

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS – *CAMPUS* BAMBUÍ  
LICENCIATURA EM FÍSICA

Helias Alves Moreira

**A MATEMÁTICA COMO LINGUAGEM ESTRUTURANTE DO CONHECIMENTO  
FÍSICO: abordagens históricas**

BambuÍ

2024

HELIAS ALVES MOREIRA

**A MATEMÁTICA COMO LINGUAGEM ESTRUTURANTE DO CONHECIMENTO  
FÍSICO: abordagens históricas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Licenciatura em Física do Instituto  
Federal de Minas Gerais – *Campus* Bambuí  
para obtenção do grau de licenciado em Física.

Orientador: José Hilton Pereira da Silva

Bambuí

2024

---

M838m Moreira, Helias Alves.

A matemática como linguagem estruturante do conhecimento físico: abordagens históricas [manuscrito] / Helias Alves Moreira. – 2024.

58 f.

Orientador: José Hilton Pereira da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Bambuí*, 2024.

1. História da ciência. 2. Linguagem estruturante. 3. Pensamento físico. 4. Matematização da física. I. Silva, José Hilton Pereira da. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Bambuí*. III. Título.

CDD-530.15



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
Campus Bambuí  
Diretoria de Ensino  
Departamento de Ciências e Linguagens  
Faz. Varginha - Rodovia Bambuí/Medeiros - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 38900-000 - Bambuí - MG  
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

Helias Alves Moreira

**A MATEMÁTICA COMO LINGUAGEM ESTRUTURANTE DO CONHECIMENTO FÍSICO:** abordagens históricas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Bambuí para obtenção do grau de licenciado(a) em Física.

Aprovado em: 04/09/2024 pela banca examinadora:

Prof. Dr. José Hilton Pereira da Silva – IFMG - *Campus* Bambuí (Orientador)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leticia Alves da Silva – IFMG - *Campus* Bambuí

Prof. Me. Gustavo Henrique Pereira Luz – IFMG - *Campus* Bambuí



Documento assinado eletronicamente por **Jose Hilton Pereira da Silva, Professor**, em 04/09/2024, às 21:26, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Henrique Pereira Luz, Professor**, em 05/09/2024, às 16:22, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Leticia Alves da Silva, Professora**, em 24/09/2024, às 11:52, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2028536** e o código CRC **82ED02CC**.

Dedico este trabalho à minha amada família, nomeadamente aos meus pais, Heli e Cristiana, e ofereço também a todos os professores que participaram da minha jornada académica, em especial, ao Prof. José Hilton Pereira da Silva.

## AGRADECIMENTOS

Eu expresso minha gratidão, especialmente, ao meu Professor José Hilton por sua habilidade em administrar tanto questões acadêmicas quanto questões pessoais extraclasse. Ele me apoiou durante o curso e sempre apontou melhorias. Em diversas ocasiões, discutimos sobre o ensino de Física e seus desafios. Além disso, tivemos uma relação próxima ao longo do tempo. Agradeço aos outros professores, que também foram fundamentais para minha formação acadêmica. Um deles, apesar de não ser meu professor, contribuiu significativamente para este trabalho, Maurício Pietrocola, que agradeço imensamente pelo fornecimento de textos que contribuíram para este trabalho.

Emociono-me ao agradecer à Instituição, IFMG - *Campus Bambuí*, que possibilitou a minha permanência na graduação por meio da Moradia Estudantil, pois não tinha recursos financeiros suficientes para me manter na cidade. Todo esse processo foi crucial para que não somente eu me mantivesse no curso, mas para que o meu desempenho acadêmico evoluísse. Tive uma excelente recepção na Moradia Estudantil, na qual recebi todas as condições necessárias para que eu pudesse estudar de maneira efetiva.

Eu não posso me esquecer de uma amiga importante durante minha trajetória acadêmica, Débora. Sempre que nos encontrávamos, sorriamos e discutíamos sobre o futuro, buscando nos fortalecermos mutuamente. Lembro-me da sua ação exemplar e creio que um dia poderei retribuir à altura. Débora recomendou-me como professor para sua colega de trabalho, o que me permitiu ter mais recursos para continuar na instituição e alcançar alguns objetivos de curto prazo. Eu também me recordo dos nossos estudos extraclasse sobre as disciplinas de Cálculo, que eram tão temidas por ela. Como um amigo ajuda o outro, eu busquei auxiliá-la com todos os teoremas do Cálculo, o que foi uma honra para mim. Enfim, as palavras não são a melhor maneira de expressar minha gratidão, mas afirmo, com todo o coração, que Débora é mais do que uma amiga, ela é uma irmã que não encontrei por acaso. Ela é uma mulher forte, guerreira, trabalhadora e, sobretudo, humilde de coração. São pessoas como ela que tem um lugar marcado na nossa história.

Agradeço, também, a oportunidade de ter estudado ao lado de grandes colegas. Superamos todas as dificuldades juntos, apesar de cada um ter a sua visão e forma de pensar, mas, em muitos momentos, de forma inconsciente, nos ajudávamos mutuamente. Foram muitas aventuras juntas, e fico muito feliz por isso. Estendendo o agradecimento a outras dezenas de pessoas com quem fiz amizades (colegas de faculdade e servidores).

Por fim, quero mencionar minha família, meus irmãos, meus amigos e minha cidade. Eu gostaria de começar pelo povo da minha cidade, que me apoiou com incentivos; em cada esquina, eu encontrava alguém que me incentivava. Foram inúmeras as ações que fizeram para mim, e me emociono ao recordá-las. Por exemplo, minha ex-professora Marisa, que também é artesã, confeccionou um saco de pano para colocar minhas roupas sujas. Além disso, não posso esquecer de alguns cidadãos de Iguatama, que me ajudaram com incentivos, caronas e conselhos, especialmente, Mário Zan, que me dava carona todas as segundas-feiras sem cobrar nada, além disso, me dava diversos conselhos. Agradeço aos meus amigos e irmãos, que sempre tiveram cuidado comigo.

Encerro com aqueles que são preciosismos para mim: a minha família, que sempre me apoiou e torceu por mim. Quero dedicar, em especial, aos meus pais, que não mediram esforços para me ajudar. Minha Mãe ligou todos os dias, para ser preciso, foram mais de três vezes ao dia, e sempre guardava quantias para me dar suporte, ainda que fossem modestas, pois tanto ela como meu pai sabiam que, se me dessem um real que fosse, este seria o dinheiro mais bem gasto. Enfim, foram estes dois que produziram esse ser aqui e são os principais participantes do meu progresso.

Se não fosse o SENHOR, estas palavras jamais seriam escritas. Obrigado!

“Tudo o que é racional é real e tudo o que é  
real é racional.”

Georg Wilhelm Friedrich Hegel

## RESUMO

No cenário atual do conhecimento físico, é praticamente impossível elaborar um modelo teórico, com foco fenomenológico, sem a utilização de uma linguagem matemática. Isso indica que houve transformações que alçaram a Matemática a este posto de uma linguagem que estrutura o pensamento sobre os fenômenos físicos. Para tanto, é crucial investigar o progresso do pensamento físico por meio de registros históricos que nos permitam identificar indícios desses eventos transformadores que não apenas tornaram a Matemática uma linguagem, mas também levaram à matematização da Física. Nisto, o objetivo do trabalho foi destacar esses eventos transformacionais e, além disso, extrair a progressão da função da Matemática na Física, em que o papel quantitativo e enigmático é substituído pelo papel de modelagem e estruturação. O aspecto metodológico foi baseado na pesquisa bibliográfica de textos que exploraram e descreveram a evolução do pensamento físico e, sobretudo, a evolução da relação entre a Física e a Matemática, focando no processo de inserção e adaptabilidade da Matemática como linguagem estruturante do conhecimento físico. Dessa maneira, foi possível traçar linhas de análise, ainda que simplificadas, sobre fatores que contribuíram para essa transformação. A análise indicou que a prática de matematizar tem início com as ideias pitagóricas, em que a Matemática era vista como mais um aspecto enigmático do que uma linguagem. Ainda na Grécia, é possível destacar a figura de Arquimedes como alguém que utilizou da linguagem matemática muito mais próximo da ideia de uma linguagem estruturante para a Física, do que os demais pensadores. Contudo, é com Galileu, quando ele apresenta um método de fazer Ciência, que a Matemática é certificadora e tem a capacidade de descrever os fenômenos físicos. Newton aumentou este aspecto quando desenvolveu conceitos matemáticos específicos para explicação de fenômenos naturais. No entanto, os fenômenos eletrodinâmicos, e parte dos fenômenos termodinâmicos, demandaram um novo enfoque, e o resultado disso foi o aumento da matematização da Física, principalmente após o desenvolvimento da Mecânica Analítica. O início da matematização da matéria, que culminou na Física Moderna altamente matematizada, fez com que a modelagem matemática assumisse uma importância tal qual a observação empírica para a descrição dos fenômenos naturais. A Matemática parece ter a capacidade de descrever e simbolizar os fenômenos físicos, além de ser uma via que interliga a fronteira entre o real e o abstrato. Entretanto, isso não significa que o racionalismo matemático seja capaz de descrever de forma direta um fenômeno, mas sim que a linguagem matemática tem um caráter estruturante baseado em um raciocínio que a fundamenta.

**Palavras-chave:** História da Ciência. Linguagem Estruturante. Pensamento Físico. Matemática da Física.

## ABSTRACT

In the current scenario of physical knowledge, it is practically impossible to develop a theoretical model with a phenomenological focus without using a mathematical language. This indicates that there have been transformations that have elevated Mathematics to the position of a language that structures thinking about physical phenomena. To this end, it is crucial to investigate the progress of physical thought through historical records that allow us to identify evidence of these transformative events, which not only made Mathematics a language, but also led to the mathematization of Physics. In this regard, the objective of the work was to highlight these transformational events and, in addition, to extract the progression of the function of Mathematics in Physics, in which the quantitative and enigmatic role is replaced by the role of modeling and structuring. The methodological aspect was based on bibliographic research of texts that explored and described the evolution of physical thought and, above all, the evolution of the relationship between Physics and Mathematics, focusing on the process of insertion and adaptability of Mathematics as a structuring language of physical knowledge. In this way, it was possible to outline lines of analysis, albeit simplified, on the factors that contributed to this transformation. The analysis indicated that the practice of mathematizing began with Pythagorean ideas, in which Mathematics was seen as more of an enigmatic aspect than a language. Even in Greece, it is possible to highlight the figure of Archimedes, as someone who used mathematical language, much closer to the idea of a structuring language for Physics, than other thinkers. However, it was with Galileo, when he presented a method of doing Science, that Mathematics is certifying and has the capacity to describe physical phenomena. Newton increased this aspect when he developed specific mathematical concepts to explain natural phenomena. However, electrodynamic phenomena, and part of thermodynamic phenomena, demanded a new focus, and the result of this was the increase in the mathematization of Physics, mainly after the development of Analytical Mechanics. The beginning of the mathematization of matter, which culminated in highly mathematized Modern Physics, made mathematical modeling assume an importance as important as empirical observation for the description of natural phenomena. Mathematics seems to have the ability to describe and symbolize physical phenomena, as well as being a path that bridges the boundary between the real and the abstract. However, this does not mean that mathematical rationalism is capable of directly describing a phenomenon, but rather that mathematical language has a structuring character based on a reasoning that underlies it.

**Keywords:** History of Science; Structuring language; Physical thinking; Mathematization of Physics.

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1 MATEMÁTICA COMO LINGUAGEM .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Estruturas epistêmicas .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 A Matemática como linguagem estruturante .....</b>	<b>19</b>
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>3 PENSAMENTO SOBRE A NATUREZA .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Na Antiguidade .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Na Idade Média .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Na Modernidade .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4 Na Contemporaneidade .....</b>	<b>44</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## APRESENTAÇÃO

A noção de entendimento de um fenômeno é correlacionada à habilidade de decodificação das informações acerca do próprio evento, tornando inviável compreender aquilo que não se consegue significar. Há um elemento intrínseco ao ser humano, que é a capacidade de transmitir e receber informações, isto é, o ato de se comunicar, cuja base é a linguagem, sem a qual somos incapazes de estabelecer uma comunicação (PUPPI, 2012, p. 17). Podemos nos comunicar através de diversas formas de linguagens, por exemplo, as verbais, visuais, corporais, textuais, entre outras.

No sentido apresentado acima, a compreensão de fenômenos físicos depende de uma linguagem que estrutura o pensamento físico. Para além da linguagem verbal, visual, textual, a linguagem matemática parece fazer parte importante na construção desse pensamento, principalmente pela posição que a Matemática ocupa na Física. Toda a complexidade de compreender a inserção de uma linguagem a um meio nos levou ao interesse de encontrar, ou ao menos ter indícios, de como a Matemática se caracterizou como linguagem que estrutura o pensamento físico ao longo dos eventos históricos na evolução dos conhecimentos físicos.

Quando olhamos para a Antiguidade, Idade Média e Renascentismo, os fenômenos da Natureza eram descritos em forma de enunciados a partir da observação não sistemática, ou, às vezes, por meio da lógica. Mas, à medida que ocorreu o desenvolvimento de uma forma de se interpretar os fenômenos por meio de expressões numéricas, vemos a Física, especialmente a partir do século XVII, com Galileu Galilei e outros, assumir a Matemática como principal linguagem da natureza na modelagem dos fenômenos físicos (PIETROCOLA, 2002, p. 93).

