considerados hoje os “vencedores” ou “perdedores”. Ao final, contudo, chegamos em um esquema que nos permite avaliar – mesmo que sem um cálculo quantitativo – os pontos fortes e fracos dos estilos (ou formas) de matematização. Portanto, temos aqui um processo iterativo; começamos sem diferenciar as teorias e os atores históricos e, após analisá-las com a ajuda de andaimes filosóficos e montando nossa própria análise, terminamos conseguindo pontuar possíveis ganhos e perdas – ou vantagens e desvantagens – epistêmicas nesses estilos de matematização. Porém, isso não significa que podemos apontar um “vencedor”, pois esse resultado dependeria da atribuição, mesmo que imprecisa, de valores e relevância para esses ganhos e perdas. Essa atribuição depende, como afirmamos no parágrafo anterior, de variáveis individuais e contingenciais presentes no processo histórico em análise.

Desse modo, podemos evitar um relativismo absoluto, que defenderia neste caso que todos os estilos são essencialmente iguais (de um ponto de vista epistêmico), pois podemos identificar possíveis pontos fortes e fracos, de um ponto de vista epistemológico, em cada estilo. Porém, também evitamos conceber uma régua absoluta e inflexível que normalize atos, escolhas e mediações dos atores históricos, o que nos levaria a desconsiderar os contextos históricos de cada um deles e implicaria, em última instância, em uma leitura *whiguista* ou até mesmo anacrônica da história da física.

REFERÊNCIAS

- 1 ROLLER, D.; ROLLER, D. H. D. The development of the concept of electric charge. In: CONANT, J. B.; NASH, L. K.; ROLLER, D. (ed.). *Harvard case histories in experimental science*. Harvard: Harvard University Press, 1957. v. 2. p. 540-632.
- 2 ASSIS, A. K. T. *Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade*. Montreal: C. Roy Keys Inc, 2010.
- 3 HEILBRON, J. L. *Electricity in the 17th and 18th centuries*. Los Angeles: University of California Press, 1979.
- 4 CORSON, D. W. Pierre Polinière, Francis Hauksbee, and electroluminescence: a case of simultaneous discovery. *Isis*, v. 59, n. 4, p. 402-413, 1968.
- 5 RAICIK, A. C.; PEDUZZI, L. O. Q. Um resgate histórico e filosófico dos estudos de Stephen Gray. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 16, n. 1, p. 109-128, 2016.
- 6 CHIPMAN, R. A. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707-1708. *Isis*, v. 45, n. 1, p. 33-40. 1954.
- 7 CLARK, D. H.; MURDIN, L. The enigma of Stephen Gray astronomer and scientist (1666–1736). *Vistas in Astronomy*, v. 23, p. 351-404, 1979. DOI: 10.1016/0083-6656(79)90018-7.
- 8 DUFAY, C. F. C. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning electricity. Translated from the French by T. S. M D. *Philosophical Transactions*, v. 38, n. 431, p. 258-266, 1733.
- 9 BOSS, S. L. B.; CALUZI, J. J. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, p. 635-644, 2007.
- 10 NOLLET, J. A. Conjectures sur les causes de l'électricité des corps. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, p. 107-151, 1749.
- 11 SILVA, C. C. Jean Antoine Nollet's contributions to the institutionalization of physics during the 18th Century. In: KRAUSER, D.; VIDEIRA, A. (ed.). *Brazilian studies in philosophy and history of science: an account of recent works*. 2011, p. 131-140. (Boston studies in the philosophy of science, v. 290).
- 12 SILVA, C. C.; HEERING, P. Re-examining the early history of the Leiden jar – stabilization and variation in transforming a phenomenon into a fact. *History of Science*, v. 56, n. 3, p. 1-29, 2018.
- 13 HEILBRON, J. L. G. M. Bose: the prime mover in the invention of the Leyden jar? *Isis*, v. 57, n. 2, p. 264-267, 1966.
- 14 FINN, B. S. An appraisal of the origins of Benjamin Franklin's electrical theory. *Isis*, v. 60, n. 3, p. 362-369, 1969.
- 15 WATSON, W. A sequel to the experiments and observations tending to illustrate the nature and properties of electricity, in a letter to the Royal Society from the same. *Philosophical Transactions*, v. 44, n. 484, p. 704-749, 1746.

- 16 FRANKLIN, B. A letter from Benjamin Franklin to Peter Collinson, 28 March. 1747. Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-03-02-0055>>. Acesso em: 05 fev. 2020.
- 17 FRANKLIN, B. *A letter from Benjamin Franklin to Peter Collinson, 28 July. 1747.* Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-03-02-0072>. Acesso em: 05 fev. 2020.
- 18 MOURA, B. A. *A filosofia natural de Benjamin Franklin: traduções de cartas e ensaios sobre a eletricidade e a luz.* Santo André: EdUFABC, 2019.
- 19 AEPINUS, F. U. T. *Aepinus's essay on the theory of electricity and magnetism.* Tradução e introdução de Roderick Weir Home e P. J. Connor. Princeton: Princeton University Press, 1979.
- 20 FRANKLIN, B. *A letter from Benjamin Franklin to John Lining, 18 March 1755.* Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-05-02-0149>. Acesso em: 05 fev. 2020.
- 21 HOME, R. W. Electricity in France in the post-Franklinian era. In: HOME, R. W. (ed.). *Electricity and experimental physics in eighteenth-century Europe.* London: Variorum, 1992. p. 55-58.
- 22 HOME, R. W. Franklin's electrical atmospheres. *British Journal for the History of Science*, v. 6, n. 2, p. 131-151, 1972.
- 23 HEILBRON, J. L. Robert symmer and the two electricities. *Isis*, v. 67, n. 1, p. 7-20, 1976.
- 24 FRÄNGSMYR, T. The mathematical philosophy. In: FRÄNGSMYR, T.; HEILBRON, J. L.; RIDER, R. E. (ed.). *The quantifying spirit in the 18th century.* Los Angeles: University of California Press, 1990. p. 27-44.
- 25 AEPINUS, F. U. T. *Commentatio de notione quantitatis negativae.* Rostock: Seren. Princ. et Acad., 1754.
- 26 HOME, R. W. Aepinus, the tourmaline crystal, and the theory of electricity and magnetism. *Isis*, v. 67, n. 1, p. 21-30, 1976.
- 27 WILSON, B. A letter from Mr. B. Wilson, F. R. S. and member of the Royal Academy at Upsal, to Mr. Aepinus, professor of natural philosophy in the Imperial Academy of Sciences at St. Petersburg, and member of the Academies of Berlin, Stockholm, and Erfurth. *Philosophical Transactions*, v. 53, p. 436-466, 1763.
- 28 AEPINUS, F. U. T. *Recueil de different memoires sur la Tourmaline.* São Petersburgo: L'Académie des Sciences, 1762.
- 29 HOME, R. W. Science as a career in Eighteenth-Century Russia: the case of F. U. T. Aepinus. *Slavonic and East European Review*, v. 51, n. 122, p. 75-94, 1973.
- 30 BUENO, O.; COLYVAN, M. An inferential conception of the application of mathematics. *Noûs*, v. 45, n. 2, p. 345-374, 2011.
- 31 GINGRAS, Y. What did mathematics do to physics? *History of Science*, v. 39, n. 4, p. 383-416, 2001.
- 32 COHEN, H. F. *The scientific revolution: a historiographical inquiry.* Chicago: University of Chicago Press, 1994.

- 33 MARTINS, R. A. Descartes e a impossibilidade de ações à distância. In: FUKS, S. (ed.). *Descartes 400 anos: um legado científico e filosófico*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1998. p. 79-126.
- 34 CASTEL, L. B. *Le vrai système de physique générale de M. Isaac Newton: a la portée du commun des physiciens*. Paris: Chez Claude-François Simon, 1743.
- 35 HESSE, M. B. Action at a distance in classical physics. *Isis*, v. 46, n. 4, p. 337-353, 1955.
- 36 DEMONVILLE, A. L. G. *Vrai système du monde*. Paris: L'auteur, 1837. v. 2.
- 37 MORDECHAI, F. Mathematicians and naturalists: Sir Isaac Newton and the Royal Society. In: BUCHWALD, J. Z.; COHEN, I. B. (ed.). *Isaac Newton's natural philosophy*. Cambridge: The MIT Press, 2001. p. 77-102.
- 38 BUENO, O; FRENCH, S. *Applying mathematics: immersion, inference, interpretation*. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- 39 SALMON, W. C. *Four decades of scientific explanation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2006.
- 40 BATTERMAN, R. W. On the explanatory role of mathematics in empirical science. *British Journal for the Philosophy of Science*, v. 61, n. 1, p. 1-25, 2010.
- 41 WIGNER, E. P. The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural science. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, v. 13, n. 1, p. 1-14, 1960.
- 42 FERREIRA, S. P. A; DIAS, M. G. B. B. A leitura, a produção de sentidos e o processo inferencial. *Psicologia em Estudo*, v. 9, n. 3, p. 439-448. 2004.
- 43 VELUPILLAI, K. V. The unreasonable ineffectiveness of mathematics in economics. *Cambridge Journal of Economics*, v. 29, n. 6, p. 846-872, 2005.
- 44 LESK, A. M. The unreasonable effectiveness of mathematics in molecular biology. *Mathematical Intelligencer*, v. 22, n. 2, p. 28-37, 2000.
- 45 PINCOCK, C. A new perspective on the problem of applying mathematics. *Philosophia Mathematica*, v. 12, n. 2, p. 135-161, 2004.
- 46 CANEVA, K. L. What in truth divides historians and philosophers of science? In: MAUSKOPF, S; SCHMALTZ, T. (ed.). *Integrating history and philosophy of science*. New York: Springer, 2012. p. 49-57. (Boston studies in the philosophy of science, v. 263).
- 47 BACHELARD, G. *A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento*. Tradução de Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- 48 BONTEMS, V. *Bachelard*. Tradução de Nícia Adan Bonatti. São Paulo: Estação Liberdade, 2017.
- 49 JAQUEL, R. Leonhard Euler, son fils Johann Albrecht Euler et leur ami Jean III Bernoulli jusqu'en 1766. In: FELLMANN, E. A. et al. *Leonhard Euler 1707-1783: beiträge zu Leben und Werk*. Basel: Birkhäuser, 1983. p. 435-446.
- 50 DULAC, G. Deux réseaux au service de l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg: autour de Ribeiro Sanches et de Johann Albrecht Euler. *Dix-huitième Siècle*, v. 1, n. 40, p. 193-210, 2008.

- 51 HOME, R. W. On two supposed works by Leonhard Euler on electricity. *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, v. 25, n. 96, p. 3-7, 1975.
- 52 YUSHKEVICH, A. P. *Die Berliner und die Petersburger Akademie der Wissenschaften im Briefwechsel Leonhard Eulers*. Berlin: Akademie-Verlag, 1959.
- 53 EULER, J. A. Recherches sur la cause physique de l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Science et Belles Lettres*, v. 13, p. 125-159, 1759.
- 54 HERBERT, von J. *Theoriae phaenomenorum electricorum: quae seu electricitatis ex redundante corpore in deficiens traiectu, seu sola atmosphaerae electricae actione Gignuntur*. Vienna: Iosephi nob. de Kurtzböv, 1778.
- 55 HEMMER. *Sur l'électricité des métaux: observations sur la physique, sur l'histoire naturelle et sur les arts*. Paris: Panckoucke, 1780. p. 50-52.
- 56 FRANKLIN, B. *A letter from Benjamin Franklin to Cadwallader Colden, 23 april 1752*. Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-04-02-0103>. Acesso em: 30 dez. 2020.
- 57 NARDI, L. M. C.; SILVA, C. C. A matematização dos estudos elétricos antes de Coulomb: as contribuições de Johann Euler no século XVIII, acompanhada de uma tradução comentada de seu Recherches sur la Cause Physique de l'Electricité. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. e20200396, 2021. DOI: 10.1590/1806-9126-rbef-2020-0396.
- 58 GANDT, F. La réception de Newton : philosophes et géomètres. *Revue du Nord*, v. 77, n. 312, p. 845-857, 1995.
- 59 KITCHER, P. The foundation of mathematics. In: CANTOR, G. N.; CHRISTIE, J. R. R.; HODGE, M. J. S.; OLBY, R. C. (ed.). *Companion to the history of modern science*. London: Routledge, p. 677-689, 1996.
- 60 SUISKY, D. *Euler as physicist*. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- 61 DIAS, M. C. D. Leonhard Euler's "principles of mechanics" (an essay on the foundations of the equations of motion). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 4, p. e4601, 2017.
- 62 COELHO, R. L. On the deduction of Newton's second law. *Acta Mechanica*, v. 229, n. 5, p. 2287-2290, 2018.
- 63 RAVETZ, J. The representation of physical quantities in eighteenth-century mathematical physics. *Isis*, v. 52, n. 1, p. 7-20, 1961.
- 64 DARRIGOL, O.; FRISCH, U. From Newton's mechanics to Euler's equations. *Physica D: nonlinear phenomena*, v. 237, n. 14-17, p. 1855-1869, 2008.
- 65 FRISI, P. *Causa Electricitatis Dissertatio*. In: dissertationes selectae Johannes Alberti Euleri, Paulli Frisii et Laurentii Béraud, quae ad imperialem scientiarum petropolitanam Academiam an. 1755 missae sunt, cum electricitatis caussa & theoria, Praemio proposito, quaereretur. São Petersburgo: Petropoli & Lucae, 1757, p. 43-131.
- 66 GOLDSTINE, H. H. *A history of the calculus of variations from the 17th through the 19th century*. New York: Springer-Verlag, 1980.
- 67 VELLANDO, P. ...and so Euler discovered differential equations. *Foundations of Science*, v. 24, n. 2, p. 343-375, 2019.

- 68 KATZ, V. J. *A history of mathematics: an introduction*. 3rd ed. New York: Addison-Wesley, 2009.
- 69 PRIESTLEY, J. *The history and present state of electricity*. 3rd ed. London: University of Michigan Press, 1775. v. 2.
- 70 MARTINS, R. A. *A origem histórica da relatividade especial*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.
- 71 HAÜY, R. J. *Exposition Raisonnée de la théorie de l'électricité et du magnétisme, d'après les principes de M. Aepinus*. Paris: Veuve Desaint, 1787.
- 72 FRANKLIN, B. *A letter from Benjamin Franklin to John Withrop, 10 July 1764*. Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-11-02-0073>. Acesso em: 21 nov. 2020.
- 73 FRANKLIN, B. *A letter from Benjamin Franklin to Peter Collinson, September 1753*. Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-05-02-0021>. Acesso em: 19 dez. 2020.
- 74 CAJORI, F. *A history of mathematical notations*. New York: Dover Publications, 1993. v. 2.
- 75 MEDEIROS, A. As origens históricas do eletroscópio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 24, n. 3, p. 353-360, 2002.
- 76 CAJORI, F. *A history of mathematical notations*. New York: Dover Publications, 1993. v. 1.
- 77 SWINDEN, J. H. van. *Recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme*. Haye: Libraires Associés, 1784. v. 2.
- 78 LALANDE, J. *Abrégé d'astronomie*. Paris: Veuve Desaint, 1774.
- 79 ADAMS, G. *Lectures on natural and experimental philosophy*. London: R. Hindmarsh, 1794. v. 4.
- 80 MILLER, G. Observations on the theory of electric attraction and repulsion. *Transactions of the Royal Irish Academy*, v. 7, p. 139-150, 1800.
- 81 JACKSON, J. D. *Classical electrodynamics*. 3rd ed. New York: John Wiley, 1999.
- 82 GILLMOR, C. S. *Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France*. Princeton: Princeton University Press, 1971.
- 83 COULOMB, C. A. Recherches sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées. *Mémoires de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences*: par divers savans et lûs dans ses assemblées, v. 9, 1777.
- 84 FRANKLIN, B. *Oeuvres de M. Franklin*. Traduites de l'Anglois sur la quatrième édition par M. Barbeau Dubourg. Paris: Esprit, 1773. v. 1.
- 85 PRIESTLEY, J. *Histoire de l'électricité*. Traduite de l'Anglois de Joseph Priestley, avec des Notes critiques. Paris: Herissant le fils, 1771. v. 3.
- 86 BASHKINA, N. N. et al. *The United States and Russia: the beginning of relations, 1765-1815*. Washington: U.S. Government Publishing Office, 1980.