Considerando que, a partir do século XX, a matematização se tornou um elemento intrínseco à construção de teorias físicas. Buscamos saber em quais situações, ou contextos, ao longo da história do desenvolvimento dos conhecimentos físicos, é possível perceber elementos que levaram a Matemática a ser transformada em linguagem estruturante da Física. Partindo dessa problemática, visamos alcançar o seguinte objetivo: destacar os episódios e os pensadores que contribuíram para que a Matemática se transformasse na linguagem estruturante do conhecimento físico, a partir de situações que marcaram a evolução das ideias da Física.

Como objetivos secundários, buscamos:

- Identificar o advento da matematização da Física por meio de estudos históricos;
- Elencar os elementos dentro deste processo histórico em que a Matemática sofre a mudança de papel quantitativo para estruturante;

- Explicitar e analisar, a partir de referências e dados, os efeitos causados pelo posto da Matemática como estruturante.

É fato que a Matemática assumiu um lugar bem definido na construção das teorias físicas (PIETROCOLA, 2002, p. 90). Ela tem uma linguagem própria, que descreve o entendimento acerca da natureza física com uma modelagem muito próxima do evento real. Na Antiguidade, a maioria das proposições de explicações físicas eram formuladas, pensadas e sistematizadas, muitas vezes, sem o uso de relações matemáticas, onde o ato de fazer ciência era uma descrição acerca do fenômeno físico visto (aspecto lógico de argumentação). A geometria euclidiana e o método numeral pitagórico permitiram que os pensadores pudessem acreditar que a Matemática seria capaz de traduzir toda a natureza física. Por meio de teoremas axiomáticos, construíram-se ideias que pareciam corresponder à perfeita realidade, como no caso do monocórdio de Pitágoras.

Esse processo de matematização foi importante, mas ainda não era a estruturação do pensamento físico. Na Física aristotélica, por exemplo, as teorias sobre a Natureza eram descritivas e evidenciadas pela percepção do sujeito e organizadas de forma sistemática, porém sem o uso de elementos matemáticos. Os primeiros indícios de matematização como estruturação das ideias físicas aconteceram com Arquimedes de Siracusa, pois, além da explicação dos fenômenos, por meio de equações, havia elementos empíricos que davam sustentação às ideias propostas. Contudo, foi com Galileu, no século XVII, que a Matemática passou a ser considerada como chave para entender os fenômenos físicos, de tal forma que a teoria sistematizada por códigos matemáticos passou a ser capaz de traduzir a própria Natureza.

Este trabalho está segmentado em quatro capítulos. O primeiro é dedicado à introdução do conceito de linguagem atribuído à Matemática, cujo objetivo é apresentar definições que confirmem seu papel como linguagem estruturante do pensamento físico. Para isso, apresentamos condições que conferem esse caráter, tais como a capacidade de tradução dos fenômenos físicos, a simbologia das variáveis de uma expressão matemática que correspondem às partituras do evento, o fundamento cultural da Matemática na Física, por meio de sua função linguística, entre outras.

A Metodologia está expressa no Capítulo 2, onde justificamos a escolha por uma abordagem qualitativa. Nela, apresentamos argumentos para demonstrar que o trabalho se trata de uma pesquisa bibliográfica. Também apresentamos como escolhemos os materiais que foram utilizados para a incursão histórica, na tentativa de compreender o processo de transformação que levou a Matemática à sua posição de linguagem estruturante do pensamento físico.

No Capítulo 3, apresentamos uma síntese dos eventos históricos traçados em linhas temporais de forma a demonstrar o pensamento sobre a Natureza, abrangendo desde a era pré-socrática até a contemporaneidade. Nosso intuito foi apresentar, de forma sucinta, elementos históricos que demonstraram a mudança do papel da Matemática na Física e sua importância na estruturação do pensamento físico.

Com base nos dados históricos do Capítulo 3 e na fundamentação teórica obtida no Capítulo 1, apresentamos, no Capítulo 4, análises que abordam o caráter estrutural da Matemática, em conjunto com sua função de linguagem e modelagem. Nosso intento foi identificar as particularidades da Matemática como linguagem e compreender a predominância da matematização.

## 1. MATEMÁTICA COMO LINGUAGEM

### 1.1 Estruturas epistêmicas

A origem da palavra “matemática” vem do grego, e seu significado pode ser traduzido como “ciência racional” (ARAGÃO, 2009, p. 3). A Matemática<sup>1</sup> tem como princípio o método dedutivo; assim, para ser estruturada através de linhas de desenvolvimento, é composta por teoremas axiomáticos em que cada premissa depende da anterior, fazendo, dessa forma, uma cadeia lógica de estruturação e permitindo resultados provindos de relações dedutivas.

A palavra “física” é um verbete que também tem origem etimológica grega (“*physis*”), cujo significado de tradução é “natureza” (KARAM, 2012, p. 7). A Física é uma ciência que propõe teorias que buscam ter o modelo e a compreensão dos fenômenos naturais. Em linhas gerais, a Matemática é tida como uma ciência abstrata e independente, e a Física é interpretada como uma ciência empírica que visa compreender os fenômenos naturais.

Acredita-se que as técnicas matemáticas tenham surgido desde o começo da humanidade, sendo as mais evidentes obras aquelas que puderam ser datadas a partir do século X e IX a.C., por meio das construções dos megalíticos (construções feitas de grandes pedras), como pirâmides e templos de rochas. Aragão (2009, p. 10) menciona que:

Não há dúvida, contudo, de que tanto a construção destes megalíticos como das pirâmides exigia, já nesse tempo, medições cuidadas e precisas, e a construção de figuras geométricas. Era necessário a esses construtores um profundo conhecimento de Geometria (ARAGÃO, 2009, p. 10).

Os egípcios e os babilônios desenvolveram sistemas numéricos e a geometria circunferencial e triangular, que auxiliaram na construção civil, na agricultura, na medição de espaço e tempo e também na observação de corpos celestes, melhorando os calendários, ou seja, a Matemática contribuiu para a resolução de problemas práticos (CHASSOT, 1994; PIRES, 2008). Os egípcios construíram as pirâmides em formato geométrico perfeito, oferecendo evidências de que estes compreendiam, ao menos em parte, a Geometria e as relações numéricas; os astrônomos observaram que a trajetória dos astros, que era aparentemente circular, conjuntamente com a repetição dos ciclos dia-noite, e que eventos climáticos semelhantes (certos períodos chuvosos, períodos de seca, períodos de frio) aconteciam de forma

---

<sup>1</sup> Todas as vezes em que se tratar da grande área de conhecimento, utilizaremos as iniciais maiúsculas para se diferenciar das palavras comuns do cotidiano, por exemplo: ciência - no sentido de tomar conhecimento; Ciência - conjunto de saberes sistematizados.

regular, ou seja, poderiam ser previstos. Dessa forma, com a criação do calendário, foi possível prever as cheias do rio Nilo, por exemplo, favorecendo o desenvolvimento da agricultura.

Na Antiguidade, os filósofos jônicos, cujas raízes materialistas tentavam explicar a natureza por meio do *arché*<sup>2</sup>, se utilizaram da geometria de sua época para formular suas proposições sobre a natureza. Mais tarde, os pitagóricos chegaram à conclusão de que os números e a geometria perfeita eram o que desvendava a natureza. Pitágoras, considerado o pai da Matemática, muito se dedicou a entender a natureza por sistemas numéricos e geométricos, o que sugere que a concepção da Matemática e seu desenvolvimento estavam diretamente relacionados à busca de desvendar os fenômenos naturais.

A Filosofia Natural, como era chamado o estudo de causas primárias do universo, teve como principais precursores Platão e Aristóteles, especialmente Platão, onde nasce a ideia de que as teorias físicas que usassem o método numérico e geométrico pitagórico poderiam explicar os fenômenos naturais por meio da razão. Pires (2008) diz:

Platão acreditava que as entidades matemáticas tinham exclusivamente as propriedades necessárias dos constituintes finais de uma ciência racional da natureza. Dessa forma, somente uma teoria física formulada usando um sistema numérico e geométrico revelaria a verdadeira estrutura dos fenômenos (PIRES, 2008, p. 36).

Contudo, é importante destacar que, em Platão, havia uma busca da verdade, e esta estava na essência das coisas, algo que só era possível de ser alcançado por meio da razão. Nesse sentido, Platão desprezava a experimentação, pois esta poderia nos enganar facilmente, por se tratar de algo que era aparente. Aristóteles, que era seu discípulo, contribuiu muito mais para o desenvolvimento da Filosofia Natural utilizando-se da lógica, ainda que não se fundamentasse em elementos numéricos. Em sua obra, encontramos textos sobre a Física sublunar (eventos e movimentos que ocorriam na Terra) e sobre a Física supralunar (eventos e movimentos dos astros), que serviram de referenciais durante toda a Idade Média.

A Filosofia Natural é a raiz da Física que conhecemos hoje, pois sua construção teórica era galgada na matemática pitagórica. Podemos considerar que a Física nasce neste berço, e, por mais que a Matemática daquela época fosse tomada como uma espécie de “enigma” que desvenda a natureza, ainda assim, seus elementos serviram de fundamento nas proposições de explicação dos fenômenos naturais.

É evidente que a Matemática, apesar de ser uma Ciência abstrata e por muitos considerada independente, sempre esteve diretamente relacionada com a explicação de fenômenos naturais, algo que também ajudou no seu desenvolvimento, e que a Física, desde

---

<sup>2</sup> Elemento primário que constituiria todos os elementos do universo.

seu início como Filosofia Natural, teve uma relação profunda com a Matemática, o que decidimos chamar, de forma alegórica, de “singularidade”. Nesse sentido, entendemos que a Matemática e a Física não são dois extremos, mas Ciências interdependentes, isto é, há uma relação mútua e singular entre as duas, de tal modo que a construção epistêmica de ambas anda lado a lado na História da Ciência.

Alguns autores também observaram esta relação singular. Kline (1959) vai dizer que a criação da Matemática foi crucial para investigar e entender a natureza, pois “a matemática é a melhor criação humana para investigação da natureza. Seus principais conceitos, métodos e teoremas foram derivados do estudo da natureza” (KLINE, 1959, p. vii). Para Kline, muitos dos teoremas matemáticos só vieram a ser propostos devido às investigações da natureza. Essa visão reforça o que abordamos anteriormente, que chamamos de singularidade. Vargas (1996) argumenta, ancorado na ideia da matemática pitagórica, o quão a Matemática está interligada com a natureza (problemas físicos): “em outras palavras, a realidade vista pela teoria (*theoren*, em grego, significa ver) são as harmonias que governam o mundo, desde o movimento dos planetas até o som das cordas de lira” (VARGAS, 1996, p. 250, grifo do autor). Na visão do autor, é como se a Matemática fosse desenvolvida para explicar a natureza.

## 1.2 A Matemática como linguagem estruturante

É comum dizer que a Física utiliza a Matemática como instrumento e meio de validação teórica, sendo a teoria baseada numa visão empírica, e esta, por sua vez, se aproxima do objeto real. Pietrocola (2002) propõe que a Matemática seja interpretada como a linguagem da Física, uma vez que ela é um elemento intrínseco para a compreensão dos fenômenos naturais, isto é, é o meio entre o real e o empírico, e “o fato de conceber-se a Matemática como instrumento da Física, além da coerência com a tradição empírico-realista, recebe reforço da própria ideia espontânea que se tem da linguagem” (PIETROCOLA, 2002, p. 97).

Quando nos referirmos ao termo “linguagem”, estamos a dizer que a Matemática não só tem a capacidade de nos aproximar dos fenômenos, mas de ser o próprio modelo destes, uma vez que ela nos fornece os códigos que nos permitem “conversar com os fenômenos físicos”. A linguagem matemática, assim como a linguagem humana, tem seus códigos próprios, como vetores, equações, funções, tensores, ângulos, números, incógnitas, gráficos, entre outros; é somente com eles que a Física pode chegar ao entendimento de um determinado fenômeno.

Jakobson (2003) diz que o receptor compreende a mensagem a partir do código, ou seja, quando usamos um modelo matemático para explicar fenômenos físicos, dizemos que os códigos matemáticos são aqueles que nos informam as especificidades, e, sem eles, não entenderíamos o fenômeno. Esta abordagem muito se relaciona com a afirmação atribuída a Galileu, de que o livro da natureza está escrito em caracteres matemáticos, e, nessa perspectiva, a única forma de acessá-lo logicamente seria por meio da própria linguagem matemática. Poincaré (1905, p. 91) corrobora dizendo que a única linguagem que os físicos podem usar para interpretar fenômenos é a linguagem matemática, pois, segundo ele, “[...] ela [que] lhe fornece a única língua que ele pode falar” (POINCARÉ, 1905, p. 91.).

Puppi (2012), ancorado em Saussure, diz:

De acordo com Saussure, se considerarmos a linguagem em seu todo ela é multiforme, isto é, pode-se apresentar em muitas formas e de várias maneiras. Ao adelar um conceito mais amplo de linguagem, Saussure reconhece que a forma de linguagem considerada no seu todo já não pode ser limitada ao formato exclusivo de palavra da língua, qualquer seja ela (PUPPI, 2012, p. 23).