87 ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES. *Procès-verbaux*. Registre de l'Académie Royale des Sciences, 24 de março de 1787. Disponível em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k557829/f251.item.r=28>. Acesso em: 16 março 2021.

88 ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES. *Procès-verbaux*. Registre de l'Académie Royale des Sciences, 21 de julho de 1787. Disponível em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k557829/f580.item.r=28>. Acesso em: 16 março 2021.

89 HEERING, P. Regular twists: replicating Coulomb's wire-torsion experiments. *Physics in Perspective*, v. 8, n. 1, p. 52-63, 2006.

90 POTIER, A. *Collection de mémoires relatifs à la physique: mémoires de Coulomb*. Paris: Gauthier-Villars, 1884. v. 1.

91 COULOMB, C. A. 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 torsion proportionnelle à l'angle de torsion. *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, 1785.

92 ASSIS, A. K. T. *Arquimedes, o centro de gravidade e a lei da alavanca*. Montreal: C. Roy Keys Inc., 2008.

93 HETT, W. S. *Aristotle: minor works*. Cambridge: Harvard University Press, 1936.

94 COXHEAD, M. A. A close examination of the pseudo-Aristotelian mechanical problems: the homology between mechanics and poetry as technē. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 43, n. 2, 2012.

95 EULER, L. *Mechanica*. Saint Petersburg: Imperial Academy of Sciences, 1736. v. 1.

96 HEERING, P. The replication of the torsion balance experiment the inverse square law and its refutation by early 19th-century german physicists. In: BLONDEL, C.; DÖRRIES, M. (ed.). *Restaging Coulomb: usages, controverses et replications autour de la balance de torsion*. Florença: Biblioteca di Nuncius, Studi e Testi Leo S. Olschki, 1994. p. 47-66.

97 FALCONER, I. Charles Augustin Coulomb and the fundamental law of electrostatics. *Metrologia*, v. 41, n. 5, S107, 2004.

98 ROBISON, J. *Electricity*. Encyclopaedia Britannica: supplement, 1803. v. 1.

99 HEERING, P. On Coulomb's inverse square law. *American Journal of Physics*, v. 60, n. 11, p. 988-994, 1992.

100 COULOMB, C. A. Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme, où l'on détermine suivant quelles lois le fluide magnétique ainsi que le fluide électrique agissent soit par répulsion, soit par attraction. *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, 1787. Disponível em: https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Coulomb/Coulomb_pdf/Mem1785_p578.pdf. Acesso em: 17 março 2021.

101 COULOMB, C. A. Troisième mémoire sur l'électricité et le magnétisme, de la quantité d'électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné, soit par le contact de l'air plus ou moins humide, soit le long des soutiens plus ou moins idioélectrique. *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, 1787. Disponível em: https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Coulomb/Coulomb_pdf/Mem1785_p612.pdf. Acesso em: 17 março 2021.

- 102 COULOMB, C. A. Quatrième mémoire sur l'électricité et le magnétisme, où l'on démontre deux principales propriétés du fluide électrique. *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, 1787. Disponível em: https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Coulomb/Coulomb_pdf/Mem1786_p67.pdf. Acesso em: 17 março 2021.
- 103 BLONDEL, C.; WOLFF, B. La proportionnalité de la force électrique aux charges: définition ou loi expérimentale? Ampère et l'histoire de l'électricité. 2013. Disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/lois/proportionnalite>. Acesso em: 02 out. 2020.
- 104 ASSIS, A. K. T. *Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade*. Montreal: C. Roy Keys Inc., 2018. v. 2.
- 105 EULER, L. *Vollständige anleitung zur algebra*. Leipzig: Derlag von Philipp Reclam, 1770. v. 1.
- 106 KNUTH, D. E. Two notes on notation. *American Mathematical Monthly*, v. 99, n. 5, p. 403-422, 1992.
- 107 CAUCHY, A. L. *Cours d'analyse de l'École Royale Polytechnique*. Paris: Debure Frères, 1821. v. 1.
- 108 BAUER, E. *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*. Paris: Albin Michel, 1949.
- 109 COULOMB, C. A. Sixième mémoire sur l'électricité et le magnétisme, suite des recherches sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs corps conducteurs: détermination de la densité électrique dans les différents points de la surface de ce corps. *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, 1790.
- 110 SANTOS, H. S. T.; GARDELLI, D.; FUSINATO, P. A.; NEVES, M. C. D. "Ação a distância versus ação intermediada: contraste entre a nova e as velhas visões sobre eletricidade." Tradução comentada de um texto de Oliver Heaviside sobre ação a distância. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, n. 2, p. e20190270, 2020.
- 111 ASSIS, A. K. T. Arguments in Favour of Action at a Distance. In: CHUBYKALO A. E.; POPE, V.; SMIRNOV-RUEDA, R. (ed.). *Instantaneous action at a distance in modern physics: pro and contra*. Commack: Nova Science Publishers, 1999. p. 45-56.
- 112 GRANEAU, P.; GRANEAU, N. *In the grip of the distant universe: the science of inertia*. Singapore: World Scientific Publishing, 2006.
- 113 MARTINS, R. A. Searching for the ether: Leopold Courvoisier's attempts to measure the absolute velocity of the solar system. *DIO: the international journal of scientific history*, v. 17, p. 3-30, 2011. Disponível em: http://ether-wind.narod.ru/Martins_2011_Courvoisier/Martins_2011_Courvoisier.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.
- 114 VIANU, L. (ed.). *Ioan-Iovitz Popescu Ether and Etherons: a possible reappraisal of the concept of Ether*. Bucharest: Contemporary Literature Press, 2015.
- 115 BOHM, D.; PEAT, F. D. *Science, order, and creativity*. New York: Bantam Books, 1987.
- 116 ATHEARN, D. *Scientific Nihilism: on the loss and recovery of physical explanations*. Albany: State University of New York Press, 1994.

117 FIELD, H. *Science without numbers: a defense of nominalism*. Oxford: Oxford University Press, 2016.

118 SILVA, C. C.; PIMENTEL, A. C. As atmosferas elétricas de Benjamin Franklin e as interações elétricas no século XVIII. In: MARTINS, R. de A.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H. MARTINS, L. Al-C. P. (org.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul*: seleção de trabalhos do 5o encontro. Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC), 2008. p. 117-124.

119 HAKFOORT, C. *Optics in the age of Euler – conceptions of the nature of light, 1700 – 1795*. New York: Cambridge University Press, 1995.

120 NEWTON, I. *Principia*: princípios matemáticos de filosofia natural, livro II: o movimento dos corpos (em meios com resistência). Tradução por André K. T. Assis do livro “Principia: mathematical principles of natural philosophy”. São Paulo: EDUSP, 2008.

121 LINDSAY, R. B. The story of acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 39, n. 4, p. 629-644, 1966.

122 EULER, L. Nova theoria Lucis et Colorum. *Opuscula varii argumenti*, p. 169-244, 1746. v. 1.

123 EULER, J. A. *Disquisitio de causa physica electricitatis ab academia scientiarum imperiali Petropolitana praemio coronata in publico academiae conventu die VI septembr. CLC LC CCLV una cum aliis duabus dissertationibus de eodem argumento*. In: dissertationes selectae Johannes Alberti Euleri, Paulli Frisii et Laurentii Béraud, quae ad imperialem scientiarum petropolitanam Academiam an. 1755 missae sunt, cum electricitatis caussa & theoria, Praemio proposito, quaereretur. São Petersburgo: Petropoli & Lucae, 1757. p. 3-40.

124 MARTINS, R. A. Tratados físicos de Blaise Pascal. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 2, v. 1, n. 3, p. 1-168, 1989.

125 WEBSTER, C. The discovery of Boyle’s law, and the concept of the elasticity of air in the seventeenth century. *Archives for History of Exact Sciences*, v. 2, n. 6, p. 441-502, 1965.

126 CHALMERS, A. F. *One hundred years of pressure: hydrostatics from Stevin to Newton*. Nova York: Springer, 2017.

127 EULER, L. Principes généraux de l’état d’équilibre des fluides. *Mémoires de l’Académie des Sciences de Berlin*, v. 11, p. 217-273, 1757.

128 GRAY, S. A letter from Mr. Stephen Gray to Dr. Mortimer, Secr. R. S. containing a Farther account of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, v. 37, p. 285-291, 1732.

129 FERREIRA, G. F. L. Há 50 anos: o efeito Costa Ribeiro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 3, p. 434-443, 2000.

130 WAITZ, J. S. V. *Abhandlung von der electricitaet und deren Ursachen*. Berlim: Haude und Spener, 1745.

131 WILCKE, J. C. *Disputatio physica experimentalis, de electricitatibus contrariis*. Rostock: Adler, 1757.

Apêndice A

A.1 Comentários sobre a tradução

A publicação aqui traduzida é de 1759, mas ela foi apresentada em 1757 à Academia Real de Ciências de Berlim. Essa obra de Johann Euler aparece na seção de filosofia experimental. No texto original, Johann Euler não faz uso de notas de rodapé, então todas as notas de rodapé aqui são notas da tradução, assim como as palavras em colchetes. Elas foram usadas para clarificar trechos confusos, melhorar a redação da tradução, apresentar em detalhes momentos do texto original que não são claros e contextualizar historicamente algumas afirmações do autor original. Os parágrafos da tradução seguem a divisão do original, tanto os enumerados quanto os não-enumerados. As páginas do original foram marcadas com quebras de linhas, o número delas encontra-se em colchetes.

Antes de prosseguir, vale uma reflexão sobre a tradução da palavra *électrique*. Na época havia dois tipos de categoria para os corpos, elétricos *per se* e não-elétricos. Mas, quando Johann usa a palavra *électrique*, é possível deduzir pelo contexto que seu uso se assemelha à palavra “eletrizado” na maioria das vezes, e não a uma categoria para os corpos. Por isso, optamos por traduzir *électrique* como “eletrizado”. No 43º parágrafo enumerado, o próprio Johann Euler comenta sobre essa confusão envolvendo a referida palavra, afirmando que abandonará as categorias mencionadas “para evitar toda confusão que seria a temer dessas denominações”. (53, p. 149) Johann conclui que “as espécies [de corpos] estabelecidas são mais apropriadas para marcar essa distinção [da capacidade de ser eletrizado], sem deixar o menor equívoco”. (53, p. 150)

A palavra “elasticidade” foi usada para traduzir *élasticité*. Porém, em alguns momentos ele usa a palavra *ressort* com o mesmo significado. *Ressort* é uma palavra mais próxima da nossa palavra “mola”. Uma mola é definida como elástica, então os conceitos são próximos, mas “mola” tem um sentido mais mecânico e tangível que “elasticidade”. Nós traduzimos ambas as palavras por elasticidade, pois o contexto em que são usadas nos permite. Assim, pode-se observar que o autor pensa no éter (ou em seus constituintes) como podendo ser tensionado e esticado. Nesse caso, as ideias de Johann Euler remetem às ideias do russo Mikhail Vasil’evich Lomonosov (1711-1765) sobre a natureza da luz e da eletricidade, baseadas no movimento de vibração e rotação das partículas do éter. Estas influenciaram seu pai, Leonhard Euler, quando ele estava em São Petersburgo (3, p. 391-393).

Além disso, o uso da palavra *ressort* indica uma possível similaridades entre o éter de Johann Euler e o ar em Robert Boyle (1627-1691), já que este usava a expressão “*spring of air*”, que em português significa “mola do ar” (isso é discutido na nota de rodapé 115 da tradução comentada).

A.2 Tradução comentada

[p. 125]

Pesquisas sobre a causa física da eletricidade.

Por Sr. Euler, o filho.

Desde que eu dei minha explicação sobre a eletricidade, que a Academia Imperial de Petersburgo quisera coroar com o prêmio proposto sobre essa questão, descobriram-se vários novos fenômenos elétricos que pareciam derrubar minha teoria. Sr. *Aepinus* tendo mostrado claramente a diferença entre duas espécies de eletricidade, na qual uma recebe o nome de positiva e a outra de negativa, eu sou obrigado a confessar francamente que não havia prestado atenção nessa diferença. Embora Sr. *Francklin*⁸⁹ e outros tenham já falado sobre isso enfaticamente, eu havia visto essa questão como algo pouco essencial, sobretudo porque a maioria dos Autores as conectaram a certos tipos de corpos, segundo os quais eles nomearam uma eletricidade vítrea e outra resinosa. Essa circunstância [vítrea e resinosa] me levou a acreditar que toda a diferença dependia unicamente da natureza dos corpos, sendo uma e outra espécie de eletricidade própria a cada corpo⁹⁰.

Mas, depois que foi suficientemente provado pelas experiências que o mesmo corpo é suscetível a uma ou outra espécie, e mesmo algumas vezes às duas ao mesmo tempo em suas diferentes partes⁹¹, eu devo convir que minha explicação é consideravelmente abalada. Pois, tendo sustentado que um corpo só era eletrizado à medida que o éter nele contido era mais raro e menos elástico do que aquele que se encontra nos corpos vizinhos, toda a diferença na eletricidade só poderia vir dos diversos graus de escassez do éter contido dentro dos corpos elétricos; o que, entretanto,

[p. 126]

⁸⁹ Johann Euler escreve *Francklin* referindo-se a Benjamin Franklin. O nome de Benjamin Franklin aparecerá escrito dessa forma por todo o trabalho, assim tomamos a liberdade de não chamar a atenção a isso todas as vezes por meio de notas de rodapé. O uso de itálico na tradução segue o do original.

⁹⁰ Aqui, Johann Euler parece enxergar as eletricidades vítrea e resinosa, idealizadas pelo francês Charles François de Cisternay Dufay no começo do século XVIII, como explicações qualitativas que o induziram a uma explicação errônea dos fenômenos elétricos.

⁹¹ Johann Euler se refere à explicação de Franklin para a garrafa de Leiden. Para mais detalhes sobre esse fenômeno e a explicação de Franklin, ver a seguinte referência: (3, p. 309-343). Além do artigo de Silva e Heering, referência: (12).

é abertamente contrária às experiências feitas sobre a eletricidade positiva e negativa, assim, dado que isso é evidente, a diferença não poderia ser atribuída a uma escassez maior ou menor de éter.

Mas, já que a minha explicação é embasada sobre a falta de equilíbrio do éter, segue-se que os fenômenos da eletricidade devem se manifestar em um corpo quando o éter se encontra mais denso ou mais elástico, e quando é mais raro e menos elástico do que nos corpos ao redor. Essa única observação nos desvela primeiro duas espécies de eletricidade, das quais uma será sem dúvida aquela que chamamos positiva, e outra aquela que chamamos negativa. E assim, longe da minha teoria ser derrubada por essa dupla eletricidade, ela adquire no fundo um maior grau de probabilidade. Essa dupla eletricidade é até mesmo uma consequência necessária da minha explicação, já que o éter não poderia ser rarefeito em um corpo sem que ele fosse condensado em outros.

Eis aqui, então, o princípio de minha teoria, que se reduz a seguinte proposição: *Que os fenômenos da eletricidade são causados pela força elástica do éter, quando esse fluido não está em equilíbrio dentro dos corpos vizinhos.* Isto é, quando o éter encerrado dentro dos poros dos corpos não está em equilíbrio, ou que sua elasticidade é maior ou menor em um [corpo] do que em outro, os esforços resultantes para restaurar o equilíbrio produzem os fenômenos da eletricidade. De modo que a causa desses fenômenos deve ser atribuída à desigualdade de elasticidade do éter que se encontra encerrado nos corpos. Para estabelecer essa teoria, deve-se primeiro fazer algumas observações sobre a natureza do éter e sobre a maneira em que ele está enclausurado nos poros dos corpos. Em seguida é necessário mostrar como a restauração do equilíbrio, quando a elasticidade do éter é diferente em diferentes corpos, é capaz de produzir os fenômenos da eletricidade.

I. Todos aqueles que se comprometem a explicar os efeitos da eletricidade concordam que a causa deve ser procurada em uma matéria

[p. 127]

sutil difundida em todos os corpos, a qual eles dão o nome de matéria elétrica. De acordo com alguns, é uma certa agitação excitada nessa matéria que produz os fenômenos da eletricidade⁹². Ora, Sr. *Francklin* atribui essa causa a uma distribuição desigual da dita matéria, e defende que um corpo se torne eletrizado quando essa matéria se encontra em quantidade ou demasiadamente grande, ou pequena. Ele supõe que no estado natural a matéria

⁹² Aqui Johann Euler pode estar fazendo referência à vários autores, entre eles do russo Mikhail Vasil'evich Lomonosov. Suas ideias sobre a natureza da luz e da eletricidade, baseadas no movimento das partículas do éter, influenciaram seu pai, Leonhard Euler. (3, p. 391-393)

elétrica é igualmente dispersa por todos os corpos, de modo que nesse estado cada corpo contém uma certa quantidade [de matéria elétrica]. Assim, se por algum motivo essa quantidade aumenta ou diminui, é então, segundo ele, que os corpos se tornam eletrizados. Disso ele tira a origem das duas espécies⁹³ de eletricidade, e acredita que aquela que ele nomeia positiva ocorre quando a matéria elétrica se encontra em quantidade demasiadamente grande, enquanto que a negativa vem de uma diminuição da matéria elétrica para baixo da quantidade natural.

II. Vê-se essa última circunstância como uma prova bastante sólida da realidade da ideia, a partir da qual Sr. *Francklin* imagina a causa da eletricidade. Também longe de mim querer derrubá-la, eu me proponho antes a determinar melhor a natureza e as propriedades dessa matéria que ele chama elétrica. De fato, como não se pode negar a existência do éter, que preenche todos os poros que o ar e outras matérias mais densas⁹⁴ deixam vazios. Será uma questão bem importante saber se a matéria elétrica é a mesma que o éter, ou se é diferente dele. E primeiro me parece que, a menos que não se possa demonstrar uma diferença bem marcada entre a matéria elétrica e o éter, as regras da probabilidade decidirão sempre pela sua identidade, e isso, mesmo que se quisesse recolocar em dúvida a existência do éter, o que poderia me impedir de impor esse nome à matéria elétrica, ainda que as provas pela existência do éter sejam, aliás, bem convincentes.

III. Contudo, alguns, que não negam abertamente a existência do éter, concebem a matéria elétrica de uma maneira tal

[p. 128]

que não poderia estar de acordo com as propriedades que Autores⁹⁵ atribuem ao éter. Eles entendem a matéria elétrica como uma atmosfera, que envelopa os corpos⁹⁶, mas tanto a violência dos efeitos elétricos, quanto a sua rapidez, parecem, em primeira análise, destruir a ideia de uma atmosfera, em qualquer agitação⁹⁷ que se queira concebê-la. Os fenômenos da eletricidade provam antes, incontestavelmente, que a matéria sutil que os produz deve ser dotada de um grau eminente de elasticidade, que não poderia ser enclausurada dentro dos

⁹³ Johann Euler se refere aos estados de Franklin como “espécies”. O mais correto com as ideias de Franklin é “estado” elétrico, e não “espécie”.

⁹⁴ No original: *plus grossieres*. No sentido de mais densas, ou também mais espessas.

⁹⁵ Neste ponto Johann Euler cita genericamente autores que definiam um éter apenas para rechaçá-lo. Entre eles definitivamente está Franz Aepinus, que defendia um fluido elétrico para explicar os fenômenos elétricos e um fluido magnético para os magnéticos. Aepinus, que trabalhou na Academia de Ciências de Berlim entre 1755 e 1757 e conheceu Leonhard e Johann Euler, critica a junção deles em um único fluido, “a saber, um éter” (19, p. 243), pois os fenômenos nesses dois casos eram muito diferentes.

⁹⁶ J. Euler se refere ao conceito de atmosfera elétrica proposta por Franklin. (118)

⁹⁷ No original a palavra é *agitation*. Aqui ela pode significar também “vibração” ou “movimento”.

limites de uma pequena atmosfera. Aliás, as faíscas e os brilhos luminosos, de que esses fenômenos são frequentemente acompanhados, demonstram suficientemente que sua causa é bem estreitamente ligada àquela que produz a luz, e que é, seguramente, muito mais ativa do que tudo que se poderia entender sob a ideia de uma atmosfera.

IV. Eu não me limitarei a estabelecer a existência do éter, que só foi posta em dúvida pelos Filósofos que queriam esvaziar o espaço dos Céus de toda a matéria, de medo que os Planetas e Cometas encontrassem aí alguma⁹⁸ resistência em seus movimentos. Mas, sendo esses mesmos filósofos obrigados a preencher o imenso espaço do Mundo de raios de luz, que eles veem como emanações próprias dos corpos luminosos, lançados com a mais alta velocidade, em vez de um vazio, eles nos apresentam um espaço perfeitamente preenchido de uma matéria agitada pelo mais impetuoso movimento que se possa conceber. Uma tal matéria deveria, sem dúvida, perturbar extremamente os movimentos dos corpos celestes se uma matéria similar e tranquila fosse capaz de causar-lhes uma resistência sensível.

V. Por essa razão, aliada a várias outras que eu me permito não expor aqui, eu me considero bem autorizado a supor tanto o espaço imenso dos Céus quanto todos os poros terrestres preenchidos por uma matéria extremamente sutil e elástica, na qual os raios de luz são produzidos por um movimento de vibração parecido com aquele do qual sabemos que o som é produzido no ar⁹⁹. É

[p. 129]

mesmo pela velocidade da luz comparada à do som¹⁰⁰ que podemos determinar a elasticidade do éter aliada a sua rarefação porque, se o éter é m vezes mais rarefeito e n vezes mais elástico que o ar ordinário que respiramos, é necessário que o produto desses dois números, n e m , seja

⁹⁸ Entre os filósofos que explicitavam que alguma resistência seria encontrada pelos planetas caso houvesse uma matéria estava Isaac Newton. Para Newton, a regularidade do movimento dos planetas era um indicativo de que tal matéria não existia. (119, p. 32) A resposta de Johann Euler lembra a de seu pai, Leonhard Euler, de 1746, que apontou a contradição de se aceitar a existência de partículas de luz no espaço. (119, p. 81-82) Leonhard Euler chega a calcular, usando sua teoria etérea, que a resistência do éter não é observável para uma rarefação de éter (inverso da densidade) maior ou igual a 3875×10^8 (119, p. 130), o que explicaria as observações astronômicas. Porém, Newton nunca associou a falta de um éter no espaço ao vácuo absoluto da forma como Leonhard Euler descreveu. Nos *Principia* Newton afirma que “os espaços celestiais (...) devem ser totalmente livres de quaisquer fluidos corpóreos”, mas ressalta que “excetuando, talvez, alguns vapores extremamente rarefeitos e os raios de luz”. (120, p. 147) Quando Newton postula e utiliza a ação à distância, ele se afasta de trabalhos etéreos por motivos mais pragmáticos, não por desacreditá-los por completo (ou refutá-los). (33, p. 80-89)

⁹⁹ Desde o século VI já se afirmava que o som podia ser um produto de vibrações de corpos. Isaac Beeckman (1588-1637) também trabalhou com a relação entre vibrações e o som. Essa relação pode ser vista na obra *Diálogo* de Galileu Galilei (1564-1642) e *Dissertatio physica de sono*, de Leonhard Euler. Para mais, ver a seguinte referência: (121).

¹⁰⁰ A velocidade do som no ar já havia sido medida no século XVII, resultando em um valor de 478,4 m/s em 1635. Esse valor foi se aproximando do atual (331,45 m/s, aproximadamente) ao longo do fim do século XVII e começo do século XVIII (121, p. 635), ou seja, antes do trabalho aqui traduzido.

igual a trezentos e sessenta bilhões¹⁰¹, donde compreendemos facilmente que um deles¹⁰² ser extremamente grande.

VI. Ora, se todos os poros dos corpos e todos os espaços nos quais matérias mais grossas não poderiam penetrar são repletos de éter, a menos que a matéria elétrica seja a mesma, somos obrigados a preencher os poros de duas matérias diferentes e de atribuir-lhes propriedades também diferentes. Mas parece, em princípio, contrário às regras de uma boa Física multiplicar a bel prazer as matérias sutis; e deveríamos ter provado incontestavelmente que o próprio éter não seria absolutamente capaz de produzir os fenômenos da eletricidade antes de recorrer ao expediente de criar uma nova matéria sutil. Mas a violência e a rapidez desses fenômenos, e principalmente a produção de faíscas e brilhos luminosos, convêm tão bem à natureza do éter, que não há nenhuma razão para abandoná-lo.

VII. Embora o éter em seu estado natural tenha um grau determinado de elasticidade, é, entretanto, possível aumentá-lo ou diminuí-lo. Isso é claro mesmo pela produção da luz, que consiste em um movimento de vibração, cuja natureza exige absolutamente diferentes graus de elasticidade nas partes próximas ao éter. Ademais, não poderíamos formular uma ideia correta de sua elasticidade sem supô-lo suscetível a uma maior ou menor compressão. Ora, é muito natural que aumentando ou diminuindo a sua densidade, sua elasticidade deve receber acréscimos ou decréscimos mais ou menos proporcionais, como acontece com o ar,

¹⁰¹ Nesta passagem, Johann Euler compara as velocidades de propagação da luz com a do som. Considerando m a rarefação do éter em relação a do ar, e n , a elasticidade do éter em relação a do ar, afirma que o produto das duas grandezas deve ser igual a 360 bilhões, sem unidades dimensionais. Seu raciocínio não é claro, mas como ele estava comparando a velocidade do som no ar com a velocidade da luz, podemos supor que ele estava utilizando resultados obtidos anteriormente por seu pai que em 1746 publicou o trabalho sobre ótica conhecido como *Nova Theoria Lucis et Colorum*. Nesse trabalho, Leonhard Euler desenvolveu uma teoria etérea para a luz. (122) No capítulo 2, ao discutir a propagação de um pulso de éter deduz que a velocidade do pulso, v , é igual a $\sqrt{E/D}$, onde E é a elasticidade do éter, e D é a densidade do éter. (119, p. 94) Para realizar esses cálculos, ele baseia-se no tratamento dado por Isaac Newton para meios elásticos, particularmente o ar. (119, p. 92) Leonhard Euler considera, então, a rarefação do éter em relação ao ar como m , e a elasticidade do éter em relação ao ar como n , sendo que $\frac{1}{m} = \frac{D_{éter}}{D_{ar}}$ e $n = \frac{E_{éter}}{E_{ar}}$. Note que m funciona como o inverso da densidade. Assim, Leonhard Euler obtém, em notação moderna $mn = \left(\frac{v_{luz}}{v_{som}}\right)^2$. Com os valores que Euler tem para as duas velocidades, tem-se $mn = 387.467.100.000$, implicando em um valor para a velocidade da luz como aproximadamente 622.000 vezes maior que a do som (mantivemos a notação do original (122, p. 195), haja vista que ela é igual a notação usada por Johann Euler). Ele provavelmente aproximara 622.000 para 600.000, obtendo assim $mn = 360.000.000.000$. Logo, apesar de não sabermos com total confiança se Johann Euler referia-se ao trabalho de seu pai, supomos que sim, pois conseguimos recuperar o valor de 360 bilhões. Este valor também aparece no seu primeiro trabalho sobre eletricidade (publicado em 1757), sendo seu único uso da matemática naquela obra. (123) Como nessa primeira obra J. Euler apenas aplica, de maneira tímida os cálculos de outra teoria, não consideramos esse uso da matemática como uma matematização, pois não há produção *própria* de formulação matemática abstrata.

¹⁰² A frase original é: (...) *que l'un & l'autre doit être extrêmement grand*. O verbo está conjugado incorretamente, deveria ser *doivent*, a não ser que ele quisesse dizer *l'un ou l'autre* ("um ou outro", em português). O segundo sentido, isto é, com *doivent*, parece mais correto matematicamente, dado que basta que um dos dois números seja grande (e o outro não seja zero, ou infinitesimal), para que sua análise esteja correta. Os dois não precisam ser grandes simultaneamente.

com o qual o éter tem pelo menos isto em comum: um e outro são compressíveis e elásticos, ainda que a elasticidade do éter seja incomparavelmente

[p. 130]

maior que a do ar, bem como sua densidade é incomparavelmente menor.

VIII. O éter preenchendo, então, todo o espaço do mundo no qual os corpos celestes completam seus movimentos, não há nenhuma dúvida de que ele se insinua nos menores poros de todos os corpos e que ele os preenche. A extrema sutilidade e elasticidade o tornam bem propício a esse efeito. O próprio ar, sendo em relação ao éter uma matéria mais densa, não deixará de conter uma boa quantidade [de éter] entre partículas [do ar] que lhe são próprias. E talvez esse éter esteja enclausurado, donde a elasticidade do ar tira a sua origem. Talvez ainda todos os outros corpos dotados de elasticidade devam essa qualidade ao éter, que se encontra enclausurado em seus poros. Essa explicação da elasticidade de todos os corpos é incontestavelmente a mais natural, ainda que ela não leve de jeito nenhum à fonte primeira, ou seja, a causa da elasticidade do próprio éter. Mas somos obrigados, tanto na Física quanto nos outros objetos de nossos conhecimentos, a renunciar ao conhecimento das causas primeiras.