Limitar a linguagem ao uso da comunicação é um erro, uma vez que a linguagem não é um simples processo de fala, mas todo o fenômeno de interação entre dois objetos, sejam eles reais ou abstratos. O fato de nós, seres humanos, atribuímos valor a coisas abstratas diz muito sobre a linguagem, pois a linguagem é uma extensão do ser, e sobretudo de nossos domínios cognitivos. Pietrocola (2002, p. 99) destaca que:

No entanto, a função da linguagem para o ser humano é muito mais complexa do que a dos demais seres vivos. Podemos nos comunicar sobre fatos e situações concretas e presentes do mundo, mas também sobre situações imaginadas e acontecimentos passados, produzidos e armazenados em nossa mente (PIETROCOLA, 2002, p. 99).

Há conceitos e palavras introduzidas na linguagem que não têm uma ligação direta com situações concretas. Na Física, por exemplo, a linguagem matemática faz um papel de ser o ponto de ligação a fenômenos que não conseguimos analisar de forma concreta, como o fenômeno do movimento circular, em que utilizamos o número pi ( $\pi$ ) como elemento que nos descreve uma rotação em um trajeto circular. Contudo, o número  $\pi$  não é uma entidade concreta na natureza, ou seja, nós não podemos encontrá-lo de forma física, apenas podemos considerá-lo mediante uma linguagem e um modelo sistemático que é elaborado a partir de evidências. Em resumo, todo esse sistema é elaborado por meio da Matemática.

Os seres vivos utilizam a linguagem para se comunicar, e existem diversas maneiras de comunicação entre eles, como gestos, sons, falas, palavras, ondas, posições, entre outras. Contudo, a comunicação somente é efetivada se o código for comum aos envolvidos na interação, isto é, tanto o emissor como o receptor devem utilizar uma linguagem e um código

comum, sendo este último a principal fonte de ligação entre duas interfaces. Jakobson (2003, p. 23) destaca que a linguagem comum é a principal conexão entre dois agentes distintos, pois, “[...] como sabemos muito bem, uma das tarefas essenciais da linguagem é vencer o espaço, abolir a distância, criar uma continuidade espacial, encontrar e estabelecer uma linguagem comum ‘através das ondas’” (JAKOBSON, 2003, p. 23 grifo do autor).

O espaço entre o entendimento do fenômeno físico e o próprio pensamento físico só é interligado através da linguagem matemática. Em termos gerais, não é possível estabelecer conclusões satisfatórias sobre os fenômenos físicos a não ser por meio da Matemática. Para Pietrocola (2002), “a Matemática seria um meio de acesso entre ambos [pensamento físico e fenômeno], indicando uma tradução. Assim, o extrato parece se alinhar com uma posição galileana, onde a língua ‘natural’ da natureza seria a Matemática e não outra” (PIETROCOLA, 2002, p. 94, grifo do autor).

Considerando a Matemática como uma linguagem, sua evolução significa também a evolução de quem a utiliza. Então, como a Física se apropriou de muitos dos avanços matemáticos, ela também evoluiu. Karam (2008, p. 10) contribui para essa ideia quando diz que:

Assim, quando o matemático puro persegue um objetivo puramente estético e se esforça para aprimorar essa linguagem, mesmo que não esteja imediatamente preocupado com aplicações, está contribuindo para criar uma língua mais apta a satisfazer o físico (KARAM, 2008, p. 10).

Pietrocola (2002) diz que, independentemente do campo em que se baseia a investigação, seja “imaginação ou realidade, a linguagem deve ser entendida como a forma que temos de estruturar nosso pensamento” (PIETROCOLA, 2002, p. 101). É por este motivo que a Matemática pode ser interpretada como uma linguagem estruturante do pensamento físico.

Jakobson (2003, p. 17) diz que “a linguagem é de fato o próprio fundamento da cultura”, logo, a Física carrega intrinsecamente um corpo matemático, de forma que todo o conhecimento físico, atualmente, é sempre iniciado de uma perspectiva matemática, ou, pelo menos, acaba nela. Quaisquer modelos físicos que não recorrem a uma estruturação matemática são descartados. Isto corrobora a afirmação de que a Matemática se tornou cultura na Física. Em tese, podemos dizer que a Física se vale da Matemática como forma de expressão e estado.

Quando modelamos algum fenômeno físico em termos de equações e funções, dizemos que este carrega consigo informações importantes acerca do fenômeno, pois as variáveis descritas em formas de códigos irão nos dizer com especificidades como se dá aquele evento. Mas, como vimos, todos estes códigos provêm da linguagem matemática, e, neste sentido, dizemos que “em relação à linguagem, todos os outros sistemas de símbolos são

acessórios ou derivados. O instrumento principal da comunicação informativa é a linguagem” (JAKOBSON, 2003, p. 17). Ou seja, o modelo matemático vai ser aquele que irá possibilitar extrair informações cruciais para se entender o fenômeno.

Vejam agora a capacidade de tradução da linguagem matemática a partir do conceito de força. No senso comum, entendemos força no sentido de empurrar, carregar ou exercer ação sobre algo. No contexto físico, uma força é uma ação que provoca a mudança de estado de um determinado corpo de repouso para colocá-lo em movimento, para mudar a direção do movimento, para aumentar as taxas de movimento ou para pará-lo. Tomando como exemplo a segunda lei de Newton, temos: “a mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida” (NEWTON, 2016, p. 54). Podemos perceber que, para o contexto do fenômeno, esta definição parece não abranger o suficiente para se ter uma noção sobre como a força atua em um corpo. Entretanto, a partir de sua expressão matemática, considerando qualquer direção do espaço ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), conseguimos extrair mais informações sobre a ação, a partir da segunda lei de Newton:

Equação 1: Cálculo da Força

$$F = dp/dt$$

Na equação acima, “ $F$ ” representa a força; “ $dp$ ”, a taxa de variação infinitesimal do momento linear, elemento associado à massa e à variação de velocidade de um corpo; e “ $dt$ ”, a taxa de variação infinitesimal de tempo (nos livros do Ensino Médio, é comum a relação  $F = m.a$ , onde “ $F$ ” representa a força; “ $m$ ”, a massa; e “ $a$ ”, a aceleração). Em resumo, a equação nos diz que uma variação do momento linear de um corpo, em relação a um certo intervalo de tempo, provoca alterações que chamamos de força. Em outra perspectiva, a ação de uma força provoca alterações do momento linear do corpo, ou seja, de seu estado. A análise pode ser mais completa quando analisamos do ponto de vista vetorial, uma vez que força e velocidade são grandezas vetoriais. Quanto mais códigos matemáticos são utilizados para se aproximar do fenômeno, mais próximo podemos chegar da realidade. Portanto, o uso de: vetores, tensores, inequações, equações, funções, estatística, probabilidades, coordenadas, entre outros, nos possibilita matematizar dado fenômeno e assim desenvolver uma descrição muito mais próxima da realidade deste. Acerca desta capacidade da linguagem matemática, Pietrocola (2002, p. 96) destaca que:

Dentro deste contexto, a importância da Matemática residiria na sua capacidade de descrição sintética, pela exatidão na apresentação dos resultados da investigação e pela possibilidade de comunicação universal sobre algo que se crê existir na própria realidade e pela precisão garantida pela sua estrutura lógico-formal. Estas funções lhe

conferiram um papel muito importante no contexto das ciências experimentais, como ferramenta do método científico (PIETROCOLA, 2002, p. 96).

O que permite a validade da expressão acima são os resultados experimentais e suas predições, ou seja, quanto mais corresponde aos dados empíricos, mais próxima é a tradução do elemento matemático acerca da realidade. A expressão sintetiza o enunciado filosófico, prediz como será o comportamento e é validada pela própria experiência. O contrário também pode ser válido: da experiência para a expressão matemática. De qualquer forma, o ciclo se retroalimenta.

Uma evidência de que a estruturação matemática nos concede a capacidade de descrever a natureza, até mesmo antes de sequer observarmos ou realizarmos uma experimentação, é a descoberta dos neutrinos. A partícula, primeiro, foi deduzida a partir de uma relação matemática, para, depois, ser descoberta experimentalmente. Paty (1995) faz a abordagem da descoberta desta partícula da seguinte maneira:

[...] essa partícula, tão importante para nossas concepções atuais sobre a estrutura da matéria e a organização do mundo, e tão real, era ignorada antes de 1930, e só teve, durante mais de vinte anos, a condição de uma simples hipótese matemática. [...] A observação da absorção dos neutrinos só ocorreu em 1953, ou seja, vinte e três anos depois da formulação dessa “partícula matemática”, graças à possibilidade de se obterem fluxos intensos dela e de se dispor de um absorvedor suficientemente volumoso [...] isso ilustra o poder da matemática, que parece, assim, mais do que a simples linguagem da física, pois serve à própria construção da física, e sem ela a explicação do conteúdo da hipótese não seria possível (PATY, 1995, p. 243, 246, grifo do autor).

Porém, há limitações; assim, não podemos generalizar e concluir que precisamos apenas da estruturação matemática para entender os eventos, haja vista que ela, ao ser desprovida de um pensamento físico e de todo um arcabouço estrutural, é inútil para se compreender a natureza e chegar a modelos que descrevem a realidade. Ou seja, a estruturação matemática somente tem êxito se acompanhada de uma linguagem física; a Matemática é a linguagem da Física, mas não a própria Física.

Paty adverte para o fato da supervalorização da estrutura matemática, dizendo que somente o raciocínio lógico-dedutivo não traz informações e conceitos físicos, pois:

Pensar que, no raciocínio intermediário de tipo matemático, cada termo, cada relação tenha necessariamente uma transcrição física, significaria colocar em princípio que as entidades matemáticas são mais reais que a própria realidade física - o que nos levaria a uma ontologia pitagórica - e considerar que a lógica tem, por si mesma, esse poder de engendrar novas propriedades dos objetos físicos. Ao contrário, como Einstein percebera com muita propriedade, “por si só, o pensamento lógico não pode nos fornecer conhecimento sobre o mundo da experiência: tudo o que conhecemos da realidade vem da experiência e nela resulta. Proposições puramente lógicas são completamente vazias em relação à realidade” (PATY, 1995, p. 255, grifo do autor).

## 2. METODOLOGIA

O contexto deste trabalho abrange as relações entre Física e Matemática, a partir de materiais da literatura sobre a evolução das ideias da Física e sobre História da Ciência. Ao debruçarmos sobre dados textuais, tentamos dar enfoque aos detalhes do processo de transformação do conhecimento físico através da Matemática, captando as principais ideias e obras, bem como localizar os principais fatores que propiciaram tal transformação.

A capacidade de argumentação e de investigação é mais efetiva em uma abordagem qualitativa. Bogdan e Biklen (1982, *apud* LÜDKE; ANDRÉ, 1986) conceituam cinco características deste tipo de pesquisa:

- A pesquisa qualitativa tem o ambiente natural como sua fonte direta de dados e o pesquisador com principal instrumento;
- Os dados coletados são predominantemente descritivos;
- O foco no processo é muito maior que no produto;
- Há cuidado do pesquisador em encontrar as perspectivas do objeto de estudo;
- A análise dos dados tende a seguir um processo indutivo.

Ademais, a abordagem qualitativa traz muitas vantagens quando o foco é uma pesquisa textual de cunho histórico, como apresentado acima. O foco no processo é maior, o que faz com que os resultados desta pesquisa venham a ser mais satisfatórios do que em uma abordagem quantitativa.

Dado o objeto deste estudo, a efetividade de um arcabouço de fatos e a descrição de pensamentos acerca dos contextos nos levaram a escolher a pesquisa bibliográfica como principal ferramenta de investigação, tendo em vista a obtenção de dados históricos<sup>3</sup> de obras que analisaram a relação entre a Física e a Matemática, ou seja, não nos debruçamos sobre fontes primárias, apenas secundárias.

O mapeamento das ideias e toda a construção desta relação complexa requerem fontes ricas para serem apoio central de discussões e análise. Para Severino (2014, p. 106), os textos tornam-se fontes dos temas a serem pesquisados. O pesquisador trabalha a partir das contribuições dos autores dos estudos analíticos constantes nos textos.

O arranjo deste trabalho se dá na fragmentação dos períodos acerca do pensamento sobre a Natureza, compilando referências bibliográficas que permitem interpretações da

---

<sup>3</sup> A pesquisa bibliográfica também é indispensável nos estudos históricos. Em muitas situações, não há outra maneira de conhecer os fatos passados senão com base em dados bibliográficos (GIL, 2002, p. 45)

concepção do pensamento estabelecido em determinado intervalo, e estas interpretações são decorrentes dos discursos e análises dos autores aqui referenciados.

Pretendemos, com este arranjo, extrair dados que nos permitam conjecturar ideias referentes à posição da Matemática na Física em função do tempo, limitando a abrangência das referidas descrições feitas pelos autores, na qual as análises e argumentações retiradas dos dados bibliográficos serão tomadas para melhor compreensão do texto. Sendo assim, a análise de dados se enquadrará em um compartimento textual (MORAES; GALIAZZI, 2006, p. 118).

Toda essa incursão histórica, mediante obras de autores que discutiram a transformação no conhecimento físico e, sobretudo, obras dos próprios filósofos e cientistas que contribuíram para o desenvolvimento da Física, foi o grande pilar desta pesquisa. Assim, a estruturação deste trabalho se deu conforme a sequência descrita abaixo.

Em primeira instância, buscamos na literatura materiais textuais que se enquadravam na temática que estávamos procurando. Realizamos buscas na Biblioteca da instituição (plataforma *Pergamum*) e no *Google Acadêmico*<sup>4</sup>, e selecionamos os seguintes materiais, que serviram de leitura para análise: o livro “A Ciência através dos tempos”, de Áttico Chassot, lançado em 1994; o artigo “História da matematização da natureza”, de Milton Vargas, publicado em 1996; o livro “Evolução das Ideias da Física”, de Antônio S. T. Pires, apresentado em 2008; o livro “Origens e Evolução das Ideias da Física”, organizado por José Fernando Rocha, lançado em 2011.

De posse do material, procuramos abordar, em sequência cronológica, o desenvolvimento acerca do pensamento sobre a natureza, desde a antiguidade até a contemporaneidade. Aqui, procuramos traçar linhas que evidenciem os fatores que culminaram na matematização da Física e da natureza, além do fato de poder elencar e definir os ramos de pensamento e toda a evolução das ideias da Física.

O agrupamento entre uma análise histórica e uma análise epistemológica é importante para o entendimento desta pesquisa, visto que todo o desenvolvimento epistemológico é necessariamente histórico, mas o inverso não é verdade. Nisto, para se apontar transformações no pensamento físico por meio da Matemática, é preciso localizar nos materiais indícios de uma nova concepção, tanto na teoria acerca de fenômenos físicos quanto do avanço da linguagem matemática. Para tanto, a fundamentação teórica buscou estabelecer o que podemos caracterizar como linguagem, sua função, seus fundamentos e a ideia de tradução,

---

<sup>4</sup> Portal da *Google* que faz pesquisas apenas em sítios que contêm dados acadêmicos, como periódicos indexados, universidades, institutos de pesquisa, entre outros.

para aferir a concepção de novos códigos de linguagem matemática, o que ficará evidenciado ao longo desta pesquisa.

A descrição dos eventos históricos é limitada, devido ao intervalo de tempo analisado e aos próprios materiais analisados. Não é proposta deste trabalho apontar todos os pontos em que pode ter havido uma transformação na Física, o que seria improvável dada a natureza desta investigação. Porém, buscou-se o esforço descritivo e analítico em captar elementos que constituíram um avanço na linguagem matemática e produziram efeitos na construção de teorias físicas, apontando a adaptabilidade da linguagem matemática para poder compreender fenômenos físicos complexos.

A ideia desta obra foi interligar evidências e fatos à luz de textos que sabemos que são limitados, de forma que a nos permitir inferir acerca do uso da Matemática como linguagem estruturante da Física.

### 3. O PENSAMENTO SOBRE A NATUREZA

#### 3.1 Na Antiguidade

Em cada momento ao longo da História, houve uma maneira de pensar a respeito da Natureza. O que entendemos por Física atualmente demorou considerável tempo para ser introduzido e estabelecido. O entendimento da Natureza, na Antiguidade, oscilava entre pensamentos baseados em uma realidade perfeita, bela e verdadeira, e também a Natureza sendo pensada numa corrente cuja forma de entender é por meio de uma teoria de Deus (VARGAS, 1996, p. 249).

Os filósofos gregos jônicos pensavam que a natureza podia ser explicada através de um único elemento que é a causa de todos os outros, o *arché*. Esses filósofos tinham uma concepção materialista da Natureza carente de evidências concretas. As explicações eram sistematizadas de forma lógica, sem a empiricidade. Pires (2008, p. 14) expressa que os filósofos jônicos foram os primeiros a procurar entender a natureza sem recorrer a uma explicação baseada em deuses.

Para Tales de Mileto (640-548 a. C.), o *arché*, isto é, o elemento fundamental, era a água. Tales criou um método para calcular a distância do barco à costa por meio da Geometria. Seu sucessor, Anaximandro, sugeriu que o elemento fundamental era o *apeiron*, substância indeterminada e ilimitada. Anaxímenes, sucessor de Anaximandro, disse que o elemento básico era o ar (*pneuma apeiron*). Evidentemente, nosso objetivo não é descrever as obras de todos os filósofos, mas captar as diferentes eras de pensamento acerca da natureza. Vemos que os filósofos jônicos abandonam a ideia de uma *teociência*, onde o pensamento sobre as coisas está alicerçado na ideia de Deus que havia criado tudo, para um materialismo que tenta explicar as causas do universo de forma natural. Os filósofos jônicos usavam a Geometria a fim de fazer algumas medidas sobre situações simples, porém sem se preocuparem em comprovar teorias por meio de experimentos.

Os pitagóricos continuam a ideia dos filósofos jônicos; porém, assumem que a *arché* era o número, isto é, a interpretação da natureza se dava em figuras geométricas perfeitas e números inteiros. Eles não tomavam o número como componente de uma linguagem matemática, mas como um símbolo de perfeição, a exemplo de uma crença, assim como pontua Pires (2008, p. 17): “os pitagóricos estavam em busca de conceitos abstratos, como a natureza do ser e o sentido de verdade”. Chassot (1994) diz que Pitágoras foi um verdadeiro reformador religioso, uma vez que acreditava que o mundo era regido por uma harmonia numérica. Nisto

podemos perceber que a concepção pitagórica tratava a Matemática como se fosse uma divindade, e não como se fosse uma Ciência. Essa visão indicava que todas as coisas podiam ser explicadas em termos numéricos, sendo que o fundamento de qualquer coisa era sua forma matemática.

No entanto, no pitagorismo, surgiu uma concepção que podemos chamar de matematização, pois, segundo Pires (2008, p. 19), a concepção do mundo como construção geométrica, uma ideia fundamental no desenvolvimento da ciência física, foi formulada pela primeira vez pelos pitagóricos. Este é um marco importante para a História da Ciência, pois é a primeira proposição de matematização da Natureza, ainda que em forma de crença.

A Filosofia Grega Clássica, principalmente com Sócrates, Platão e Aristóteles, teve grande influência no pensamento sobre a Natureza. Sócrates (470-399 a. C.), na arte da Dialética<sup>5</sup>, propunha um modo de refletir e pensar acerca do conhecimento, demonstrando que toda argumentação e sistematização feitas por um ser podem vir a sofrer reformulação e serem transformadas por meio de indagações. Ele, entretanto, não propôs nenhum pensamento acerca de fenômenos naturais e físicos, mas contribuiu na arte de questionar métodos e conhecimentos, o que, no método científico de hoje, é muito utilizado.

Platão (428-348 a. C.), que foi discípulo de Sócrates, aprimorou a Dialética e trouxe consigo as ideias pitagóricas de perfeição, introduzindo o mundo das ideias, que englobava as formas geométricas que eram formadas pelo pensamento matemático (*a dianoia*), e as demais ideias de beleza, justiça e benignidade estruturadas pelo ato dialético (*noética*). Vargas (1996) diz:

Para Platão, o mundo das ideias, das coisas pensadas era o do real (bom, belo e verdadeiro). Nesse mundo, existiam, de um lado, as ideias das formas geométricas, inteligíveis pelo pensamento matemático (*a dianoia*); e do outro, as ideias das demais coisas, inclusive os ideais como: beleza, justiça e bondade, abarcáveis pelo pensamento dialético (*noética*). Em suma, a realidade última eram as ideias (VARGAS, 1996, p. 251).

O método experimental estava fora do rol de pensamento de Platão, pois as ideias poderiam ser organizadas em formas lógicas, sem a necessidade de recorrer a ações empíricas. Segundo Chassot (1994, p. 41), “a ciência de Platão condenou a experimentação como algo ruim com uma arte mecânica ímpia. Admirava muito a matemática por ser uma ciência dedutiva, tendo formulado ideias sobre números negativos e o método das variações” (CHASSOT, 1994, p. 41). No *Timeo* de Platão, há um pensamento matemático sobre os

---

<sup>5</sup> Dialética é o aspecto de conjugação para descobrir as antíteses do pensamento, em que a frase comumente utilizada por Sócrates era “só sei que nada sei”.

fenômenos; no entanto, era uma forma de vislumbrar os desdobramentos matemáticos. Em suas obras, Platão explicita a potencialidade de a Matemática ser a linguagem da Natureza. Contudo, era muito distante de uma matematização em si, apenas como algo subjetivo de uma realidade perfeita através da matemática pitagórica.

Aristóteles (384-332 a. C.), que foi discípulo de Platão, certamente foi o filósofo grego que mais se aproximou do que hoje chamamos de Ciência, visto que a explicação acerca dos fenômenos naturais se dava de forma lógica e organizada, ou seja, a teoria era totalmente estruturada em suas hipóteses e conclusões. Porém, em toda esta sistematização, a Matemática estava ausente. Em seu primeiro livro, Aristóteles investiga os elementos intrínsecos, que chama de matéria e forma, afirmando que não é possível conhecermos um elemento até que possamos compreender suas condições, ou causas primárias. No segundo livro, ele afirma que a Natureza é uma causa que se move com fundamento. Para Aristóteles, há uma diferença entre a Física e a Matemática, conforme abordado por Pires (2008, p. 37):

A explicação física, segundo ele [Aristóteles], consiste usualmente em estabelecer a “causa final” ou a necessidade de um processo. Ele faz distinção entre a Matemática e a Física. Para ele, a Matemática é o instrumento científico utilizado para examinar o mundo do ponto de vista de quantidade, mas ela por si só não nos fornece a natureza das coisas, afirma (PIRES, 2008, p. 37, grifo do autor).

Ainda assim, Aristóteles propôs explicações físicas na área da Mecânica. Ele sugeriu que havia três tipos de movimento: o natural, o violento e o voluntário. O primeiro movimento era causado pela busca do lugar natural a que o corpo pertence; o segundo era forçado, isto é, com um movimento antinatural; e o terceiro era provocado por algo, por uma causa intrínseca e interna ao ser. Na física aristotélica, as coisas do mundo estavam organizadas em 59 esferas concêntricas, de forma que quatro delas eram os elementos básicos: terra, água, ar e fogo. Essa composição em quatro elementos básicos também foi defendida por Platão. Para Aristóteles, há um quinto elemento, que é a *quintessência*, que compunha os astros. As quatro esferas compunham o mundo *sublunar*, onde os movimentos aconteciam (natural, violento e voluntário), e as demais esferas formavam o mundo *supralunar* (onde acontecia o evento dos astros: movimento do Sol, da Lua, dos planetas e dos corpos celestes). Aristóteles explicava sobre a queda dos corpos da seguinte forma: há, na natureza, os corpos graves e os corpos leves, de forma que os graves tendem a cair segundo sua gravidade (peso), e os leves, segundo a sua leveza. A terra, por exemplo, é mais grave que a água, e esta, por sua vez, é mais grave que o ar, que é mais grave que o fogo. Dessa forma, o lugar natural da terra é embaixo de todos os outros elementos, e sobre ela está a água; logo, este é o seu lugar natural, e assim por diante. Essa seria a ordem do movimento natural segundo a física aristotélica (PIRES, 2008).

Posteriormente à Filosofia Clássica, surge, com Euclides, uma apresentação matemática diferente daquela usada pelos pitagóricos e outros povos, denominada geometria euclidiana. Em sua obra *Os elementos*, Euclides faz escritos sobre Geometria que mudariam a história do pensamento sobre a Natureza. Baseado em uma sequência de teoremas dedutivos, o argumento seguia linhas axiomáticas, surgindo, assim, a teoria axiomática em termos geométricos (PONCZEK, 2011). Não há como negar que a geometria euclidiana foi um grande passo para o desenvolvimento da Física séculos mais tarde. Dada a forma como o pensamento físico se desenvolveu, podemos dizer que muito da linguagem matemática que conhecemos hoje foi iniciada com a geometria euclidiana.

Arquimedes (287-212 a. C.), diferentemente de Aristóteles, foi influenciado pela visão pitagórica e pela geometria euclidiana. Ele sistematizou estudos no método demonstrativo, em que problemas são inferidos por meio de teoremas axiomáticos dedutíveis. Para Pires (2008, p. 53), “enquanto Aristóteles acreditava que o mundo era constituído de qualidades e formas que não podiam ser expressas em termos matemáticos precisos e quantitativos, Arquimedes fez a união entre a Geometria e objetos físicos”. Neste dado ponto da História, podemos contemplar uma considerável mudança na forma de pensar sobre fenômenos físicos. Euclides retoma fortemente a ideia da geometria aplicada, enquanto Arquimedes faz a junção com objetos físicos. Assim como Vargas (1996, p. 251) diz, Arquimedes foi um dos que deram origem à concepção da Geometria e Aritmética como forma de calcular e descrever fenômenos.

Eratóstenes (276-194 a. C.), também aos passos de Arquimedes, aplica conceitos geométricos euclidianos para medir a circunferência e o raio da Terra, além das distâncias e volumes do Sol e da Lua (VARGAS, 1996). Podemos perceber o quanto a geometria euclidiana foi inicializadora de uma nova percepção da natureza. As obras de Arquimedes e Eratóstenes, bem como a de Ptolomeu, são confirmações desta argumentação.

Cláudio Ptolomeu (100-170 d. C.), no fim do período helenístico, seguindo a mesma lógica dos anteriores, em sua obra, *Síntese Matemática*, utilizou, de forma demasiada, a Matemática para entender o trajeto de movimento dos corpos celestes. Na física aristotélica, os corpos celestes eram perfeitamente esféricos e descreviam órbitas em circunferência perfeita, pois, para Aristóteles, o círculo era a figura geométrica perfeita da trajetória dos astros, bem como a esfera era a representação perfeita destes corpos. Dessa forma, os pensadores gregos adotavam a ideia de representação do movimento dos astros como círculos perfeitos. Contudo, Ptolomeu encontrou problemas para representar fielmente a trajetória dos astros no céu através de seu modelo, por não serem perfeitamente circulares, o que o levou a criar artifícios

matemáticos, como os epiciclos, os deferentes e os equantes (VARGAS, 1996). Os filósofos rejeitavam a ideia de que sua teoria estivesse errada, pois havia séculos que a teoria Aristotélica era assertiva em várias áreas de conhecimento; então, tentaram ajustar as explicações com os fenômenos observados.