IX. Entretanto, por mais sutil que possa ser o éter, não se deve imaginar que ele penetre livremente nos poros de todos os corpos, nem que a comunicação com o éter externo, ou daquele que se encontra nos poros dos corpos vizinhos, seja inteiramente aberta. Porque, se o éter é a causa da elasticidade dos corpos, compreende-se facilmente que esse efeito [a dificuldade de comunicação do éter] não poderia resultar disso [da elasticidade do éter] a menos que ele esteja bem enclausurado nos poros dos corpos e que ele possa ser comprimido sem relaxar imediatamente e retomar o seu estado natural. Várias experiências sobre o vácuo, e sobre os brilhos luminosos que o mercúrio lança quando agitado¹⁰³, provam suficientemente que o éter não encontra uma passagem totalmente livre através do vidro.

X. Este artigo, no qual é principalmente fundada minha Teoria da eletricidade¹⁰⁴, merece que eu me prolongue mais cuidadosamente. Observo aqui um barômetro luminoso, cujo alto acima do mercúrio

[p. 131]

é sem dúvida ocupado pelo éter. Inclinando o tubo, de maneira que o mercúrio o preencha completamente, o éter é expulso e escapará, ou pelo vidro, ou para dentro dos poros do mercúrio, expulsando ou comprimido ainda mais o éter que já os ocupava. Agora,

¹⁰³ O início do uso do barômetro em pesquisas elétricas data do início do século XVIII e pode ser visto com detalhes na seguinte referência: (4).

¹⁰⁴ Portanto, Johann Euler vê este texto como a fundação de sua teoria, e não o de 1754, enviado à Academia de São Petersburgo.

recolocando o tubo para reproduzir o vácuo acima do mercúrio, é necessário que o éter retorne [para onde estava], ou do exterior pelo vidro, ou dos poros do próprio mercúrio. Ora, os brilhos luminosos que vemos sair do mercúrio provam suficientemente que é do mercúrio que sai o éter e, já que ele é chacoalhado até produzir luz, é claro que seu movimento é impedido, assim como o movimento de ar comprimido dentro de um vaso, que é obrigado a sair por pequenos buracos. É necessário que o éter escape dos poros do mercúrio com grande rapidez, dos quais ele recebe um movimento de vibração, tal como é necessário para a produção da luz. Pode-se ver esse fenômeno análogo ao assovio que o ar comprimido produziria escapando por um pequeno buraco.

XI. Ora, se o éter penetrasse livremente todos os corpos, como vários Físicos defenderam, seduzidos sem dúvida pela extrema sutilidade desse fluido, não divergiríamos que o dito fenômeno nunca poderia acontecer, posto que o éter entraria no vácuo desde o primeiro instante, tanto pelos poros do vidro quanto pelos do mercúrio, sem sofrer a mínima agitação. Esse restabelecimento ocorreria tão tranquilamente que o ar ocuparia os espaços que os corpos abandonam por seu movimento, ainda que esses espaços fossem envelopados por redes. É então necessário que o éter esteja bem estreitamente enclausurado e encaixado dentro dos poros do mercúrio, já que sua grande elasticidade não é capaz de expandi-lo¹⁰⁵ em um instante pelo espaço vazio do tubo. Entretanto ele escapa muito prontamente, como os brilhos luminosos deixam saber, e vê-se que a passagem pelos poros do vidro deve ser muito mais difícil. Não é, portanto, contrário à natureza do éter quando eu suponho que esse fluido, por mais ágil que seja, não atrevesse livremente os corpos, e que há

[p. 132]

a esse respeito uma grande diferença: uns, muito mais do que outros, retendo o éter que está enclausurado em seus poros e talvez não haja nenhum que permita a seu éter uma saída totalmente livre, como provavelmente também não há nenhum que o mantenha tão fortemente cerrado que ele [o éter] não possa, em absoluto, escapar.

XII. Tendo estabelecido essa diversidade nos corpos, segundo a qual o éter se encontra mais ou menos encerrado, noto primeiro que o ar deve ser relacionado a essa espécie que retém seu éter muito fortemente, de modo que ele quase não poderia escapar. Porque, já que praticamente não se encontra corpos cuja elasticidade seja tão perfeita, se o éter encerrado nos poros do ar é a causa [da elasticidade do ar], é necessário que ele esteja bem estreitamente encaixado, de modo que ele possa ser comprimido com o ar, sem que uma parte considerável

¹⁰⁵ Johann Euler escreve *le répandre*, que entendemos aqui como “expandi-lo”, não fica claro quem está expandindo, o éter ou o mercúrio. Por força do contexto, inferimos que ele esteja se referindo ao éter.

[do éter] encontre meio de se relaxar¹⁰⁶. Não considero essa prova totalmente convincente, mas me gabo que ninguém oporá dificuldade em concordar comigo acerca dessa propriedade do ar quando mostrarei que ela é absolutamente necessária para a explicação dos fenômenos da eletricidade. Aliás, qualquer outra matéria elétrica que se queira estabelecer, seremos sempre obrigados a supô-la bem intimamente encaixada nos poros do ar. E quando não se coloca dificuldade para atribuir essa propriedade a uma outra matéria, talvez puramente imaginária, não poderíamos recusá-la ao éter.

XIII. Se o éter enclausurado dentro dos poros dos corpos fosse, em todo canto, dotado do mesmo grau de elasticidade, ele se encontraria em um perfeito equilíbrio, e não faria nenhum esforço de sair de um [corpo] para entrar em um outro, o que nomearei *estado natural dos corpos* para distingui-lo do *estado elétrico*, que resulta quando a elasticidade do éter enclausurado dentro dos poros dos corpos vizinhos não é a mesma. Vê-se bem que a maior ou menor conexão do éter com os poros dos corpos não tem nenhuma influência sobre o estado natural. E que seria a mesma coisa quer o éter fosse inteiramente envelopado de modo a não poder escapar de maneira alguma, ou que pudesse sair livremente.

[p. 133]

Mas, se todos os poros dos corpos fossem completamente abertos, o estado elétrico não poderia nunca acontecer, já que à menor desigualdade na elasticidade do éter desde o primeiro instante, o equilíbrio seria prontamente restabelecido. E se, por alguma causa qualquer, uma desigualdade considerável tivesse sido causada, ela seria retificada imediatamente pela comunicação livre do éter de todas as partes. O estado elétrico seria igualmente excluído se os poros dos corpos estivessem tão bloqueados que toda a comunicação do éter seria interrompida.

XIV. Daí é claro que o *estado elétrico* exige duas condições absolutamente necessárias à sua produção. Uma é que o éter enclausurado em diferentes corpos se encontre em diferentes graus de elasticidade, e a outra é que os poros dos corpos que contêm o éter não sejam, nem completamente abertos, nem completamente bloqueados. Parece muito que não há nenhum corpo que pertença a uma ou outra dessas duas extremidades e, partindo disso, todos os corpos serão propícios a se tornarem eletrizados. Poderia mesmo bastar que um dos dois corpos tivesse seus poros retraídos para bloquear seu éter, enquanto que o outro tivesse seus poros completamente abertos. Este último caso parece acontecer dentro do vácuo artificial que

¹⁰⁶ Esse argumento só faz sentido se adicionarmos depois do verbo “relaxar” uma ponderação como: “em outra direção que não a pressionada”. Ou seja, que o éter não consiga, de imediato, escapar para outra direção e, assim, dificultando a elasticidade do ar, já conhecida desde os experimentos sobre o vácuo no século anterior. (124, p. 44-45)

se produz pela máquina pneumática, porque, tendo retirado todo o ar, não haverá nada exceto o puro éter ocupando o espaço. O mesmo se dá com o vácuo formado acima do mercúrio nos barômetros, fazendo-se com que essas espécies de vácuo forneçam fenômenos totalmente particulares da eletricidade.

XV. Essas duas condições podem produzir uma variedade infinita de fenômenos elétricos, conforme a diferença entre os graus de elasticidade do éter seja maior ou menor e, que os poros dos corpos retenham mais ou menos o éter. Em relação à primeira condição, a outra continuando igual, os efeitos da eletricidade serão ainda mais violentos conforme a desigualdade será maior entre os graus da elasticidade do éter. Mas, em relação à segunda condição, não é tão fácil prever qual diferença deve produzir uma comunicação mais ou menos

[p. 134]

livre do éter enclausurado em diferentes corpos. É necessário aqui, sobretudo, considerar a natureza do meio que se encontra entre os dois corpos: se é um ar seco, que mantém o éter fortemente enclausurado em seu seio, os fenômenos devem ser bem diferentes de quando é um ar úmido, já que a água pela qual o ar está embebido é uma dessas matérias que concedem ao éter uma fluidez bem livre.

XVI. Após essas observações gerais, consideremos um único corpo situado no ar, ou em outro meio qualquer, onde o éter se encontra no seu estado natural. Agora esse corpo será eletrizado quando o éter enclausurado em seus poros terá uma elasticidade maior ou menor que a natural: esses dois casos conduzem primeiramente às duas espécies de eletricidade, a positiva e a negativa. Mas não se saberia ainda definir qual corresponde a cada uma, os fenômenos de um caso e de outro se parecem tanto que é muito difícil concluir quando a elasticidade do éter no corpo é maior ou menor do que a do éter exterior. As diversas operações pelas quais a eletricidade é excitada fornecerão os meios mais seguros de nos esclarecer sobre essa dúvida porque, examinando bem todas as circunstâncias de que cada operação é acompanhada, deixará de ser difícil julgar se o éter é comprimido ou rarefeito. Mas, já que esse exame demanda pesquisas muito complicadas, será bom adiá-lo¹⁰⁷ até que eu tenha considerado os fenômenos mais simples e me será permitido supor aqui corpos eletrizados, sem mais me preocupar com a maneira pela qual eles se tornaram eletrizados.

XVII. Como quer que seja, a natureza dos termos *positivo* e *negativo* exige que nomeemos positivamente eletrizados os corpos nos quais o éter é comprimido ou reduzido a

¹⁰⁷ Johann Euler voltará a essa questão a partir do parágrafo LI.

um grau mais alto de elasticidade, do que em seu estado natural, e eu nomearei negativamente eletrizados os corpos nos quais a elasticidade do éter é menor. Acredito que estou autorizado a essa determinação pelo próprio significado dos termos, e ainda que Sr. *Francklin* tivesse servido-se de uma explicação

[p. 135]

oposta e que tivesse empregado os termos positivo e negativo no significado contrário, não creio que sua autoridade devesse prevalecer sobre o significado natural. Enquanto estamos nessa incerteza, conservemos antes a distinção da eletricidade usada anteriormente, a saber *vítrea e resinosa*, sem decidir qual deve ser chamada positiva ou negativa¹⁰⁸.

XVIII. Eu começo então pelo caso mais simples, supondo um corpo eletrizado colocado em um meio de sorte que não tenha nenhuma comunicação com qualquer outro corpo. Se o éter enclausurado nos poros desse corpo for mais ou menos elástico¹⁰⁹ que o do meio, é necessário que o equilíbrio seja enfim restabelecido, e isso ainda mais prontamente segundo que os poros tanto do corpo quanto do meio estiverem mais abertos para facilitar mais a comunicação: se o corpo se encontrasse num espaço vazio, ou no éter puro, o equilíbrio deveria ser logo restabelecido, a menos que os poros do corpo estivessem quase inteiramente bloqueados. Porque, já que todos os poros na superfície desembocam no éter livre, o equilíbrio ali logo se dará, e daí a comunicação passará para o interior do corpo. Os fenômenos poderão ser bem diferentes conforme a comunicação se faça mais ou menos livremente.

XIX. Mas a determinação do próprio movimento, que será excitado no éter, depende, de um lado, de um conhecimento perfeito dos fluidos em geral, e em particular dos fluidos elásticos, de que ainda estamos bem longe, de outro lado, deveríamos conhecer a figura dos poros, sua amplitude e sua comunicação. Ora, todas essas circunstâncias nos são tão ocultas que nunca poderíamos esperar obter seu conhecimento. Entretanto, é disso que depende a elasticidade do éter durante sua agitação, assim a pressão [criada pelo éter] que o corpo sustenta de toda parte não sendo igual em todo canto, o próprio corpo será solicitado ao movimento¹¹⁰, como vemos que de fato ocorre no encontro dos corpos eletrizados, que parecem ora se atrair, ora se repelir mutuamente.

¹⁰⁸ As denominações *vítrea* e *resinosa* surgiram no trabalho de Charles Dufay. Para mais, pode-se consultar a seguinte referência: (9).

¹⁰⁹ No original: *Élastique*. Aqui fica claro que o termo “elástico” se refere não à propriedade de elasticidade, mas a quantidade que se contrai ou estica no éter (em alguma região do espaço).

¹¹⁰ Johann Euler argumenta que os princípios da dinâmica de fluidos elásticos e as propriedades dos poros explicam as diferenças de elasticidade do éter em regiões diferentes de um corpo (ou em seu redor). Essa diferença cria uma diferença de pressão. Em termos modernos, um gradiente de pressão não nulo. Este

[p. 136]

Donde se julgará facilmente que a explicação desses fenômenos de atração e de repulsão é a mais difícil, visto que ela demanda as mais sublimes pesquisas sobre o movimento dos fluidos e, além disso, um perfeito conhecimento da estrutura dos corpos, o qual o espírito humano nunca poderia alcançar.

XX. Entretanto, esforçar-me-ei em traçar alguns esclarecimentos, por mais fracos que possam ser, a fim de poder avaliar, grosso modo, fenômenos que daí devem resultar. Em vista disso, farei hipóteses um pouco grosseiras para nelas poder aplicar o cálculo, mas terei o cuidado de aproximá-las da verdade o quanto as circunstâncias me permitirão fazê-lo. Suporei então primeiro que a elasticidade do éter é proporcional à sua densidade, o que não se poderia pôr em dúvida vista a pequena mudança que a eletricidade pode produzir na densidade do éter. Em seguida, considerarei os poros tanto dos corpos quanto do ar como tubos de uma largura qualquer, pelos quais o éter se move livremente, e quando os corpos permitirem ao éter uma passagem mais ou menos livre, suporei esses tubos mais ou menos largos¹¹¹. Porque é claro que tais tubos muito estreitos corresponderão aos corpos que deixam dificilmente escapar o éter neles enclausurado. Parece-me então que essas hipóteses não nos afastarão muito da verdade.

XXI.¹¹²

Seja então um tubo qualquer ABCD que se pode conceber como reto, já que a curvatura não influi significativamente no movimento [do éter]¹¹³. Seja a amplitude desse tubo em A = ff ¹¹⁴, e a uma distância qualquer AP = x , a amplitude do tubo PM = yy , que se pode considerar como uma função de x . Seja então $dy = udx$, onde a quantidade u é também uma função de x . Agora, depois de decorrido um tempo qualquer = t , seja a densidade do éter em AB = π e em

explica o movimento de um corpo submetido a diferenças de pressão no éter. No caso, os movimentos são justamente os de atração e repulsão causados pelos fenômenos elétricos.

¹¹¹ Há várias suposições implícitas aqui, por exemplo, possíveis peneiras no interior do tubo, que poderiam dificultar o movimento do fluido elástico sem que a largura precisasse mudar (ou variar ao longo do tubo).