### 3.2 Na Idade Média

Esta época é tomada por muitos por Idade das Trevas, Noite de Mil Anos, entre outras conotações. De fato, as investigações e estudos sobre a Natureza decaíram, mas não podemos concluir, por este motivo, que este período foi irrelevante no desenvolvimento do pensamento acerca da Natureza (CHASSOT, 1994, p. 67).

Agostinho, ou Santo Agostinho, foi talvez o mais notável filósofo cristão do século III, influenciado pela visão neoplatônica, cujo principal fundador foi Plotino. Adotou, em seu discurso, o desinteresse pelo pensamento sobre a natureza - uma importante característica do neoplatonismo. As indagações e dúvidas acerca do mundo ao redor perderam força com a chegada do neoplatonismo, e se estabeleceu a ideia de que o único conhecimento para entender o mundo era o conhecimento de Deus e da alma (PIRES, 2008, p. 60). Esse tipo de pensamento se encaixou perfeitamente com a ascensão do cristianismo como religião dominante.

Um fato importante ocorrido na Idade Média, segundo Vargas (1996, p. 253), foi realizado pelos árabes e hindus. Com o crescimento dessas duas culturas e devido à ligação que elas mantinham com a Europa, permitiu-se que esses povos tivessem acesso a manuscritos gregos preservados das bibliotecas helênicas, que foram destruídas, como a Biblioteca de Alexandria, por exemplo. Por meio dessas conexões, árabes e hindus se apropriaram de obras como as de Arquimedes, Euclides, Ptolomeu e outros pensadores. Esses materiais influenciaram os pensadores europeus, especialmente a partir do século IX, por meio da tradução desses tratados.

Os árabes estudaram e aprimoraram as obras de Euclides, que foram traduzidas por Adelard de Bath, em 1142. Poucos anos mais tarde, em 1175, traduziram a *Síntese Matemática*, de Ptolomeu, para o árabe, que foi chamada de *Almagesto*. Foi com tais esforços que os árabes desenvolveram, de forma considerável, a Álgebra e a Trigonometria. Essas linguagens matemáticas ajudaram a mudar os rumos do conhecimento, o que, mais tarde, ficou conhecido como “Ciência” (CHASSOT, 1994, p. 70).

No século VI, em Alexandria, John Philoponus criticou a teoria mecânica de Aristóteles acerca da dinâmica de movimento de um projétil, pois, de acordo com a teoria, os

corpos graves caíam com velocidade proporcional às suas massas (PIRES, 2008, p. 62). Uma das grandes evoluções no pensamento ocorreu com Sacrobosco (1200-1256), nas obras *Sphaera* e *Algorismus Vulgaris*, que consistiram em estudos sobre Astronomia, utilizando os fundamentos de Euclides e Ptolomeu, reforçados pela Álgebra e Trigonometria árabe. Segundo Vargas (1996, p. 253), essas duas obras são adotadas como a principal teoria astronômica para a época. Por meio da Geometria e da Aritmética grega, e da Álgebra e da Trigonometria árabe, foi possível calcular as tabelas de posições dos astros que foram utilizadas nas navegações ibéricas do século XV (VARGAS, 1996, p. 253).

Em Merton, Heytesbury (1313-1372) definiu que o movimento uniformemente acelerado, em termos da velocidade e do intervalo de tempo, atinge magnitudes proporcionais. Oresme, em 1350, através de arranjos matemáticos desenvolvidos pelos sábios de Merton, mostrou que a distância percorrida por um corpo em movimento retilíneo uniformemente acelerado é igual à distância percorrida por um corpo se movendo com velocidade igual à velocidade média em movimento retilíneo uniforme, utilizando elementos geométricos (PIRES, 2008, p. 71). Os pensadores de Merton foram muito importantes, pois retomaram a utilização de elementos geométricos para representar e explicar fenômenos físicos, como a ideia de velocidade constante e a aceleração constante.

O matemático Georg Peurbach e seu aprendiz, Regiomantanus, foram pioneiros em calcular as posições dos astros, tornando-se referências para sua época. Foi através de seus estudos que as navegações tiveram êxito em suas jornadas ao passarem pela linha do Equador. Os navegantes recorreram aos matemáticos para calcular a declinação do Sol, e, com o uso da trigonometria esférica, formulada por Regiomantanus, obtiveram resultados importantes para a prática das navegações (VARGAS, 1996, p. 254).

A Matemática árabe e hindu, além de ter contribuído para o desenvolvimento da Ciência, por aprofundar a geometria euclidiana, ainda desenvolveu novas áreas - isso sem contar a contribuição com a escrita dos números.

### **3.3 Na Modernidade**

Com a visão aristotélica e o modelo de Ptolomeu sendo as principais bases do pensamento sobre a Natureza durante muitos séculos, surge, por volta do século XV, o astrônomo e matemático Nicolau Copérnico. Após anos de estudo e conhecimento do *Almagesto*, ele desejava remover a concepção do equante e do excêntrico do modelo de Ptolomeu. Para isso, desenvolveu estudos lógicos seguindo a forma do método euclidiano, uma

vez que seus escritos eram teoremas axiomáticos dedutíveis uns dos outros. Copérnico percebeu que os cálculos das distâncias e das órbitas dos planetas ficariam mais simples se o Sol fosse tido como o centro do universo, e não a Terra<sup>6</sup>. O problema é que ele teria que explicar, de forma convincente, o movimento orbital terrestre. Além disso, ao invés de reduzir, o seu modelo matemático aumentou o número de círculos em relação ao modelo de Ptolomeu. Também teve que fazer vários ajustes, muitos deles errôneos, no que tange a descrever a mecânica dos astros celestes. Pires (2008, p. 93) diz que

Copérnico não poderia ter feito melhor usando as observações astronômicas que tinha à sua disposição. Elas continham erros demais. Alguns dados eram imprecisos, outros, originalmente precisos, foram transcritos numa forma adulterada por escribas e tradutores. Para a Astronomia avançar, se fazia necessário observações novas e confiáveis (PIRES, 2008, p. 93).

Porém, a relevância do trabalho de Copérnico está no fato de ter seguido o rigor matemático euclidiano, assim como no *Almagesto*, realizando a primeira sistematização e desenvolvimento teórico que estruturaram a universalização das teorias físicas. Ele considerou, no seu âmbito dedutivo, a possibilidade de generalizar os fenômenos. Vargas (1996) diz que o heliocentrismo de copérnico causou uma nova estrutura epistêmica na Física, pois,

De fato, o que resultou do heliocentrismo de interesse para a análise da matematização da natureza foi a abolição de qualquer diferença entre o mundo das perfeições celestes e o mundo sub-lunar da corruptibilidade habitado pelos homens. De então em diante admitiu-se, como um princípio dominante das ciências, que as leis humanas são válidas para todo o universo. Uma equação matemática deduzida teoricamente aqui na Terra, e tendo sua verdade sido estabelecida por experiências levadas a efeito pelos homens, vale em qualquer parte do universo por remota que seja. Essa é uma das diferenças fundamentais entre a ciência aristotélica e a moderna, estabelecida após Copérnico (VARGAS, 1996, p. 254).

Ainda que a obra de Copérnico tenha sido apresentada como uma descrição mais facilitada do movimento dos astros celestes, ela provocou uma destabilização no modo de pensar aristotélico/ptolomaico sobre a Natureza, gerando implicações para as bases filosóficas da Igreja. Talvez, por este motivo, o desenvolvimento dessas ideias foi tão perseguido e combatido.

O problema na descrição dos fenômenos astronômicos foi enfrentado por Johannes Kepler por meio dos dados mais precisos obtidos por Tycho Brahe. Kepler desenvolveu estudos geométricos a fim de descrever os fenômenos observados e registrados por Brahe. Analisando o movimento de Marte e percebendo que o movimento circular era incapaz de descrever como

---

<sup>6</sup> Teoria conhecida como heliocentrismo ou modelo heliocêntrico. Esse modelo já havia sido proposto há séculos atrás, com Aristarco de Samos, por exemplo. Porém, por questões históricas, políticas e sociais essa ideia não foi levada adiante.

ele se movimenta em relação ao Sol, Kepler então chega à conclusão de que todos os planetas descrevem órbitas elípticas em torno deste astro. Essa constatação numérica dismantelaria todas as sistematizações que foram feitas baseadas na ideia pitagórica, uma vez que, para os gregos, o círculo era o símbolo da perfeição dos astros (PONCZEK, 2011, p. 59). As três leis de Kepler<sup>7</sup> aconteceram de forma fortuita, de modo que a Matemática foi fundamental para o conhecimento delas. Ainda que não tivesse esse objetivo, Kepler modelou o período de revolução dos planetas em relação à distância destes com o Sol. Ele conseguiu generalizar a teoria para todos os planetas por meio de um único modelo matemático, ou seja, a terceira lei proposta por Kepler, na qual  $T^2 \propto r^3$  (onde T é o período de revolução, e r, a distância do planeta ao Sol). Foi o passo mais próximo da matematização da Física desde Arquimedes, servindo com um elo para o que aconteceria por vir:

A expressão matemática dessas leis, entretanto, não estava no centro dos seus interesses, a não ser a terceira que enumerava a disposição proporcional dos astros girando em torno do rei Sol. Por esse aspecto, creio que se deva compreender Kepler como uma figura periférica do movimento científico renascentista, já em transição para a ciência moderna estabelecida por Galileu no início do século XVII, em termos de um novo conceito tanto no papel das matemáticas quanto do significado da experiência científica (VARGAS, 1996, p. 255).

Galileu Galilei, no século XVII, através de sua obra *Discursos e demonstrações matemáticas em torno de duas novas ciências*, configura um novo marco no pensamento da Natureza. Galileu formulou um método em que, primeiramente, pensa-se sobre o fenômeno, isto é, deve-se observar e obter concepções prévias de um dado evento, para, depois, realizar a estruturação matemática que corresponde ao que foi observado. Aqui, entra um fator importantíssimo: a utilização da Matemática a partir de um pensamento físico subjacente. Por isso, entendemos que Galileu inicia uma forma que será a tônica da Física e também da Ciência, com a ideia de que a Matemática seria a forma de analisar os fenômenos, mediante uma estrutura que busca entender o fenômeno isoladamente, a partir dos resultados experimentais, e concluir se a concepção do fenômeno estava correta ou não. A eliminação de fatores externos que dificultariam a compreensão sobre o fenômeno também é uma ideia de Galileu, ou seja, é nesse dado ponto da História que nasce a Física que conhecemos hoje, ainda que, nesse momento, o processo de matematização estava em seu início (VARGAS, 1996, p. 256).

Karam (2008) diz que um caráter importante da obra de Galileu é a estrutura de argumentação semelhante aos trabalhos de Euclides:

---

<sup>7</sup> A primeira lei de Kepler diz que: Todos os planetas do sistema solar executam trajetórias elípticas tendo o Sol em um dos focos. A segunda lei de Kepler consiste em: A linha que liga o Sol aos planetas varre áreas iguais em tempos iguais. A terceira lei de Kepler: O quadrado dos períodos das órbitas dos planetas é proporcional ao cubo de suas distâncias médias ao Sol.

Outro aspecto importante do caráter matemático da obra de Galileu é a semelhança de sua linha de argumentação com o estilo encontrado em clássicos da matemática como os Elementos de Euclides. Tal modelo consiste em demonstrar proposições a partir de definições e axiomas utilizando uma linguagem geométrica (KARAM, 2008, p. 18).

Vargas (1996, p. 255), por meio dos estudos com plano inclinado, demonstra como Galileu utiliza do pensamento físico em função de sistematizações lógicas que excluem os eventos secundários que não fazem parte do fenômeno principal, permitindo a representação do real por meio do empírico:

É a do plano inclinado, organizada no sentido de eliminar-se ao máximo os efeitos de atrito e resistência do ar, que atuariam como circunstâncias perturbadoras do fenômeno, da forma como conjecturado. Essa experiência, assim idealmente organizada, irá comprovar a verdade ou denunciar a falsidade da conjectura previamente concebida pela mente. Dessa forma, Galileu, simultaneamente confere à matemática a função de análise dos fenômenos naturais e dá à experiência organizada em laboratório de campo o papel de simplesmente responder afirmativa ou negativamente àquilo que foi primeiramente concebido com a mente. (VARGAS, 1996, p. 255).

Apesar de toda a contribuição realizada por Galileu com relação à matematização dos fenômenos físicos, não havia desenvolvimento matemático suficiente para que ele pudesse seguir um caminho mais analítico. Quando Galileu se debruçou sobre a queda dos corpos, tema também abordado por Aristóteles (estudo dos graves), ele recorreu aos escritos dos sábios de Merton para matematizar suas experiências. Como vimos, esses pensadores definiram que o movimento retilíneo uniformemente variado correspondia à velocidade média do movimento uniforme, utilizando representações geométricas (VARGAS, 1996). Este fato nos aponta que o nível de matematização que ocorreu através de Galileu estava longe de ser completo, uma vez que a linguagem matemática ainda não estava desenvolvida o bastante para que ocorresse a criação de modelos matemáticos mais complexos.