¹¹² Na imagem, os 'A', 'B', 'P' e 'M' mais à direita deveriam estar com uma apóstrofe cada. Esse erro tipográfico se encontra na imagem original, a imagem corrigida é apresentada no capítulo 3, figura (3.1). Além disso, no trabalho original as imagens se encontram no final do texto, como era comum na época. Porém, decidimos juntá-las aos trechos onde elas são citadas para facilitar o entendimento.

¹¹³ Não fica claro o motivo da curvatura não influenciar o movimento do éter. Se uma curvatura qualquer no tubo fosse aproximadamente 90°, um fluido teria sua velocidade ali claramente reduzida.

¹¹⁴ Uma notação comum à época para potências ao quadrado. (76, p. 349-350)

PM = φ , donde a elasticidade tendo uma dada proporção à densidade, que seja $n : 1$ ¹¹⁵, teremos a elasticidade em AB = $n \pi$ e em PM = $n \varphi$. Ora, a elasticidade é expressa por uma altura de

[p. 137]

forma que $n \pi$ e $n \varphi$ representam linhas retas de um certo comprimento. Seja ainda a velocidade do éter na seção AB = ω , e na seção PM = γ ¹¹⁶. Isso posto, as quantidades π e ω serão funções do único tempo t . Ora, as quantidades φ e γ dependerão tanto do tempo t quanto do espaço AP = x , de modo que seus diferenciais, enquanto dependentes dessa dupla variabilidade, podem ser representados na forma:

$$d\varphi = dt \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) + dx \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) \text{ \& } d\gamma = dt \left(\frac{d\gamma}{dt} \right) + dx \left(\frac{d\gamma}{dx} \right).^{117}$$

XXII. Tomando Pp = dx , o espaço PMpm será = $yydx$, e a densidade do éter ali presente = φ , a quantidade do éter contido nesse espaço elementar será = $\varphi yydx$, e assim toda a quantidade do éter contida no tubo ABPM será = $\int \varphi yydx$, considerando aqui φ como uma função da única variável x , ou então deve-se tomar nessa integração o tempo t como constante. Mas, após um tempo infinitamente pequeno dt , a primeira seção do éter AB passará para A'B' sendo transportada pelo espaço AA' = ωdt , e a seção PM para PM'¹¹⁸ pelo espaço PP' = γdt . A porção do éter que ocupava antes o espaço ABA'B' é = $\int \pi \omega dt$, e a porção que ocupa o espaço PMP'M' é = $\int \gamma \varphi \gamma dt$. Ora, a densidade em PM sendo = $\varphi + dt \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)$, a quantidade de éter que ocupa o tubo ABPM será = $\int \varphi yydx + dt \int yydx \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)$: adicionemos aí a pequena porção PMP'M' = $\int \gamma \varphi \gamma dt$, e retiremos daí a pequena porção ABA'B' = $\int \pi \omega dt$; é necessário que o resto seja igual à porção que ocupava antes o tubo ABPM, que é = $\int \varphi yydx$.
Donde tiramos esta igualdade:

¹¹⁵ A notação para proporção aqui indica que, quando a densidade é unitária, a elasticidade vale n . A notação era comum em divisões e proporções na época. (76, p. 271-278) Essa proporção é baseada no raciocínio apresentado no parágrafo V, Johann Euler não adiciona mais detalhes nesse ponto, mas ela se parece com uma afirmação sobre o ar nos trabalhos de Robert Boyle, a saber, que a resistência à compressão do ar é proporcional a sua densidade. (125, p. 484-490) Nesse caso, a resistência à compressão se parece com a interpretação de Euler para a elasticidade do éter. A dependência entre elasticidade e densidade de um fluido também aparece – e é defendida, apesar de nem sempre se dar por uma relação linear – em um trabalho sobre o equilíbrio dos fluidos de Leonhard Euler. (126, p. 224-225) As similaridades entre o éter de Johann Euler e o ar, em Boyle, esclarecem o uso da palavra “ressort”. Pois, Boyle usava muito a expressão “spring of air” (mola do ar) e “ressort” é uma palavra francesa próxima da nossa palavra “mola”.

¹¹⁶ Escolhemos o uso da letra gama, pois não encontramos o caractere usado por Johann. No original, a letra para a velocidade do éter na seção PM é: γ

¹¹⁷ As derivadas encerradas por parênteses eram uma notação comum para o que denotamos hoje como derivadas parciais. (74, p. 220-222) Elas são usadas em todo o texto de Johann Euler. Para esclarecer podemos escrever essa equação em notação atual, o que nos retorna: $d\varphi = dt \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + dx \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$ \& $d\gamma = dt \left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right) + dx \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x} \right)$.

¹¹⁸ Acreditamos que o correto seria P'M'.

$$dt \int yy dx \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) + yy\varphi\gamma dt - ff\pi\omega dt = 0,$$

[p. 138]

a qual sendo dividida por dt dá:

$$ff\pi\omega - yy\varphi\gamma = \int yy dx \left(\frac{d\varphi}{dt} \right);$$

onde a integral $= \int yy dx \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)$ deve ser tomada de modo que se considere o tempo t como constante¹¹⁹.

XXIII. Em seguida, a massa de éter $PMpm = \varphi yy dx$ sendo prensada pela face $PM = yy$, pela elasticidade do éter sucedente, que ali é $= n\varphi$, e pela face pm , pela elasticidade do éter precedente¹²⁰, que é $= n\varphi + ndx \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)$, donde a força motriz para acelerar o movimento será¹²¹ $= -nyy dx \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)$ que, dividido pela massa $\varphi yy dx$ dá a força aceleradora¹²² $= -\frac{n}{\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)$. Ora, a massa $PMpm$, tendo a velocidade $= \gamma$, é transportada durante o tempo dt pelo espaço $PP' = \gamma dt$; sua velocidade será então $= \gamma + dt \left(\frac{d\gamma}{dt} \right) + \gamma dt \left(\frac{d\gamma}{dx} \right)$, e assim o aumento da velocidade $= dt \left(\frac{d\gamma}{dt} \right) + \gamma dt \left(\frac{d\gamma}{dx} \right)$, que deve ser igual ao produto da força aceleradora $= \frac{n}{\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)$ pelo tempo dt , donde tiramos:

$$\left(\frac{d\gamma}{dt} \right) + \gamma \left(\frac{d\gamma}{dx} \right) = -\frac{n}{\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right),$$

que, junto com aquela que encontramos antes:

$$ff\pi\omega - yy\varphi\gamma = \int yy dx \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)$$

contêm todas as condições pelas quais o movimento do éter deve ser determinado.

[p. 139]

XXIV. Mas as fronteiras da Análise nos param aqui prontamente, e não poderíamos resolver, de maneira generalizada, as duas equações que acabamos de encontrar. A

¹¹⁹ O autor está pressupondo que a largura do tubo não varia no infinitésimo dx . Além disso, a integração diz respeito ao volume do trecho do tubo no tempo, fixado, de valor $t + dt$, por isso a integração é apenas na variável espacial, x .

¹²⁰ “Sucedente” está à esquerda da figura I, em PM . E “precedente” está à direita, em pm , já que o sentido do fluxo de éter parece ser da direita para a esquerda.

¹²¹ Para calcular a força motriz, Johann Euler calcula a diferença de elasticidade em $PMpm$ e multiplica pela área da secção transversal que, na sua notação, é yy .

¹²² No original: *force accélératrice*. A dimensão dessa grandeza depende da dimensão da constante n . Com efeito, a dimensão dessa força, que atua como uma aceleração em termos atuais, é $[n]/[metro]$. A elasticidade aqui está próxima do nosso conceito de pressão. (57, p. 8-9) Aceitando isso, a pressão sendo dada em Newton por distância ao quadrado, a dimensão dessa grandeza é $[metro]/[segundo]^2$ - uma aceleração.

desigualdade do movimento desde o primeiro começo parece opor os maiores obstáculos, porque assim que supomos que o movimento tenha chegado a uma espécie de uniformidade, de sorte que nem a densidade nem a velocidade variem mais no mesmo lugar, todas as dificuldades se esvanecem¹²³. Nessa hipótese, os termos $\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)$ e $\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)$, uma vez que φ e γ não dependem mais do tempo, se anulam, e nossas duas equações se tornam:

$$I. \quad \pi\omega - \gamma\varphi = 0, \quad \& \quad II. \quad \gamma d\gamma = -\frac{n d\varphi}{\varphi},$$

com a última sendo devidamente¹²⁴ integrada resulta em¹²⁵

$$n \ln \frac{\varphi}{\pi} = \frac{1}{2} \omega\omega - \frac{1}{2} \gamma\gamma, \quad \& \quad \varphi = \pi e^{\frac{\omega\omega - \gamma\gamma}{2n}}$$

que juntada à primeira¹²⁶ servirá para determinar φ e γ . Ora, já que n é um número extremamente grande¹²⁷, teremos aproximadamente¹²⁸ $\varphi = \pi \left(1 + \frac{\omega\omega - \gamma\gamma}{2n}\right)$, donde tiramos por aproximação¹²⁹ $\varphi = \pi \left(1 - \frac{\omega\omega}{2ny^4} (f^4 - y^4)\right)$. Daí sabemos que, se $y > f$, a elasticidade em PM é maior do que em AB. Ora, se $y < f$, acontecerá o contrário.

XXV. Mas a equação $\varphi = \pi e^{\frac{\omega\omega - \gamma\gamma}{2n}}$ nos faz saber que, lá onde a velocidade do éter é maior, sua elasticidade deve ser menor, e reciprocamente, onde o éter se move menos rapidamente, ou até mesmo em repouso, lá sua elasticidade será maior. Ora, ainda que essa equação só aconteça quando o movimento do éter se tornou permanente, o que nunca acontece, as

[p. 140]

¹²³ Em termos modernos, Johann Euler procura aqui apenas a solução estacionária no tempo do sistema de equações, desconsiderando termos e soluções transitórios. (3, p. 395)

¹²⁴ Os limites de integração são os valores da velocidade e da densidade em AB e em PM; ou seja, a integral em $d\gamma$ vai de ω até γ , e a outra vai de π até φ .

¹²⁵ O “ l ” na equação era uma notação comum à época para logaritmos, incluindo o logaritmo natural (74, p. 105-107), como é o caso aqui. Em notação moderna a equação se torna: $n \ln \left(\frac{\varphi}{\pi}\right) = \frac{1}{2} \omega^2 - \frac{1}{2} \gamma^2$, & $\varphi = \pi e^{\frac{\omega^2 - \gamma^2}{2n}}$.

¹²⁶ A equação enumerada por Johann Euler como I.

¹²⁷ Afirmado por Johann no parágrafo V.

¹²⁸ Johann parece ter usado a técnica de expansão em polinômios de Taylor. Essa técnica já existia, Brook Taylor havia publicado seu trabalho sobre cálculo em 1715. Colin Maclaurin (1698-1746) chegou a um resultado similar um pouco depois, em 1742. (68, p. 613-616)

¹²⁹ A aproximação feita aqui foi a igualar π e φ . Logo, a Equação I se torna $\pi\omega = \gamma\gamma$. É notório a semelhança com a dinâmica de fluidos incompressíveis. Em fluidos compressíveis temos $\pi\omega = \gamma\gamma$, mantendo a notação do texto original. Isto é, a área de uma seção transversal de um tubo, multiplicada pela densidade e a velocidade do fluido nela, se manterá constante ao longo do tubo. Em fluidos incompressíveis, as densidades, sendo nomeadas de π e φ , não variam ao longo do tubo e podem ser canceladas, resultando na expressão $\pi\omega = \gamma\gamma$. Johann a utiliza, elevando-a ao quadrado e aplicando-a na expressão $\varphi = \pi \left(1 + \frac{\omega\omega - \gamma\gamma}{2n}\right)$. Disso resulta a expressão do texto.

conclusões que acabo de tirar acontecerão também quando o movimento já se aproxima de um estado de permanência, e poderemos até vê-las como gerais e aplicar desde os primeiros instantes do movimento, contanto que nos contenhemos com os enunciados gerais, sem determinar a proporção das elasticidades em relação às velocidades diferentes. Também é fácil de se convencer dessas conclusões grosso modo, pois, já que a elasticidade do éter faz esforço para pôr o corpo em movimento, assim que ela consegue produzir seu efeito, já que uma parte dos esforços é aí empregada, é necessário que a elasticidade seja aí diminuída, de modo que quanto maior for a velocidade, tanto menor deve ser a elasticidade.

XXVI. Após essa observação geral, que será de grande importância nas pesquisas seguintes, retornemos ao nosso corpo eletrizado colocado no ar. Como neste corpo o éter está mais ou menos elástico do que no ar, à medida que o equilíbrio se restabelece pouco a pouco, a eletricidade diminuirá. Quanto mais prontamente isso acontecer, mais o éter será liberado tanto no corpo quanto no ar. Logo, o ar continuando o mesmo, os corpos cujos poros são mais abertos perderão sua eletricidade mais rapidamente, e nessa classe deve-se incluir a água, os metais, os corpos dos animais etc. Mas os outros corpos, cujos poros são muito estreitos e dificilmente deixam o éter escapar, conservarão sua eletricidade por um tempo maior. Para o ar, cuja constituição está sujeita a grandes mudanças, o mesmo corpo conserva por mais tempo sua eletricidade quando o ar está bem seco, o que nos faz ver que, nesse estado, o ar tem seus poros bem estreitos, mas quando o ar está úmido e participa da natureza da água, as partes aquosas, com as quais ele está misturado, deixando seu éter escapar facilmente, a eletricidade dos corpos deve aí se perder mais rapidamente. Julgar-se-á também facilmente que o tamanho do corpo deve contribuir muito para isso: um corpo pequeno será despojado mais rapidamente de sua eletricidade do que um grande, onde há mais éter a ser reduzido até o equilíbrio.

[p. 141]

XXVII. Mas a forma dos corpos entra principalmente em consideração aqui. Porque, já que o éter sai ou entra pelos poros que se encontram na superfície do corpo: onde há mais superfície em proporção à mesma quantidade de massa, aí também a comunicação do éter será maior. Isso acontece nos ângulos e principalmente nas pontas¹³⁰, e é também nesses pontos que se observa que os efeitos da eletricidade são mais sensíveis. Porque não apenas há um maior número de poros que levam a uma ponta do que haveria se a ponta estivesse cortada, mas esses poros se comunicam também com vários outros que estão no interior dos corpos, de

¹³⁰ Johann Euler se refere aqui ao que conhecemos como poder das pontas. Esse fenômeno já era conhecido e foi analisado por, dentre outras pessoas, Benjamin Franklin.

modo que nesses pontos o éter deve ou sair ou entrar em maior abundância, conforme a eletricidade do corpo seja positiva ou negativa. Logo, se o corpo tem vários ângulos ou pontas, ele perderá muito mais rapidamente sua eletricidade do que se não tivesse; donde se pode concluir que um corpo esférico, cuja superfície é bem polida, é o mais propício para conservar por mais tempo sua eletricidade.

XXVIII. Quando a eletricidade do corpo é tão grande que o movimento do éter, para sair ou entrar pelos poros da superfície se torna muito impetuoso, o que deve acontecer principalmente nos ângulos e nas pontas, o éter será posto num movimento de vibração capaz de produzir faíscas e brilhos luminosos, assim como o ar, quando fortemente agitado, causa um barulho. É também nesses pontos que se observa, sobretudo na escuridão, uma luz que é tanto mais viva quanto eletrizado for o corpo, e quanto mais ele tem seus poros abertos. Eis aqui então a explicação do principal fenômeno que esse caso nos oferece, pois eu não quero relatar aqui os fenômenos que se observam quando se aproxima um outro corpo desse corpo eletrizado, já que eu considero aqui somente um único corpo situado no ar sem que outro corpo possa ter a mínima influência sobre ele. É também a razão pela qual não vou falar sobre a sensação que percebemos quando aproximamos a mão ou o rosto de tal corpo eletrizado.

[p. 142]

XXIX. Tendo desenvolvido os casos de um único corpo eletrizado, passo a considerar dois corpos que estejam tão próximos um do outro que o efeito da eletricidade causado por um se estenda até o outro, porque se seu distanciamento fosse maior, aconteceria com cada um como se o outro não existisse. Aqui temos vários casos a examinar: se apenas um dos corpos, ou ambos, são considerados eletrizados, e esse último caso se divide ainda em dois, de acordo com se a eletricidade desses dois corpos é de mesma natureza, ou que uma seja positiva e outra negativa. Além disso, tanto a natureza de cada corpo, enquanto concede uma passagem mais ou menos livre ao éter, quanto o grau de eletricidade, podem variar infinitamente os fenômenos. Concebo esses dois corpos situados no ar, ou em outro meio qualquer, onde o éter se encontra em seu estado natural, em relação ao qual o éter contido em um, ou em ambos os corpos, seja mais ou menos elástico.

XXX.

Seja inicialmente apenas o corpo A eletrizado, e que a elasticidade do éter seja maior do que no ar, ou ainda que sua eletricidade seja positiva, e no outro corpo B suponho a elasticidade [de seu éter] igual à [elasticidade do éter] do ar¹³¹. Primeiramente o éter escapará do corpo A e se insinuará no ar em volta, que, adquirindo mais éter se tornará eletrizado, caso esse aumento não seja logo dissipado pelo ar mais afastado. Entretanto, o ar que circunda o corpo A, recebendo incessantemente as emanções do éter, conterà mais éter do que exige seu estado natural, e formará com isso em volta do corpo A uma espécie de atmosfera elétrica. Agora, se o corpo B recebesse o éter tão dificilmente quanto o ar, ele não mudaria nada no estado do corpo A; mas tirando da atmosfera um pouco de éter, ele se tornará, ainda que pouco, positivamente eletrizado. Ora, se o corpo B tem seus poros mais abertos para receber facilmente o éter que flui do corpo A para ele pelo espaço C, o movimento do éter, encontrando menos obstáculos para se espalhar por esse espaço C, será ali acelerado, e assim sua elasticidade diminuirá, como foi provado acima¹³².

[p. 143]

XXXI. Então, o corpo A sendo mais pressionado pelo éter por todos os lados do que na direção C, ele será empurrado em direção ao corpo B e reciprocamente o corpo B, em torno do qual o éter está em repouso, excetuando o espaço C, será também menos pressionado nesse ponto e, partindo disso, empurrado na direção do corpo A de forma que esses dois corpos parecerão se atrair mutuamente. Essa atração será tanto maior quanto mais poros abertos o corpo B tiver, já que essa circunstância serve para aumentar o movimento dentro do espaço C. Mas então o próprio corpo B se tornando pouco a pouco eletrizado, e também positivamente eletrizado, os fenômenos que resultarão depois não pertencem mais ao caso que aqui examino. De resto, vê-se que quanto mais próximos os dois corpos A e B estão, maior se tornará a agitação do éter no intervalo C. Quando ela aumenta ao ponto de excitar um movimento de vibração, ver-se-á uma luz entre os dois corpos e, já que o ar participa ao mesmo tempo dessa agitação, essa luz será acompanhada de um assobio; a comunicação do éter se fazendo então muito prontamente, o equilíbrio será logo restabelecido e, com isso, a eletricidade será extinta.

XXXII. Esses mesmos fenômenos devem ainda acontecer quando o corpo A é considerado eletrizado negativamente, enquanto o corpo B continua não eletrizado. Então o éter espalhado no ar, tendo uma maior elasticidade, se insinuará para dentro dos poros do

¹³¹ Ou seja, B está no seu estado natural.

¹³² O autor não é claro nesse ponto, mas subentende-se que o éter encontra menos obstáculos em C porque, sendo C o menor caminho, também terá a menor quantidade de poros obstrutivos para o movimento do éter. Caminhos maiores entre os corpos A e B terão mais poros obstruídos.

corpo A e o movimento pelo qual ele é levado para dentro formará em torno desse corpo uma atmosfera negativamente elétrica. Por causa desse movimento, a elasticidade do éter em C será menor do que do lado oposto do corpo B, o qual será conseqüentemente empurrado em direção ao corpo A. Ora, o corpo B também fornecerá seu éter que passará para dentro do corpo A de forma que à medida que a eletricidade do corpo A diminui, o corpo B, despojado de seu éter, se torna cada vez mais eletrizado. Nos primeiros instantes que isso ocorre, a grande rapidez do éter no espaço C fará diminuir sua elasticidade nesse espaço e, com isso, os dois corpos serão empurrados um em direção ao outro. Numa proximidade muito grande, a rapidez do éter relampejará em luz e

[p. 144]

produzirá os mesmos fenômenos que no caso precedente; nesse caso também toda a eletricidade será logo extinta.

XXXIII. Vejamos agora o que deve acontecer quando o corpo B é também eletrizado da mesma espécie que o corpo A, já que o caso precedente logo se reduz a este aqui. Seja de início a elasticidade do éter dentro desses dois corpos maior que a no ar que os circunda; ou seja, suas eletricidades são positivas. Está claro que se a eletricidade de um é muito fraca em relação à do outro, os mesmos fenômenos serão produzidos aproximadamente como no caso precedente, sendo que o éter, escapando do mais forte, se insinua para dentro do mais fraco e aumenta sua eletrização. Mas, se a eletricidade do corpo B é aproximadamente tão forte quanto a do corpo A, os fenômenos devem ocorrer bem diferentemente; pois, já que o éter escapa pelos pontos *a* e *b* com forças quase iguais e opostas, seu movimento será, por isso, retardado. Então, o movimento será menor em C que nos outros pontos ao redor dos corpos e, com isso, sua pressão ou elasticidade se tornará mais forte. Logo, esses dois corpos estando mais pressionados em *a* e *b* que alhures serão repelidos um do outro. Também os aproximando, nenhuma faísca será excitada entre eles, já que um impede a saída do éter do outro e se as bordas desses corpos são luminosas em outros pontos por causa do éter que dali escapa, essa luz parecerá, antes, apagada nos pontos *a* e *b*.

XXXIV. A mesma coisa deve acontecer quando a elasticidade do éter for menor dentro de ambos os corpos do que no ar; ou seja, suas eletricidades são negativas e mais ou menos igualmente fortes. Porque o éter entre esses dois corpos em C sendo levado na direção de um e do outro, seu movimento não será tão rápido no intervalo C que nos outros pontos em torno dos corpos e, com isso, sua elasticidade sendo aí maior, os dois corpos serão repelidos um do outro, tudo como antes e, pelo mesmo motivo, não haverá luz alguma quando da aproximação desses dois corpos. Agora podemos dizer o que deve acontecer quando

aproximamos um corpo não-elétrico¹³³ B de um corpo eletrizado A. De início o corpo B será atraído e ao mesmo tempo se tornará mais e mais eletrizado,

[p. 145]

enquanto que o corpo A perde de sua eletricidade. Mas, assim que a eletricidade do corpo B atingir um certo grau, os dois corpos começarão a se repelir mutuamente e a eletricidade do corpo B não será mais aumentada.

XXXV. O último caso é quando os dois corpos estão eletrizados, mas um positiva e o outro negativamente. Seja então a elasticidade do éter em A maior e em B menor que no ar, de forma que a eletricidade no corpo A seja positiva e em B, negativa. Já que o éter escapa de todas as partes do corpo A e entra no corpo B, aquele que escapa por *a* sendo levado por si mesmo a *b*, o movimento dentro do intervalo C será muito mais rápido que fora dele e, com isso, sua elasticidade será menor. Por essa razão os dois corpos se atrairão mais fortemente que se um deles não estivesse eletrizado e aproximando-os bastante, a faísca aí excitada, será muito mais viva, já que a agitação do éter em C é aumentada pela qualidade de ambos os corpos. Mas essa mesma circunstância será a causa pela qual ambos os corpos perderão suas eletricidades mais prontamente, porque o corpo B acelera a saída do éter do corpo A e este acelera a entrada do éter para dentro do corpo B.

XXXVI. Até aqui eu supus os corpos tão pequenos, ou antes de uma natureza tal, que por toda a sua extensão o éter se encontra no mesmo grau de elasticidade, de sorte que o corpo inteiro seja, ou não eletrizado, ou em todas as suas partes igualmente eletrizado. Mas a experiência nos faz ver que pode haver corpos cuja eletricidade em uma parte é positiva e em outra, negativa. Pode acontecer, então, que em diversas partes do mesmo corpo a elasticidade do éter seja assaz diferente, sem que ela retorne tão rapidamente ao equilíbrio, o que está bem de acordo com o que eu disse no começo sobre a dificuldade que o éter encontra para passar pelos poros dos corpos e que, talvez, não haja nenhum que permita ao éter uma passagem totalmente livre. Então, por mais diferente que seja a elasticidade do éter em diferentes partes do mesmo corpo, essa diversidade pode subsistir por bastante tempo,

[p. 146]

principalmente quando o éter não é agitado, já que só o excedente da elasticidade em um lugar [do corpo] não é suficiente para vencer as dificuldades que a pequenez dos poros lhe opõe. A

¹³³ No original: *non électrique*. Aqui, por força do contexto, a tradução só fazia sentido com “não-elétrico”, ao invés de “não eletrizado”. Um não-elétrico é um corpo que não eletrizável por atrito. Grosseiramente, é o que entendemos hoje como metais.

pedra de Ceilão chamada turmalina¹³⁴ nos oferece aqui um exemplo bastante notável de um corpo que é suscetível às duas espécies de eletricidade ao mesmo tempo¹³⁵.

XXXVII. Mas o caso é bem diferente quando o éter não está em repouso, mas se encontra num movimento muito rápido porque, então, ele ultrapassa facilmente as dificuldades relatadas, comunicando seu movimento quase instantaneamente a distâncias mais longínquas. Os corpos metálicos são os mais propícios a esse fim, e observa-se que a eletricidade é transmitida por um fio de latão, qualquer que seja o seu comprimento, com uma velocidade prodigiosa, quando aproximando-se um corpo eletrizado, o éter seja obrigado a entrar ou sair dele. Essa velocidade deve ser suficiente para que o éter posto em movimento ultrapasse facilmente os obstáculos nos quais ele pararia quase inteiramente se estivesse em repouso. Então, por mais dificuldades que o éter tranquilo¹³⁶ possa encontrar para atravessar os poros dos corpos, ainda que sua elasticidade difira muito da de seu vizinho, assim que submetido a um movimento rápido, ele é capaz de se comunicar instantaneamente a grandes distâncias. Ora, nós acabamos de ver que ao aproximar um corpo eletrizado de outro, que não está eletrizado, ou que o está em sentido contrário, o movimento do éter deve ser bem impetuoso.

XXXVIII.

Assim, se o corpo B tem uma forma alongada *bd* e que seus poros sejam mais abertos, o que acontece quando se pega uma barra metálica, então aproximando um corpo eletrizado A, cuja eletricidade seja positiva, de uma ponta *b* dessa barra, que eu suponho não-eletrizada, o éter que entra em *b* será transmitido dentro dessa barra muito rapidamente até a outra ponta *d*,

¹³⁴ Uma pedra comum na fabricação de joias no começo do século XVIII. Foi nomeada logo de início como *Aschentrekker* e *Aschenzieher*, pela sua propriedade de atrair cinzas quando aquecida sobre carvão em brasa. O nome turmalina, derivado do cingalês *tōramalli*, tornou-se padrão depois dos trabalhos de Franz Aepinus (1724-1802). (26, p. 23-24)

¹³⁵ Se uma pedra de turmalina for imersa em água quente, ela fica eletrizada positivamente em uma face, e negativamente na face oposta. Louis Lémery (1678-1721) descreveu suas propriedades elétricas em 1717, mas ela só foi mais bem estudada após os trabalhos de Franz Aepinus, em 1757. Depois de Aepinus, a turmalina tornou-se assunto em alguns trabalhos de John Canton, Benjamin Wilson, René-Just Haüy (1743-1822), e outros. Para mais sobre as propriedades da turmalina e a história das pesquisas elétricas a respeito dela, ver o seguinte artigo: (26).

¹³⁶ Isto é, em baixa velocidade.

onde seu movimento, devido à dificuldade de sair pelo ar, será subitamente bloqueado. A rapidez desse movimento levará mais éter de b em direção a d que se esse movimento fosse menos rápido, de forma que o éter em d será mais

[p. 147]

comprimido que em b e, com isso, sua elasticidade será maior. Então, se retirarmos subitamente o corpo eletrizado A, notaremos em a uma eletricidade positiva mais forte que em b , e poderá mesmo acontecer que a eletricidade em b seja negativa, já que a rapidez do movimento retirou mais éter de b do que o necessário para levá-lo ao estado natural. E dado que, a partir da suspensão do movimento, a comunicação do éter dentro da barra encontra mais obstáculos, esse estado de desigualdade poderá subsistir por algum tempo, de forma que a ponta d seja dotada de uma eletricidade positiva enquanto que a da outra ponta b é negativa. O contrário acontecerá se a eletricidade de A for negativa.

XXXIX. Daí compreendemos facilmente como é possível excitar dentro do mesmo corpo as duas espécies de eletricidade ao mesmo tempo. Para isso é necessário que o corpo B tenha uma forma alongada e que o éter ali possa receber um movimento muito rápido. Se esse corpo fosse de um material onde a passagem do éter encontrasse mais obstáculos, uma tal desigualdade de eletricidade se conservaria mais facilmente, mas também seria mais difícil colocá-lo em tal estado, já que um movimento tão rápido, exigido por esse fenômeno, não poderia acontecer. Notamos acima que aproximando um corpo eletrizado de um não eletrizado, este último adquire uma eletricidade da mesma espécie. Mas agora vemos que nos enganaríamos muito se quiséssemos formular uma regra geral, já que pode acontecer de um corpo A eletrizado positivamente comunicar ao outro em b uma eletricidade negativa. Ora, como nesse caso a eletricidade na ponta oposta d é positiva e, portanto, mais forte, poderemos admitir a regra supracitada como geral, conquanto se adicione a condição segundo a qual não se deve considerar a eletricidade do corpo B pela ponta b pela qual havíamos aproximado o corpo eletrizado, mas antes pela ponta oposta d ¹³⁷.