Ainda no século XVII, com Isaac Newton, a Física alcançou níveis de matematização mais profundos. Com o desenvolvimento do Cálculo Diferencial e Integral, realizado por Newton e também por Leibniz, juntamente com a geometria cartesiana, a Matemática se desenvolveu muito além do que ocorrera com a geometria euclidiana. Para Descartes, a Geometria Analítica poderia explicar os fenômenos físicos, uma vez que, conhecendo as relações espaciais, poder-se-ia chegar às relações de movimento e aos fenômenos mecânicos. Ponczek (2011, p. 66) aborda a concepção cartesiana de que a Física poderia ser compreendida essencialmente de modelos matemáticos, cujo elemento principal é a Geometria:

Além disso, o sábio francês acreditava que a linguagem da natureza era a Matemática. Isto o levou a relacionar curvas e figuras geométricas com a Álgebra, estabelecendo um novo ramo da Matemática, a Geometria analítica, de fundamental importância

para o desenvolvimento da Física e, em particular, da Mecânica. Orgulhoso, afirmou: Toda a minha Física nada mais é que Geometria (PONCZEK, 2011, p. 66).

Em sua obra, *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Newton desenvolveu teorias baseadas em teoremas axiomáticos, matematizando diversos fenômenos analisados por Galileu, recorrendo à Geometria Analítica e ao Cálculo Diferencial e Integral. Newton conseguiu analisar os fenômenos de maneira espacial, e, com o Cálculo, pôde compreender os conceitos relativos à cinemática mediante os conceitos matemáticos de variabilidade e o cálculo infinitesimal, em que conjecturou suas leis, sendo uma delas a definição de força por meio da mudança do momento “ $\rho$ ” no intervalo de tempo “ $t$ ”:

Equação 2: Definição de Força a partir da variação de Momento Linear

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{\rho}$$

Ademais, Newton sugeriu que os eventos físicos, observados e examinados experimentalmente, correspondem a uma estrutura matemática. Isso nos remete à ideia de que o símbolo da linguagem representa uma situação real, uma vez que enviamos um código que oculta um evento real. Assim, a compreensão dos códigos nos ajuda a compreender a realidade, ou seja, os modelos matemáticos de Newton são a própria descrição de como o fenômeno ocorre. Vargas (1996) discorre sobre a ideia e diz:

Por outro lado, nos princípios matemáticos da filosofia natural, de 1687, Newton mostrou que qualquer fenômeno físico observado empiricamente corresponde exatamente a um modelo matemático deduzido de axiomas pré-estabelecidos como verdadeiros. E ainda mais, que esses axiomas referem-se às noções de espaço, tempo, massa e força, todas elas só compreensíveis matematicamente (VARGAS, 1996, p. 256).

Com o uso da Geometria e com o desenvolvimento do Cálculo, Newton formula a lei dos movimentos dos corpos partindo de teoremas axiomáticos dedutíveis, e assim chega às relações. Isso permitiu a ele calcular a massa dos planetas do Sistema Solar, e, através de seus teoremas no livro *O sistema do mundo*, chegou à terceira lei de Kepler. Newton fez observações dos astros e justificou seus resultados em um método que buscou particularizar cada situação, isto é, ele conseguiu matematizar os fenômenos e estruturar sua lei de gravitação; depois, justificou-os por meio de modelos matemáticos (VARGAS, 1996, p. 256).

Assim como dissemos, Newton elevou o nível de matematização da Física, que fora organizada de forma sistemática por Galileu. Contudo, o formalismo matemático de Newton se pautava na Geometria Analítica e nos primórdios do Cálculo Infinitesimal, estruturas às quais Galileu não teve acesso. Com isso, conseguiu generalizar suas teorias através de uma conjectura de teoremas. Mas foi a partir do século XVIII que a Física assumiu uma estrutura analítica; com

os irmãos Bernoulli, Jacques e Jean, que o Cálculo Infinitesimal se desenvolveu a níveis mais profundos. Partindo da notação de Leibniz, os irmãos, juntamente com o próprio Leibniz, desenvolveram novos modelos matemáticos que conferiram aplicabilidade ao Cálculo Infinitesimal (VARGAS, 1996, p. 256). Em nosso entendimento, aqui é o pontapé da Física altamente matematizada, em que os fenômenos eram interpretados por conceitos puramente matemáticos com símbolos particulares, isto é, os modelos matemáticos eram construídos justamente para a análise particular de um fenômeno. Jacques Bernoulli desenvolveu o cálculo de probabilidades, e Leonard Euler, em sua obra *introduction in analisis infinitorum*, introduziu o conceito de função, que é um conceito matemático imprescindível para a Física que conhecemos hoje. Com todo este desenvolvimento, foi possível a introdução de uma física analítica, na qual, cada vez mais, sua linguagem matemática se tornava extensa e complexa.

Houve uma grande transformação no pensamento físico quando Diderot e D'Alembert vislumbraram a unificação de diferentes conceitos matemáticos referentes à Mecânica, na obra *Dictionaire raisoné des sciences, des arts et des métiers*. Neste material, as ideias físicas são baseadas na empiricidade e na convicção de que a Matemática deve ser a estrutura dos conceitos físicos. Nisto, a mecânica newtoniana, os cálculos e suas aplicações foram unificados, fazendo com que a Mecânica alcançasse um padrão analítico que nenhuma ciência havia então alcançado. Ponczek (2011) fala sobre o princípio de D'Alembert e pontua o marco causado por tal concepção:

O princípio de D'Alembert é assim de fundamental importância para a História da Mecânica, unificando a Estática e a Dinâmica, antes consideradas “ciências” diferentes. A Mecânica ganha, assim, uma coesão teórica que a alça à condição de uma ciência praticamente independente do restante da Física, condição essa que prevalecerá durante todo o século XVIII (PONCZEK, 2011, p. 85, grifo do autor).

O estabelecimento da análise matemática é alcançado por meio de Lagrange, Laplace e Legendre, com a invenção de vários sistemas que visavam à unificação do fenômeno. Há a introdução de conceitos matemáticos que permitiam análises em torno de informações do fenômeno particular, como incerteza, fenômenos de duplos eventos e probabilidade. Este arcabouço matemático propiciou o desenvolvimento da Mecânica Analítica. Lagrange, em seu livro *Mécanique analytique*, demonstra que os teoremas de Newton poderiam ser analisados e descritos em forma de Equações Diferenciais, que conseguiriam desvelar todos os fenômenos mecânicos, onde todo o processo se desenvolvia por meio da integração das equações. Abaixo, demonstramos esta evolução do conceito de força através das técnicas matemáticas de equações diferenciais:

Equação 3: Cálculo da Força a partir de equações diferenciais

$$m \frac{d^2x}{dt^2}, m \frac{d^2y}{dt^2}, m \frac{d^2z}{dt^2}$$

A Mecânica Analítica teve como pressuposto matematizar os fenômenos naturais e aprofundar as leis de Newton de forma a solucionar problemas de gravitação e os demais problemas da Física Clássica (VARGAS, 1996, p. 258).

Laplace elevou a mecânica newtoniana a seu limite ao propor modelos altamente matematizados, de tal forma que conseguiu obter informações de órbitas dos planetas e do Sistema Solar. A introdução de novos conceitos por meio de equações diferenciais, como perturbação, permitiu obter resultados nunca antes alcançados. Aqui, a Física passou a focar na solução de problemas particulares, que requerem uma linguagem matemática complexa para serem generalizados. Laplace seguiu a ideia de unificação na qual o Cálculo, na sua forma diferencial, possibilita a junção de várias representações de um fenômeno em um só teorema matemático (ROCHA, 2011, p. 91). Veremos que outros ramos da Física, como os conceitos de probabilidades da Termodinâmica, da dinâmica do Eletromagnetismo e da Física Quântica, adotam a mesma perspectiva.

A corrente que ficou conhecida como Determinismo, em que todo acontecimento precede uma causa, teve na Física um campo fértil. Uma vez que eram conhecidas as causas de um fenômeno, era possível descrevê-lo, e foi isso que Laplace fez, por meio do livro *A teoria analítica das probabilidades*, pois, com o intuito de matematizar fenômenos que ocorriam de maneira caótica e aleatória, foi possível estimar a probabilidade de tal evento ocorrer.

Com esses desenvolvimentos históricos, vemos a Mecânica se tornar uma área completamente matematizada, servindo de modelo para todos os outros ramos da Física, devido ao seu sucesso de predição dos eventos. Com Lagrange e Laplace, a Física tomou novos rumos, cujo objetivo era matematizar todos os fenômenos da Natureza. Vargas (1996) discorre sobre essa transformação:

Com as obras de Lagrange e Laplace, a mecânica analítica tornou-se a mais importante das ciências, garantindo a matematização de toda a física. Sob o ponto de vista da doutrina materialista mecanicista, era uma questão de tempo que toda a natureza – pelo menos a inanimada – viria a ser matematizada a partir das equações de Lagrange e de Laplace (VARGAS, 1996, p. 258).

Nessa mesma época, surge o intento de manipular máquinas térmicas, iniciando, assim, a matematização da Termodinâmica, que, segundo Vargas (1996), teve uma dupla origem: a primeira nasce da visão positivista, que consistia no uso de Equações Diferenciais para se medir a taxa de fluxo de energia, e a segunda, com todo o escopo do segmento

positivista, que residia na ideia de que os resultados encontrados por meio das Equações Diferenciais provindas de diversas observações representariam soluções particulares. Fourier segue esta concepção e trata o Calor de forma analítica, tendo em mãos todo o arsenal que nascera com a Mecânica Analítica. Conceitos de função e variabilidade foram o que possibilitaram essa linha de análise termodinâmica.

Outra ala do estudo da Termodinâmica foram as pesquisas tecnológicas de Sadi Carnot, cujo objetivo era a eficiência de máquinas térmicas no desenvolvimento da indústria. Dos estudos de Carnot, surgiram bases de estudos que desenvolveram a Termodinâmica. Clapeyron desenvolveu os estudos de Carnot, e Clausius fez o trabalho de aprofundá-los ainda mais, baseado no princípio de conservação de energia e na segunda lei da Termodinâmica, em que se enuncia o processo de irreversibilidade, no qual é impossível que uma máquina térmica converta integralmente a quantidade de Calor recebida em Trabalho, e que essa energia não poderia ser recuperada. Esse processo está interligado ao processo de transmissão de energia do sistema à sua vizinha, fundamentando o conceito de Entropia, por meio de uma análise gráfica da função de Calor e Temperatura (VARGAS, 1996, p. 259).

Com isso, a estruturação matemática da Termodinâmica estava estabelecida. No entanto, havia conceitos termodinâmicos ainda não elucidados, como os de Calor, Dilatação, Entalpia e comportamento no estado molecular dos corpos. Estes problemas eram um incômodo para os cientistas da época. Então, surgiu a Mecânica Estatística, cuja proposta era solucionar os fenômenos termodinâmicos a partir do ponto de vista estatístico e da probabilidade, uma vez que os modelos matemáticos anteriores não conseguiam obter relações que descrevem o evento probabilístico do comportamento dos gases (VARGAS, 1996). Aqui, localizamos mais um impasse no pensamento físico: a matematização ainda não estava completa, de modo a trabalhar com níveis moleculares. Sendo assim, o desenvolvimento da Mecânica Estatística foi um marco para toda a Física, pois foi por meio dela que nasceu a concepção de que fenômenos microscópicos apresentam comportamentos diferentes dos fenômenos macroscópicos, ainda que o primeiro seja uma pequena parte do segundo (ROCHA, 2011, p. 119).

Seguindo a linha analítica, Fourier definiu o Calor como um fluido que poderia ser calculado por meio da diferenciabilidade, aplicando as equações de cálculos infinitesimais para encontrar como ocorre o processo de troca de energia. Em contrapartida, Carnot se distanciou da Matemática para analisar a validade do conceito de calórico<sup>8</sup>. Naquela época, já havia a

---

<sup>8</sup> Carnot achava estranho que um canhão, ao ser perfurado com uma broca, produzia energia térmica continuamente, independentemente de sua massa. Pela teoria do calórico, a quantidade de Calor emanada de um corpo era determinada pela capacidade do corpo em armazenar o calórico.

noção de que o Calor fosse transportado por meio das moléculas de corpos, e foi assim que Clapeyron e Clausius tentaram definir esse princípio físico. Quanto à determinação das velocidades das moléculas em relação à Temperatura e aos efeitos de Pressão, Daniel Bernoulli, em sua *Teoria cinética dos gases*, percebeu que a velocidade das moléculas de gás contidas no interior de um recipiente não era constante, pois se moviam de forma caótica. Além disso, a colisão com as paredes do recipiente resultava na intensidade da Pressão. A partir daí, pode-se deduzir que o Calor resultava da Energia Cinética das moléculas que colidiam com o recipiente em que estavam inseridas. Também se chegou à conclusão de que, para compreender os níveis de energia e os graus de liberdade das moléculas, a Matemática apropriada era o Cálculo Variacional, cujas equações e funções tinham em sua base Estatística e Probabilidade. Isso era necessário, pois era muito complicado quantificar o estado de energia de todas as moléculas. A saída foi fazer a média quadrática das velocidades das moléculas por meio de funções logarítmicas (VARGAS, 1996, p. 259).