XL. Assim, para considerar qual espécie de eletricidade será comunicada a um pequeno corpo mergulhado na atmosfera de um corpo eletrizado positivo ou negativo, é certo, primeiro, que ela seria sempre a

[p. 148]

mesma que a do corpo eletrizado, se o pequeno corpo estivesse suspenso no ar por si mesmo. Mas, já que esse pequeno corpo deve estar apoiado ou suspenso por um outro corpo fixo,

¹³⁷ Johann Euler não deixa claro o porquê da ponta d ser mais apropriada para decidir qual a eletricidade do corpo B da figura III.

deve-se também levar este último em consideração, e a maneira com a qual ele está ali concatenado: se é por meio de um fio de seda ou de um material tal que tenha seus poros bem cerrados, pelos quais o éter é dificilmente transmitido; de mesma forma que se o pequeno corpo flutuasse livremente dentro da atmosfera do corpo elétrico e adquirindo, por conseguinte, a mesma espécie de eletricidade. Mas, se esse corpo pequeno se liga a um fio de latão, ou a um material pelos poros do qual o éter encontra uma passagem muito mais livre, e que esse fio esteja concatenado a um corpo de propriedade semelhante, poderá acontecer que a rapidez do movimento do éter torne-se tão grande que o pequeno corpo adquira uma eletricidade contrária à do corpo em cuja atmosfera ele está mergulhado, uma vez que o efeito da eletricidade é tirado do pequeno corpo pela rapidez do movimento dentro do corpo ao qual ele está concatenado.

XLI. Então, para explicar os fenômenos da eletricidade, é de suma importância conhecer bem a natureza dos corpos em relação à passagem mais ou menos livre que o éter encontra ao atravessá-los. Ainda que haja em relação a isso uma infinidade de graus diferentes, bastará observar três espécies principais e referenciar todos os corpos a elas. A primeira espécie conterà os corpos que mantêm seu éter bem cerrado, de forma que ele só poderá entrar e sair com muita dificuldade, e que encontra ao atravessá-los uma passagem bastante emaranhada. A segunda espécie contém os corpos cujos poros não são nem muito cerrados nem muito abertos, e que ocupam um meio entre a primeira espécie e a terceira. Ora, referencio à terceira espécie os corpos que têm seus poros mais abertos através dos quais o éter encontra uma passagem assaz livre, ainda que lhe falte muito para que ele seja totalmente livre. Vê-se bem que não se poderiam fixar os limites entre essas espécies e que encontraremos muitos corpos próximos à média que nos deixarão em dúvida se devem ser aí referenciados

[p. 149]

ou antes a um dos extremos. Mas essa incerteza não deve causar embaraço.¹³⁸

XLII.¹³⁹ Entre os corpos da primeira espécie contam-se o vidro, diamante, enxofre, cera da Espanha¹⁴⁰, breu, seda e outros semelhantes para os quais a principal referência é o ar quando este está puro. As experiências feitas sobre eletricidade fazem-nos ver que essa virtude quase não se comunica a esses corpos quando aproximamos deles corpos eletrizados,

¹³⁸ Grosso modo, os corpos da primeira espécie eram os elétricos *per se* da época e, atualmente, nós os conhecemos como bons isolantes. Os corpos da terceira espécie eram os não-elétricos (ou não-elétricos *per se*). São os nossos bons condutores, como muitos metais. Os corpos da segunda espécie são intermediários entre os dois.

¹³⁹ Neste parágrafo, Johann Euler discute a comunicação elétrica; isto é, a condução.

¹⁴⁰ É um tipo de cera usada como lacre.

donde sabemos que os poros desses corpos devem ser muito estreitos e que o éter encontra ali obstáculos quase invencíveis, tanto para se liberar quanto para se inserir. Poderia acontecer que os poros fossem assaz largos, mas eles quase não tivessem comunicação entre si, o que produziria o mesmo efeito que se os poros fossem extremamente estreitos. Talvez a falta de comunicação entre os poros constitua antes um caráter desses corpos do que a própria pequenez dos poros, o que significa a mesma coisa. Ora, se os poros comunicam-se assaz livremente entre si, isso será o caráter da terceira espécie, que contém os metais, os corpos dos animais, a água e talvez todos os outros líquidos. Os outros corpos, como madeira, argilas, papel etc. que parecem ocupar um meio entre a primeira e a terceira espécie, preencherão a segunda classe.

XLIII. Nomeamos ordinariamente os corpos da primeira espécie elétricos *per se*, já que podemos excitar a eletricidade neles sem o recurso de um outro corpo que esteja já eletrizado; e, pela mesma razão, nomeamos os corpos da terceira espécie não-elétricos *per se*, já que a eletricidade não poderia ser aí excitada sem o recurso de um corpo elétrico. Mas, para evitar toda confusão que seria a temer dessas denominações, sou obrigado a abandoná-las inteiramente, fixando-me nas definições principais, conforme as quais nomearei sempre um corpo [como] eletrizado quando o éter encerrado dentro dos seus poros não está em equilíbrio com o éter dos corpos vizinhos; e um corpo não-eletrizado será sempre aquele no qual

[p. 150]

o éter se encontra no mesmo grau de elasticidade que dentro dos corpos que o avizinham. Eu não gostaria então de nomear um corpo elétrico *per se* quando ele não está eletrizado, nem um corpo não-elétrico *per se* quando ele está de fato eletrizado. A adição das palavras *per se* não parece suficiente para nos garantir contra toda ambiguidade. Aliás, as espécies [de corpos] estabelecidas são mais apropriadas para marcar essa distinção, sem deixar o menor equívoco.

XLIV. Entretanto, é muito notável que os corpos da primeira espécie, que são os menos suscetíveis à eletricidade, sejam ao mesmo tempo os mais propícios a imediatamente excitar neles mesmos essa virtude quando não há ainda outros corpos eletrizados. Essa circunstância é bem diferente da que considerei até aqui, onde supus que já haja corpos eletrizados, sem me embarçar com a causa pela qual eles assim se tornaram. E, tomando um tal corpo, muito certamente ele quase não comunica sua virtude aos corpos da primeira espécie, enquanto que ela [a virtude] se comunica muito comodamente aos corpos da terceira espécie. Mas, quando se trata de excitar dentro de um corpo a eletricidade sem o recurso a um outro corpo eletrizado, acontece precisamente o contrário, e vê-se que os corpos da primeira

espécie são neste caso mais propícios¹⁴¹. Outros [acadêmicos] começaram suas pesquisas por este [último] caso, o que parece mais natural, já que é necessário ter corpos eletrizados antes que se possa fazer experiências sobre a eletricidade. Mas, tendo aqui um objetivo diferente, saber explicar os fenômenos da eletricidade, esse mesmo objetivo me obrigou a inverter a ordem natural.

XLV. A fricção é o meio ordinário de excitar a eletricidade, ou de tornar os corpos eletrizados. Ora, esse meio não se estende a todos os corpos, deve-se excluir os da terceira espécie que, aliás, são os mais propícios a se tornarem eletrizados por comunicação. Isso não deve parecer estranho porque qualquer alteração que a fricção possa produzir no equilíbrio do éter, que está encerrado dentro dos corpos friccionados, ela deve ser imediatamente restabelecida

[p. 151]

quando os poros dos corpos são bem abertos. Concebamos que se friccionem dois corpos da terceira espécie um contra o outro, e que por essa ação o equilíbrio do éter seja agora perturbado, tornando-se sua elasticidade maior em um e menor no outro, essa desigualdade não poderia durar e o equilíbrio será restabelecido antes que se possa perceber um fenômeno da eletricidade.¹⁴² A livre passagem que o éter encontra para passar de um para o outro não permitirá nem mesmo que nasça a menor desigualdade dentro da elasticidade do éter. Ora, se um dos corpos friccionados, ou ambos, são da primeira espécie, ou tais que o éter só poderia passar muito dificilmente de um para o outro, compreendemos pela mesma razão que a fricção perturba o equilíbrio do éter, essa alteração poderá subsistir de forma que os corpos se tornem efetivamente eletrizados.

XLVI. Quando se esfregam dois corpos um contra o outro, há somente dois casos que podem ocorrer porque, ou a elasticidade do éter encerrado dentro dos corpos se mantém a mesma, ou ela será alterada. No primeiro caso nenhuma eletricidade será excitada, mas no outro não deixará de fornecer [fenômenos elétricos]. Vejamos então o que deve ocorrer neste último caso. Se o atrito é a causa do aumento do grau de elasticidade [do éter] em um dos corpos atritados, é necessário que a quantidade de éter ali seja aumentada. Esse crescimento vem, ou do ar ao redor, ou do outro corpo, que deve perder precisamente o mesmo tanto. Ora,

¹⁴¹ Aqui, o autor discute a eletrização por atrito. Ele afirma, grosso modo, que os isolantes se eletrizam melhor por atrito, e não por condução. Os metais (corpos da terceira espécie) eram os que não se eletrizavam por atrito, mas que comunicavam sua eletricidade para todas as partes de seu corpo com facilidade (quando eletrizados), algo que já havia sido mostrado por Stephen Gray. (2, p. 239-264) Apenas em 1778 Joseph von Herbert (1725-1794) conseguiu eletrizar os metais por atrito. (54, p. 15-16)

¹⁴² Aqui, Johann Euler continua sua discussão sobre formas de eletrização, comparando a comunicação elétrica com o atrito. Neste parágrafo, ele também chama a atenção de que os metais (palavra nossa), apesar de não se eletrizarem por atrito, são mais propícios a conduzirem a eletricidade.

não parece que o éter venha do ar, já que no atrito os corpos se tocam diretamente, e que o pouco de ar que resta entre os corpos não poderia fornecer, além de que o ar retém muito fortemente o seu éter. É necessário então que ele venha do outro corpo e, por isso, este tornar-se-á eletrizado negativamente, enquanto que o outro recebe uma eletricidade positiva. O contrário acontecerá se supusermos que o atrito diminui [a quantidade de] éter no primeiro [corpo], tornando-o negativamente eletrizado, porque assim o outro corpo adquirirá uma eletricidade positiva.

[p. 152]

XLVII. Poderíamos objetar que seria possível que a elasticidade do éter dentro de um corpo se tornasse maior sem que sua quantidade fosse aumentada, e que talvez o atrito produzisse tal efeito, assim como nós sabemos que o calor aumenta a elasticidade do ar sem que ele se torne mais denso¹⁴³. Mas, além dessa conjectura não ter nenhum fundamento, ela é destruída pelos próprios fenômenos da eletricidade que provam constantemente que, quando pelo atrito de dois corpos, um se torna positivamente eletrizado, observa-se no outro sempre uma eletricidade negativa, e vice-versa, a menos que um tenha uma livre comunicação com corpos da terceira espécie, que restabeleçam prontamente o equilíbrio do éter. Também observamos que, quando se atritam dois corpos parecidos e do mesmo material um contra o outro, não se poderia excitar nenhuma eletricidade¹⁴⁴ porque não haveria nenhuma razão pela qual a elasticidade do éter tivesse sido aumentada ou diminuída antes em um do que no outro. Se o atrito pudesse alterar a elasticidade do éter sem que, com isso, passasse alguma coisa de um corpo para o outro, a igualdade dos corpos [por si só] não destruiria esse efeito [de eletricidade sem movimentação do éter]¹⁴⁵.

XLVIII. É certo então que o atrito só produz eletricidade enquanto uma quantidade de éter é transmitida de um corpo para o outro, e a elasticidade do éter dentro de um aumenta à medida que ela diminui no outro. Logo, para explicar esse efeito do atrito deve-se mostrar

¹⁴³ Essa afirmação sobre o ar é feita em um trabalho de 1753 de Leonhard Euler sobre o equilíbrio dos fluidos. Nele, Leonhard Euler afirma que em um fluido compressível, a elasticidade depende da densidade (não necessariamente de forma linear). Se mantivermos o valor da densidade constante enquanto o do calor aumenta, a elasticidade aumenta. (127, p. 224-225) Como tanto no trabalho de Leonhard Euler quanto neste de Johann Euler, a elasticidade está bastante próxima do nosso conceito de pressão P (57, p. 8-9), podemos comparar esse raciocínio com a atual lei de gases ideais, onde $PV = nRT$, considerando calor como equivalente à temperatura T . O número de mols, n , pode ser convertido à densidade do gás, d , usando a massa molar, M , constante. Nesse caso, $MP = dRT$. Se controlarmos a densidade de um gás em um recipiente rígido hermeticamente selado, o aumento da temperatura acarreta um aumento de pressão (elasticidade).

¹⁴⁴ Idealmente, sim, mas defeitos, impurezas e microfissuras nos materiais são suficientes para que eles se eletrizem.

¹⁴⁵ Dois objetos similares do mesmo material e mesma fabricação não deveriam se eletrizar, mas sempre há diferenças microscópicas (impurezas, ranhuras, etc.) que os eletrizariam em caso de atrito.

como é possível que, atritando dois corpos um contra o outro, uma parte do éter seja expulsa de um e obrigada a adentrar o outro. De fato, se considerarmos que os poros de um corpo podem ser comprimidos pelo atrito¹⁴⁶, o éter que está ali contido será expulso e obrigado a adentrar o outro, contanto que os poros deste não estejam igualmente, ou mais, comprimidos, caso em que a entrada não poderá ocorrer. Mas, se os poros desse corpo estão em estado de receber o éter que é expulso do outro, e que pela continuação do atrito essa transmissão seja mantida, a desigualdade da elasticidade do éter dentro desses

[p. 153]

dois corpos deve se tornar cada vez maior, até que a força do atrito não seja mais capaz de aumentá-la ainda mais. Ora, para esse efeito é necessário que os poros, que foram uma vez comprimidos, se restabeçam a cada instante pela sua própria elasticidade¹⁴⁷ para serem preenchidos de novo de éter, e que este seja ainda retirado pelo atrito. É somente por tal operação reiterada que o corpo pode ser esgotado de seu éter ao ponto de se tornar significativamente eletrizado.

XLIX. É então essencial à produção da eletricidade que os poros de um dos corpos atritados sejam comprimidos ao ponto de expulsar o éter aí encerrado, e que ao menos uma parte passe para dentro dos poros do outro corpo porque não há nenhuma dúvida que uma boa parte volte para os poros interiores do primeiro corpo. É por esse meio que se obtém o início de uma [sinalização de que há] eletricidade [em um corpo]. Mas, para levá-la a um mais alto grau é necessário que os poros comprimidos se restabeçam antes de serem submetidos de novo ao atrito; nesse ínterim, onde esses poros do corpo atritante são liberados, o éter do interior ali entrará para preenchê-los à medida que eles [os poros] se restabelecem. Estando então esses poros de novo atritados e comprimidos, uma nova porção passará para o corpo atritante, e reiterando várias vezes a mesma operação, ambos os corpos se tornarão eletrizados, um positiva e o outro negativamente, contanto que nem um nem o outro sejam corpos da terceira classe que, por sua comunicação, destruiriam a eletricidade. Mas, se um só desses corpos está em comunicação com um corpo da terceira classe, uma vez que seu éter permanecerá quase em equilíbrio, e, por consequência, mais propício ou a receber o éter expulso do outro, ou a expulsar seu éter nele, a eletricidade deste se tornará mais significativa, o que está de acordo com as experiências.

¹⁴⁶ Johann Euler não explica por que um corpo atritado teria seus poros comprimidos; subentende-se que seja devido ao choque mecânico que ocorre quando se atrita objetos.

¹⁴⁷ Aqui, Johann se refere a elasticidade dos poros do corpo. Não confundir com a elasticidade do éter.