James Clerk Maxwell fez um tratamento probabilístico e realizou cálculos que permitiam ver que o módulo quadrado das velocidades em um plano tridimensional equivalia à velocidade média das moléculas nas três dimensões. Boltzmann, posteriormente, retomou os estudos termodinâmicos através de tratamentos estatísticos. Ele mostrou que o estado de energia das moléculas e seu evento de dispersamento estavam interligados a um grau de desordem nos movimentos das partículas. Este resultado é encontrado por meio de uma função logarítmica, que fez com que Boltzmann percebesse que este grau de desordem era proporcional à Entropia do sistema e à irreversibilidade de processos termodinâmicos (VARGAS, 1996).

A função logarítmica encontrada por Boltzmann para o cálculo da entropia é:

Equação 4: Cálculo da Entropia

$$S = k_b \log(w)$$

Na equação acima, S é a entropia,  $k_b$  é a constante de Boltzmann e w é a quantidade de microestados. Com tais obras, a análise probabilística se incorporou como componente de linguagem matemática de fenômenos físicos. Gibbs, mais à frente, abordou os movimentos das moléculas de forma matemática, fazendo com que a Termodinâmica, em todo o seu âmbito, estivesse totalmente matematizada. A partir de então, a Estatística tornou-se um dos principais meios de modelar fenômenos matematicamente (VARGAS, 1996, p. 260).

Um dos primeiros atos de matematização acerca dos estudos sobre os fenômenos eletromagnéticos inicia-se com a medição da força entre cargas pontuais. Charles Coulomb, no século XVIII, muito influenciado pela mecânica newtoniana, usou métodos semelhantes aos de

Newton para medir a força elétrica. Coulomb parte da ideia de que a interação entre cargas deveria ser similar à interação entre massas, e assim como Newton, que dissera haver um campo gravitacional, propôs um campo elétrico. Associando o uso da balança de Cavendish, instrumento que media a intensidade de forças gravitacionais, com a balança de torção, ele chegou a uma relação matemática que ficou conhecida como a lei de Coulomb, na qual a força elétrica é o produto de duas cargas elétricas e ao inverso da distância entre elas, expressão essa análoga às encontradas por Newton ao se tratar das forças gravitacionais (VARGAS, 1996, p. 260).

Assim como ocorre na lei gravitacional de Newton, a lei de Coulomb não consegue dizer como o fenômeno se dá, mas apresenta o resultado de tais eventos, ou seja, é conhecido o efeito, mas não se sabe a causa. Pires (2008, p. 268) aponta este problema e as limitações da lei de Coulomb:

A lei de Coulomb, da mesma forma que a lei de atração gravitacional, não nos diz como a força é transmitida de uma carga à outra. A única coisa que essa lei faz é representar relações observadas entre propriedades mensuráveis de algo chamado de cargas elétricas (PIRES, 2008, p. 268).

Posteriormente, com Laplace e Gauss, são criados teoremas de campos de forças em forma de equações diferenciais. Nestes teoremas, há a ideia das linhas equipotenciais, que foram definidas pelas expressões de Laplace e que, mais tarde, foram aprofundadas por Poisson. Em resumo, seja uma carga elétrica ou partícula, à medida que esta se move numa superfície submetida a um campo, o decaimento de um nível de intensidade de força para um nível menor é chamado de potencial, assim como uma partícula que cai em direção ao centro da Terra vai diminuindo seu potencial (VARGAS, 1996, p. 261).

Mas essa semelhança entre os fenômenos elétricos e os fenômenos gravitacionais foi colocada em xeque quando Alessandro Volta, no final do século XVII e início do século XVIII, contestou Luigi Galvani acerca dos fenômenos elétricos em rãs. Volta construiu uma pilha que fornecia um fluxo de cargas contínuo e, após alguns testes, chegou à conclusão de que a lei de Coulomb não é válida para a eletrodinâmica. Assim, nos fenômenos dinâmicos da eletricidade, as expressões newtonianas não foram utilizadas (VARGAS, 1996, p. 261).

Hans Christian Oersted, no século XVIII, descobriu que cargas elétricas circulando por um circuito elétrico mudavam a orientação de uma bússola magnética, demonstrando que havia a geração de um campo magnético ao redor do fluxo elétrico. As relações matemáticas e suas análises acerca da relação de corrente elétrica e do campo magnético foram feitas por André-Marie Ampère, que também não se preocupou com a natureza das forças, apenas como estas culminaram para a ocorrência do evento (PIRES, 2008, p. 270).

Os estudos de Ampère permitiram entender como se dá a atração entre dois fios condutores paralelos que são percorridos por corrente elétrica em um mesmo sentido, e repulsão se as correntes elétricas de ambos os fios tiverem sentidos opostos. Ele utilizou de equações diferenciais para modelar o fenômeno observado e encontrou, como solução, valores que indicavam a ação de uma força atuando perpendicularmente ao movimento das cargas, de forma que o seu módulo crescia ou diminuía conforme os módulos de cargas nos fios. Ele também percebia que ela era inversamente proporcional à distância entre os dois condutores (VARGAS, 1996, p. 261).

Os efeitos do fenômeno eletromagnético haviam sido descritos matematicamente, mas ainda faltava a explicação de sua natureza. As relações matemáticas feitas até então contemplavam a consequência, mas não o princípio.

Michael Faraday, no século XIX, através de seus estudos sobre o Eletromagnetismo, chegou ao princípio da indução eletromagnética, onde há surgimento de corrente elétrica em uma espira quando imersa em um fluxo magnético variável perpendicular à sua área. Para explicar o fenômeno, Faraday introduz o conceito de linhas de forças, rejeitando a visão newtoniana na qual as forças atuam mediante a distância. Com esta ideia, Faraday iniciou os estudos sobre os fenômenos eletromagnéticos dinâmicos e chegou à definição de que um fluxo de linhas de campo magnético variável ao longo do tempo resulta no surgimento de uma força eletromotriz induzida pela variação das linhas na área da espira, que gerará uma corrente elétrica em um espaço em que estará localizado um campo elétrico (PIRES, 2008, p. 271).

Percebemos que, nos estudos eletrodinâmicos, as observações empíricas vão perdendo espaço para estruturação matemática. Nas concepções de Galileu e de Newton, no século XVI e XVII, primeiro se fazia a elaboração de um pensamento físico, e, por meio dos dados empíricos coletados, nascia um modelo matemático que corresponderia ao fenômeno real. Porém, no século XIX, parece ter ocorrido uma inversão na qual a matematização tem maior representatividade do fenômeno do que o próprio evento deste.

O fundamento da matematização do eletromagnetismo veio a ser consolidado por James Clerk Maxwell, no século XIX. Através dos estudos de Faraday sobre linhas de forças, que muito foram embasados nos conceitos de campos estabelecidos por Laplace e Gauss, Maxwell não obteve êxito na busca de encontrar evidências empíricas para explicar os efeitos eletromagnéticos dinâmicos. O efeito disto foi abandonar os princípios de que a observação precede a matematização, pois a matematização dos fenômenos eletromagnéticos gerava mais resultados do que os obtidos em observações laboratoriais. Maxwell partiu para o formalismo

matemático fundamentado nos tratados da Mecânica Analítica, estruturando as variáveis dos fenômenos e partindo de equações diferenciais - partindo do princípio de que o desenvolvimento de equações particulares, por meio de axiomas, pode ser resumido a uma única equação - nasceram as quatro equações de Maxwell para o Eletromagnetismo, em que é possível deduzir todos os fenômenos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, incluindo a luz. Mais uma vez, vemos que a maneira de sair de situações particulares até a generalização, mediante a matematização, é um artifício poderoso na construção do pensamento físico. Em suas palavras, Maxwell deixou bem claro esse processo:

Quando eu traduzi de uma forma matemática o que considerei serem as ideias de Faraday, achei que em geral os resultados dos dois métodos coincidem, tal que os mesmos fenômenos foram explicados, e as mesmas leis de ação deduzidas de ambos os métodos, porém, que os métodos de Faraday assemelhavam-se àqueles nos quais começamos com o todo e chegamos às partes por análise, enquanto os métodos matemáticos ordinários baseavam-se sobre o princípio de iniciar com as partes e construir o todo por síntese (ROCHA, 2011, p. 200).

Nesta síntese matemática, com o uso da Análise Vetorial, Maxwell chegou às quatro equações diferenciais que são um marco nos estudos sobre o Eletromagnetismo, sobretudo, para a Física. Duas equações se destinavam à definição de campo e fluxo da eletrostática e do magnetismo, e as outras duas se desdobravam nos fenômenos eletromagnéticos acerca da dinâmica de interação entre campo elétrico e campo magnético.

As quatro equações de Maxwell para o Eletromagnetismo são:

Equação 5: As equações de Maxwell no formalismo vetorial

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0}; \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0; \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J}\end{aligned}$$

A combinação destas equações, em termos de função de ondas, gerou um coeficiente que era a velocidade da luz. Nas equações de Maxwell, foi possível definir a natureza eletromagnética, portanto, ondulatória, da luz. Os estudos anteriores aos de Maxwell não conseguiram tamanha proeza, onde havia inúmeros modelos matemáticos para determinado evento de um fenômeno de mesma natureza.

Para mostrar experimentalmente o fenômeno das ondas eletromagnéticas, Heinrich Hertz, no final do século XIX, utilizou um transmissor e pontas metálicas nas quais delas eram emitidas faíscas energizadas eletricamente e que acertavam uma espira metálica. Utilizando

ondas de grande comprimento, conhecidas hoje como as ondas hertzianas, ou ondas de rádio<sup>9</sup>, Hertz percebeu que as ondas emitidas geravam corrente na espira. Mais tarde, mostrou-se que a velocidade escalar da propagação dessas ondas era a velocidade da luz, conforme havia sido definido teoricamente por Maxwell. Esse advento comprovou experimentalmente a natureza ondulatória da luz, medindo o seu comprimento de onda e a intensidade de energia. As equações de Maxwell foram tão relevantes para Física, de tal modo que a comunidade científica da época, do século XIX, que pouco acreditava que se poderia ir além sobre os estudos eletromagnéticos e a natureza da luz, ficou perplexa (ROCHA, 2011, p. 202).

Outras faixas do espectro eletromagnético, como o Raio-x e o infravermelho, foram descobertas. Também foi possível perceber que aconteciam fenômenos de interferência, difração e reflexão dessas ondas, demonstrando que elas tinham a mesma natureza da luz. Também foi comprovado que a emissão destas ondas transmitia energia na forma de radiação (Calor), coincidindo com as equações de Maxwell.

Aumentou-se o número de observações da radiação causadas por ondas eletromagnéticas. Nos estudos de radiações emitidas por corpos negros, percebeu-se que a Temperatura alcançada era de grande intensidade e constante, porém, não era contínua na sua distribuição de níveis de energia em relação às ondas eletromagnéticas. Muitos estudiosos da Física tentaram descrever o fenômeno, uns de maneira empírica e descritiva, outros de maneira matematizada, por meio de análises. No entanto, nenhum dos dois caminhos teve êxito. (VARGAS, 1996, p. 264). Uma proposta feita por Max Planck, no início do século XX, supondo que as radiações poderiam ser interpretadas como pacotes de energia quantizadas, denominados *quanta*, permitiu que Albert Einstein encontrasse uma solução teórica para o problema do efeito fotoelétrico, abrindo um novo campo para a Física: o mundo quântico.

### 3.4 Na contemporaneidade

Os intensos esforços para o entendimento das ondas eletromagnéticas e dos fenômenos físicos microscópicos, através de equações diferenciais e uso de técnicas de funções, probabilidades e estatísticas, não obtiveram êxito na explicação dos fenômenos associados ao mundo atômico. Uma possível explicação é que o pensamento físico ainda estava arraigado ao modelo newtoniano e precisava formular concepções e teorias que fossem algo diferente do usual. Com isso, surgiram duas novas alas da Física, no período em que chamamos de Física

---

<sup>9</sup> Essas ondas têm comprimento de onda que vão de centímetros a centenas de metros.

Moderna: a Física Quântica, que trata da natureza corpuscular da matéria e dos eventos que acontecem na escala atômica; e a Relatividade, que buscou compreender eventos em termos de relações entre os espaços temporais.

Com a Relatividade, surge a ideia de que a relação entre o espaço e o tempo deve ser tratada de maneira conjunta, uma vez que não seria possível conjecturar noções de espaços sem considerar a dimensão do intervalo temporal. Albert Einstein, o principal precursor dos estudos da Teoria da Relatividade Restrita, percebeu que as equações de Maxwell-Lorentz, do eletromagnetismo dinâmico, deveriam descrever tanto fenômenos que ocorriam em um sistema geométrico, em que os corpos estivessem em movimento, quanto em um espaço vazio (PIRES, 2008, p. 302).

Em 1905, Einstein publicou o artigo "*Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento*", no qual afirmava que os problemas eletrodinâmicos poderiam ser resolvidos por meio da seguinte premissa: a velocidade da luz é constante e é a mesma para quaisquer referenciais inerciais que se movem uniformemente. Neste artigo, Einstein fundamentou a Teoria da Relatividade Restrita formalizando dois postulados: um deles é que as leis físicas são iguais para quaisquer referenciais inerciais, e o outro é que a propagação da luz se dá numa velocidade constante no vácuo e independe dos referenciais e das fontes (PIRES, 2008, p. 303).