L. A produção da eletricidade pelo atrito não poderia ocorrer a menos que os dois corpos que são atritados um contra

[p. 154]

o outro sejam de uma natureza totalmente diferente; de forma que, enquanto que os poros de um são assaz comprimidos para expulsar o éter, os do outro se mantêm assaz livres para receber uma parte do éter. Compreende-se também que ao menos um desses dois corpos deve ter seus poros fortemente estreitos, afim de que pelo toque do outro o equilíbrio do éter não seja logo restabelecido. Quer dizer que é necessário que um dos dois corpos seja da primeira espécie¹⁴⁸. Se o outro o é também, ao menos na superfície que é atritada, haverá tanto menos a temer que pelo seu toque a eletricidade seja tão subitamente destruída. Mas, ainda que o interior do corpo tivesse seus poros muito abertos, isso não impediria a eletricidade do outro, ela seria antes avançada. Conforme a desigualdade da elasticidade do éter nos dois corpos atritados já se terá tornado grande, o aumento ulterior de eletricidade sucede tanto menos.

LI.¹⁴⁹ Ora, não basta considerar a diversidade de matéria de que são compostos os dois corpos atritados, sua forma exterior pode também mudar bastante a produção da eletricidade, já que o atrito depende principalmente da superfície dos corpos. Observa-se também que dois tubos de vidro embora semelhantes, mas dos quais um tem sua superfície bem polida e o outro áspera podem produzir fenômenos totalmente contrários de eletricidade, ainda que sejam atritados pelo mesmo corpo, um se tornando eletrizado positiva e outro, negativamente. Isso acontece quando se atrita um e outro com um pedaço de pano de lã. É difícil decidir se os poros do vidro polido são mais comprimidos em se atritando com a lã, ou os do vidro não polido? Mas a decisão dessa questão nos levaria antes a julgar se a eletricidade que o Sr. *Francklin* nomeia positiva é efetivamente positiva ou negativa porque ele nomeia positiva a eletricidade que o tubo polido adquire, e negativa aquela do tubo áspero.

LII. Se a eletricidade do tubo polido atritado com um pano de lã fosse positiva, e a do tubo não polido, negativa, seguir-se-ia

[p. 155]

que seria mais fácil comprimir os poros do vidro não polido que da lã, e os da lã mais fácil do que os do vidro polido. Poderíamos talvez imaginar várias razões para provar que os poros do vidro não polido são mais compressíveis que os do vidro polido, pois parece que os primeiros dão mais aderência ao atrito que estes últimos. Mas, esse mesmo raciocínio fundado sobre

¹⁴⁸ Grosso modo, Johann Euler estuda neste parágrafo a eletrização por atrito entre um isolante e um condutor. Aqui ele afirma que basta que um dos dois corpos atritados seja isolante.

¹⁴⁹ Neste parágrafo, entre outras coisas, o autor discute a dependência da eletrização com a da textura da superfície dos objetos.

uma suspeita que se pode ter a julgar pela estrutura aparente dos poros para conhecer a sua compressibilidade, esse mesmo raciocínio, como eu dizia, nos conduziria a inevitáveis contradições porque, como os poros da lã nos parecem ser mais compressíveis tanto do vidro polido, quanto do não polido, o vidro deveria sempre, qualquer que fosse sua superfície, dar uma eletricidade positiva. Daí vê-se facilmente que não se deve julgar a estrutura verdadeira dos poros pela sua forma aparente.

LIII. Todo esse raciocínio, então, ainda não derrubará minha Teoria porque, seja, como diz Sr. *Francklin*, a eletricidade do vidro polido positiva ou, como diz a minha Teoria, negativa, poderíamos num e no outro caso fazer tais objeções fundadas sobre a compressão que parece mais óbvia, se me for permitido dar a estes frágeis raciocínios o nome de objeções. É então necessário bem observar que não se trata aqui de compressão aparente, nesse caso a lã seria sem dúvida um corpo muito mais compressível que o vidro, fosse sua superfície polida ou áspera. Mas, trata-se antes da compressão a qual são suscetíveis os mínimos poros de um material que, sendo totalmente diferente da compressão grosseira, é muito possível que os poros da lã sejam menos compressíveis que os do vidro polido ou não polido. E, se acreditávamos ter encontrado razões pelas quais o vidro não polido deveria ser mais compressível que o polido, talvez essas razões não se reportem aos menores poros.

LIV. Entretanto, se pudéssemos determinar a qual espécie pertenceria uma única eletricidade natural, seria fácil determinar a espécie de todas as outras, já que as experiências mais fáceis

[p. 156]

decidem, de início, se a eletricidade de dois corpos elétricos é da mesma espécie ou não? Tendo assim encontrado que, quando se derrete enxofre e que se o deixa resfriar, ele adquire uma eletricidade oposta à de um vidro polido e excitado pelo atrito. Ora, o enxofre derretido não mostra nenhum traço de eletricidade ainda; ela só se manifesta após o resfriamento¹⁵⁰. Ora, por isso o enxofre é reduzido a um menor espaço, o que indica um maior encolhimento dos poros contendo ainda a mesma quantidade de éter, já que pertence à primeira espécie¹⁵¹. É

¹⁵⁰ O enxofre já havia sido usado por Stephen Gray, em 1732, em experimentos elétricos. Neles, Gray derretia e depois resfriava vários materiais, incluindo enxofre. Aliás, como Gray nota, o enxofre se manteve eletrizado por bastante tempo. (128) Materiais que mantêm sua eletricidade por muito tempo são conhecidos hoje como eletretos. (104, p. 251-264) No caso do enxofre, temos um termo-eletreto. Esse efeito de eletrização por motivos térmicos foi estudado experimentalmente pelo físico brasileiro Joaquim de Costa Ribeiro (1906-1960) já no século XX, ficando conhecido como efeito Costa Ribeiro, ou efeito termodielétrico. Costa Ribeiro deu contribuições teóricas à compreensão do fenômeno, mas uma explicação mais completa veio na década de 50, por Bernhard Gross (1905-2002). (129)

¹⁵¹ Aqui, o autor parece contradizer sua ideia de que a forma e a compressão “grosseira” dos materiais não são determinantes no estudo da compressão dos poros onde o éter se encontra. Isso porque afirma que depois do resfriamento, o enxofre, por se reduzir a um espaço de menor volume, tem seus poros encolhidos, sendo que

necessário que a compressão do éter e, por consequência, também a sua elasticidade, tenham se tornado maiores; sua eletricidade será, então, positiva e, por consequência, a do vidro polido, negativa. Se entrarmos em acordo sobre esse raciocínio, dever-se-á mudar os nomes dos quais Sr. *Francklin* se serve para distinguir as duas diferentes espécies da eletricidade, e os corpos que ele classifica como positivamente eletrizados, terão de fato uma eletricidade negativa, e vice-versa.

LV. As Experiências feitas sobre a eletricidade de uma bola de breu ou de lacre achatada por um golpe de martelo nos conduzirão às mesmas conclusões que o enxofre derretido. Porque nota-se que tendo suspenso ao redor de um globo de breu alguns pedaços de folha de ouro batido, e após ter achatado esse globo subitamente por um golpe de martelo, essas folhas de ouro batido, após serem atraídas, mostraram uma eletricidade resinosa, ou negativa segundo Sr. *Francklin*. Ora, aceitando que os poros do breu pelo achatamento súbito se retraem, é necessário que a compressão do éter dentro desses poros aumente, o que mostraria uma eletricidade positiva. E como essa eletricidade é contrária àquela do vidro polido, esta será de fato negativa, contra a denominação do Sr. *Francklin*. Entretanto, seria desejável que fizéssemos as mesmas experiências expostas nesses dois últimos parágrafos com outros corpos da primeira espécie, e sobretudo com o vidro, não duvidando que tais experiências muito contribuiriam para confirmar a minha Teoria.

[p. 157]

LVI.

nos dois parágrafos anteriores, alertara o leitor a não reduzir a questão envolvendo a compressão dos poros à compressão do corpo (que ele chama de “grosseira”).

Ora, parece que o Barômetro deveria fornecer o mais seguro meio para esclarecer inteiramente sobre essa dúvida. Examinemos para esse efeito a maneira pela qual nos servimos para nos instruir sobre a eletricidade dos Barômetros luminosos. Encontra-se uma descrição exata disso na dissertação do Sr. Waitz¹⁵², que ganhou o prêmio sobre a causa da eletricidade proposto pela Academia. Eis aqui um resumo, preenche-se um tubo de vidro fechado por um pouco de mercúrio. Não falarei da maneira mais apropriada de preenchê-lo de sorte que, quando se inclina o tubo, o espaço acima do mercúrio seja um vácuo de ar. Após, perfuram-se dentro de um pedaço de madeira AB dois canais *ab* e *cd*, onde o *cd* é muito mais amplo que o *ab*, cujo diâmetro quase não ultrapasse aquele do tubo de vidro *aD*, e que esses dois canais tenham uma comunicação entre si, o que acontecerá fazendo-se um terceiro canal *bd* horizontal de um até o outro. Então, vertendo mercúrio dentro desse canal duplo *abcd*, e firmando o tubo de vidro *aD* dentro do canal estreito *ab*, o barômetro estará feito. Enfim, para fazer subir e descer o mercúrio sem precisar inclinar o barômetro, basta colocar um pistão P

¹⁵² Provavelmente Jacob Siegmund von Waitz (1698-1777). Jacob Waitz escreveu o trabalho *Dissertation sur la cause de l'électricité des corps et des phénomènes qui en dépendent*, sem assiná-lo, para uma competição proposta pela Academia de Königsberg. Ele venceu a competição, cujo resultado foi anunciado em maio de 1745, e revelou seu nome em um trabalho em alemão sobre a eletricidade intitulado *Abhandlung von der Electricitaet und deren Ursachen* (em português: Tratado da eletricidade e suas causas). (130)

sobre a abertura do canal *cd*. Assim, pressionando o pistão para baixo, o mercúrio subiria, como ao contrário, levantando-o, o mercúrio desceria.

LVII. Para fazer uso de um tal barômetro, bastará, então, suspender nos arredores do tubo leves fios metálicos *ef* e *ef*, que serão atraídos e repelidos pelo tubo assim que ele tiver se tornado eletrizado. Examinemos agora os fenômenos que devem acontecer segundo minha Teoria fazendo o mercúrio subir e descer. Que se pressione primeiramente o pistão para baixo, e o mercúrio, subindo, expulsará uma parte do éter puro do alto do tubo para dentro do vidro; o vidro tornar-se-á, com isso, eletrizado positivamente, e os fios metálicos tendo sido atraídos e, do mesmo modo repelidos, sê-lo-ão também. Bastará, então, examinar pelas experiências conhecidas a qual espécie deve ser referida a eletricidade desses fios. Se àquela que o Sr.

[p. 158]

Francklin nomeia positiva, e outros vítrea, ou a negativa do Sr. *Francklin*, e resinosa para outros. Se as razões alegadas acima fossem fundadas, ela deveria pertencer a resinosa que o Sr. *Francklin* nomeia negativa, ou então, a resinosa seria de fato positiva, e a vítrea, negativa.

LVIII. O contrário deve acontecer se fizermos novamente descer o mercúrio por meio do pistão porque, então, o espaço interior do tubo acima do mercúrio tendo-se tornado um verdadeiro vácuo, o vidro expulsando aí uma parte do seu éter [para o vácuo] se tornará negativamente eletrizado e, com isso, também os fios metálicos, após terem sido atraídos e repelidos. Então, se a minha Teoria fosse a verdadeira, esses fios deveriam mostrar uma eletricidade vítrea. Ora, o Sr. *Wilke*, conhecido aqui por suas importantes experiências sobre a eletricidade, confessou-me durante sua estadia aqui [em Berlim] que ele se lembrava de ter examinado a espécie da eletricidade do tubo de um barômetro luminoso após tê-lo inclinado e posto de pé imediatamente, ou seja, após ter feito o mercúrio descer, tendo-o, antes, o feito subir, e ele me assegurou que havia achado que a eletricidade do tubo excitada da maneira supracitada era vítrea, ou seja, positiva segundo o Sr. *Francklin*. Vê-se, então, ainda aqui que a minha Teoria é a verdadeira e, por isso, dever-se-ia mudar os nomes que o Sr. *Francklin* dá a essas duas diferentes espécies de eletricidade. Seria, entretanto, desejável que alguns amantes da Física experimental repetissem essas experiências que, por si só, estão em condições de dar à minha Teoria uma certeza incontestável.

LIX. Eis aqui uma outra prova que parece fortalecer esse sentimento. Observamos que todos os corpos da primeira espécie, sendo atritados com um metal, adquirem uma eletricidade vítrea, ou positiva segundo o Sr. *Francklin*, contanto que se faça a exceção do

chumbo, que sendo atritado contra enxofre produz um efeito contrário¹⁵³. Ora, não é provável que os poros dos metais sejam suscetíveis a uma grande

[p. 159]

compressão porque, já que esses corpos são os mais insensíveis ao atrito, parece que seu éter não pode ser reduzido a um menor espaço pela compressão de seus poros. Então, os poros de todos os outros corpos sendo mais compressíveis, é necessário que, atritando-os contra um metal, nasça [nos outros corpos] uma eletricidade negativa, sendo o éter expulso pela compressão de seus poros. Logo, a eletricidade vítrea será de fato negativa e, com isso, a resinosa, positiva. Se quisermos sustentar o sentimento oposto, dever-se-á dizer que os poros dos metais são mais compressíveis que os de todos os outros corpos, o que não parece estar de acordo com os outros fenômenos da eletricidade; sobretudo a exceção do chumbo, que é necessário fazer em certos casos, pareceria bem surpreendente. Enquanto que no outro sentimento [a teoria de Johann] ela parece bastante natural, devido à moleza desse corpo.

[FIM]

¹⁵³ Johann Euler não está afirmando que eletrizou metais (não-elétricos *per se*) por atrito, mas sim que eletrizou elétricos *per se* (da primeira espécie) atritando-os com chumbo. Nesse caso, o enxofre fica negativo, segundo o autor. Johan C. Wilcke já havia notado que o chumbo fica positivo quando o atrito é com o enxofre, quando o comum é que ele fique negativo. (131, p. 63) Como o chumbo fica positivo, a afirmação de Johann Euler faz sentido, e o enxofre acaba por ficar negativo. O chumbo aqui não é puro, o que o faz um condutor e, portanto, difícil de ser eletrizado por atrito. O que ele se refere aqui é provavelmente algum composto, isolante, a base de chumbo (como o sulfato de chumbo, que ocorre na natureza). Além disso, é curioso notar que na obra acima mencionada de Wilcke, este dialoga com o trabalho de Jacob Waitz e de Euler (clara referência a Johann Euler). Por exemplo, na página 52 (131), ele discute a eletrização do enxofre depois de derretido e resfriado, seguindo o parágrafo LIV acima. Fica claro então que Johann Euler e Wilcke discutiram muito sobre teorias elétricas. Pois, já que o trabalho aqui traduzido é de 1757 (publicado em 1759), e o de Wilcke é de 1757, para que um pudesse citar o raciocínio do outro, só se tivessem trocado muita informação. Como Wilcke trabalhou em Berlim entre 1755 e 1757 (3, p. 384-390), essa troca provavelmente se deu por meio de muita conversa pessoalmente.