Nestes estudos, Einstein define o conceito de simultaneidade, no qual fundamenta que a velocidade da luz é constante em qualquer direção e sentido no espaço, e que o espaço e o tempo se intercalam. Logo, não é possível entender a cinemática relativística sem levar em conta o espaço e o tempo ao mesmo instante. Por fim, Einstein apontou que a velocidade da luz é o movimento mais rápido na natureza. Com base na segunda proposição e nas transformações galileanas, Einstein desenvolveu expressões matemáticas que incorporaram um fator “ $\gamma$ ” (gama), que representa, respectivamente, a dilatação temporal e a contração do tempo ocorrida entre observações simultâneas de referenciais inerciais de velocidades relativas próximas à velocidade da luz, ou seja, as transformações relativísticas formalizadas por Einstein são pronunciadas apenas para velocidades ligeiramente inferiores à velocidade da luz. Um fato importante é que tais transformações já tinham sido formuladas por Lorentz, porém este se opôs à concepção de que a dimensão temporal fosse dependente do referencial.

Equação 6: Fator gama

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Outra concepção que leva a um contrassenso é a noção de corpo rígido, uma vez que a definição de um corpo pressupõe que este mantenha suas dimensões espaciais depois de qualquer evento. Porém, por meio de expressões matemáticas da relatividade, é impossível que um corpo reaja acima da velocidade da luz. Se um corpo rígido sofre uma colisão, ou fenômeno similar, significa que um determinado referencial inercial não terá as mesmas dimensões, pois é impossível que a reação entre cada fração de comprimento seja da ordem da velocidade da luz. Sendo assim, o conceito de corpo rígido é inconcebível na teoria relativística.

Nesse ponto, percebemos que conceitos fundamentais da matéria estão intimamente relacionados aos efeitos espaço-temporais. Isso nos leva a concluir que a Relatividade fundamenta uma característica dual dos eventos reais, fundamento que também é engradado pela Física Quântica.

No artigo publicado em 1905, nomeado: “*A inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?*”, Einstein analisou o efeito ocorrido após uma radiação de energia de um corpo em dois referenciais diferentes e concluiu que um corpo perde massa em forma de energia quando emite radiação. A massa no referencial antes da radiação é maior que a do referencial após a radiação. Isso significa que um corpo em repouso carrega consigo uma energia de repouso, ou seja, a massa não seria uma constante de proporcionalidade, mas uma energia estocada que pode ser liberada de diversas maneiras.

O que se seguiu desta definição foi que a quantidade de movimento tenderia ao infinito se a velocidade do corpo tendesse à velocidade da luz. Em 1907, Planck publicou um artigo abordando esse fenômeno, em que a quantidade de movimento extrapola ao infinito quando a velocidade de um corpo em um referencial inercial é igual à velocidade da luz. Isto levou à conclusão de que a velocidade de um corpo não pode ser igual à velocidade da luz. Sendo assim, não poderíamos fornecer energia suficiente para que um corpo alcançasse essa velocidade, pois demandaria uma energia infinita (PIRES, 2008, p. 333).

Outro conceito que surge dos estudos relativísticos é o de “massa infinita”, ou seja, à medida que a velocidade de um corpo aumenta, a sua massa também aumenta. O fator de Lorentz tende ao infinito quando a velocidade do corpo em um referencial é igual à velocidade da luz, o que leva a esse paradoxo de “massa relativística”.

No intuito de complementar sua teoria acerca dos fenômenos relativísticos, Einstein procurou compreender os efeitos relativísticos para sistemas não inerciais, isto é, sistemas que se moviam em relação a outro referencial de maneira acelerada não constante, colocando em confronto o modelo newtoniano acerca de que a força gravitacional poderia ser tida como uma força fictícia em que sua forma de atuação depende do referencial escolhido. Dessa forma,

Einstein propôs um raciocínio semelhante a um evento em que um indivíduo com uma massa determinada está confinado em um elevador, que, por sua vez, está em um processo de queda livre. Ele conjecturou a seguinte ideia: uma vez que o sujeito está se movendo à mesma velocidade que o elevador e não há forças normais atuando sobre ele, pode-se dizer que o elevador seria um sistema inercial, desprezando a ação da gravidade, ou seja, não haveria diferença entre a atuação de uma aceleração e os efeitos do campo gravitacional derivado das relações mássicas. Logo, não haveria contraste entre a atuação de uma aceleração e os efeitos do campo gravitacional derivado das relações mássicas e, conseqüentemente, não haveria um sistema inercial absoluto. Todo este princípio é chamado de “princípio da equivalência”.

Os eventos relativísticos, quando orientados pelo princípio da equivalência, apresentavam um caráter curvilíneo devido à força gravitacional. Sendo assim, se uma partícula ou sinal se move a uma velocidade finita, a relação espaço-tempo e o efeito da presença de um campo gravitacional fazem com que essa partícula ou sinal apresente um trajeto curvo. A geometria euclidiana não era capaz de responder às curvaturas resultantes do movimento das massas no tecido espaço-tempo. Dessa forma, Einstein, com a ajuda do matemático Grossmann, desenvolveu conceitos gerais da relatividade por meio de técnicas matemáticas, como o Cálculo Tensorial e a Geometria Diferencial.

Por meio dos conceitos geométricos, Einstein entendeu que a curvatura em questão não se restringia somente à dimensão espacial nos planos  $(x, y, z)$ , mas também estava condicionada ao tempo. Nisto, a visão relativística do movimento orbital terrestre teve enfoque diferente da visão newtoniana, em que o movimento da Terra não descreve uma trajetória elíptica varrendo o espaço, mas uma curva em formato de espiral ou hélice. Com isso, fundamenta-se que a trajetória percorrida em um espaço quadridimensional  $(x, y, z, t)$  é sempre curvilínea.

A Relatividade Geral se provou superior à teoria de gravitação newtoniana, realizando três observações clássicas que estabeleceriam a teoria de Einstein como o principal modelo dos eventos relativos aos fenômenos que envolviam massas interagindo em uma dimensão quadridimensional. A primeira observação é o desvio ocorrido durante a precessão de Mercúrio, em que acontecem pequenos desvios que implicam em efeitos espaço-temporais, fazendo com que resulte em um tempo diferente do previsto. A teoria da Relatividade Geral, de Einstein, conseguiu descrever tal desvio, em que havia uma diferença de 43 segundos de arco por século. A segunda observação é a deflexão de um feixe de uma estrela quando submetido à presença de um intenso campo gravitacional, assim como o gerado pelo Sol, que implica na deformação do espaço-tempo causada pela massa, interferindo diretamente no raio da trajetória

de uma onda eletromagnética, tornando este raio curvilíneo. E, por fim, a diferença entre comprimento de onda e frequência de uma onda eletromagnética na presença de um campo gravitacional intenso, em que, sendo dois referenciais distintos, no referencial com o maior campo magnético, a onda eletromagnética tem um fóton de comprimento de onda maior e de menor frequência, ou seja, um relógio submetido a um campo gravitacional tem seu período de tempo acrescido.

A partir daí, houve diversos estudos que buscaram compreender ainda mais este fenômeno, em que o comprimento de onda luz era alterado pelo campo gravitacional, tendendo ao vermelho. Em 1929, o astrônomo Edwin Hubble constatou tal fenômeno e concluiu que a luz provinda de galáxias a distâncias exorbitantes da Terra tem caráter avermelhado. Ele propôs que o aumento do desvio para o vermelho é proporcional à distância entre as galáxias. Essa descoberta implica no entendimento que o universo está se expandindo, isto é, a expansão é fruto do prolongamento do próprio espaço, e não pela velocidade de recessão das galáxias, ou seja, é como se as galáxias estivessem em repouso nos seus referenciais e o espaço em que estão inseridas expandisse, tornando a distância entre elas maior.

Georges Lemaître (1894-1966) propôs a ideia de que, em algum momento do passado, toda a matéria do universo estava totalmente comprimida em um único local, sendo, assim uma espécie de átomo primevo que explodiu. Fred Hoyle (1915-2001) chamou tal evento de *big bang*, e afirmou que o universo não teve início e que tal explosão não se trava da matéria, mas do próprio espaço, assim conjecturou que o sistema quadridimensional nasce no *big bang*, isto é, o espaço-tempo.

Esta ideia, na qual uma quantidade de matéria pode ser comprimida a termos infinitos, foi abordada em 1916 por Karl Schwarzschild, que chegou a primeira solução para o cálculo da intensidade de um campo gravitacional decorrente de uma massa pontual. Ele compreendeu que à medida que essa matéria é comprimida a razão entre a massa e o raio de um corpo esférico produz uma distorção no espaço-tempo que nem a luz pode escapar, isto é, a velocidade de escape de tal campo gravitacional se torna igual ou maior do que a velocidade da luz, em 1966, John Wheeler chamou este fenômeno de buraco negro.

A concepção determinística laplaciana sofreu questionamentos, uma vez que a teoria do caos mostrou que é impossível determinar e prever o comportamento dos sistemas físicos de maneira absoluta, pois não se tem os detalhes ultrafinos das variáveis físicas envolvidas. Poincaré, no final do século XIX, foi talvez o primeiro a notar o comportamento caótico e aleatório de alguns sistemas dinâmicos.

Os estudos que possibilitaram a matematização da matéria e também o grande desenvolvimento da Química foram o resgate das ideias dos filósofos atomistas gregos, Leucipo e Demócrito, ainda que a concepção fosse muito simples e ingênua em diversos pontos. Há duas ideias desses dois pensadores que transformaram o pensamento físico sobre a matéria séculos mais tarde: a indivisibilidade da matéria e a ligação de partículas. Foi no início do século XIX, que vários cientistas começaram a investigar profundamente a natureza da matéria no âmbito atômico. O primeiro a estabelecer uma espécie de modelo atômico foi John Dalton, químico que desenvolveu uma teoria de que a matéria e sua diversidade de ligações eram formadas por átomos maciços e indivisíveis, semelhantemente a bolas de bilhar. É com Dalton que nasce a primeira definição de molécula, mas foi Amedeo Avogadro que deu uma definição satisfatória sobre moléculas, por meio de técnicas matemáticas. Ele conjecturou que um mesmo volume de gás, quando submetido a Temperatura e Pressão constantes, contém a mesma quantidade de moléculas. Jacob Berzelius, ao calcular a massa do átomo de oxigênio, conseguiu fazer relações com vários outros átomos (VARGAS, 1996, p. 267).

O conhecimento dessa relação se consolidou quando Dmitri Mendeleev, em sua obra *Princípios de Química*, introduziu arranjos e relações periódicas entre os elementos químicos. Assim, conseguiu agrupar os elementos conforme suas propriedades de eletronegatividade e massas atômicas. Este agrupamento foi um dos pontos instigantes para o desenvolvimento da teoria atômica (VARGAS, 1996, p. 268).

Os estudos avançaram e, no final do século XIX, com o trabalho de Joseph John Thomson no uso de raios catódicos, além dos trabalhos de Crookes, Soney e Plucker, foi possível perceber que os raios catódicos sofriam desvios devido às placas positivas e aos campos magnéticos, sugerindo que a matéria emitia algo de carga negativa; logo, o átomo deveria ser constituído de partículas positivas e negativas. Com alguns dados e desenvolvimento matemático, foi possível calcular a relação entre a carga e a massa da partícula negativa, o que, posteriormente, veio a ser chamado de elétron. Essa descoberta levou J. J. Thomson a propor um modelo atômico que ficou conhecido como “pudim de passas”, pois demonstrava que os elétrons estariam incrustados em uma massa positiva, que era o átomo. O problema do modelo é que cargas de sinais opostos se atraem e se neutralizam; como consequência, eles não poderiam estar no mesmo lugar (FREIRE JR., 2011, p. 239). Antoine Henri Becquerel, de maneira experimental, descobriu que o urânio emite radiações espontâneas que ionizam o ar, e, a partir daí, começou a investigação das relações de radiação eletromagnética com o modelo atômico (VARGAS, 1996, p. 268).

O casal Pierre e Marie Curie, no início do século XX, ao utilizar amostras de diversos isótopos, observou que o decaimento do urânio liberava três tipos de radiação: a que liberava um átomo de hélio sem os elétrons, chamada de partículas alfa; a radiação beta, que são elétrons emitidos pelos núcleos; e a radiação gama, que são subpartículas sem carga elétrica e de alta energia (VARGAS, 1996, p. 268).

Com o uso de partículas alfa, Ernest Rutherford, que foi aluno de J. J. Thompson, percebeu que o modelo atômico de seu mestre não correspondia aos dados experimentais, uma vez que as partículas quase não sofreram desvio quando direcionadas a uma folha fina de ouro, colidindo em uma estrutura de chumbo. Os desvios medidos mostravam que as partículas voltavam em quase 180°, enquanto a maior parte dos átomos passava diretamente, como se houvesse um grande vazio. Nisto, inspirado no modelo proposto há anos antes pelo Hantaro Nagaoka, Rutherford propôs o modelo planetário, sugerindo que o núcleo seria a região do átomo composta por cargas positivas, concentrando a maior parte da massa do átomo (semelhante ao Sol), e que os elétrons estariam orbitando o núcleo (semelhante aos planetas). Esta analogia com o sistema solar apresentava um problema, pois se sabia que cargas carregadas em movimento emitem radiação; portanto, os elétrons em movimento perderiam energia e colapsariam no núcleo, fazendo com que o átomo deixasse de existir:

A teoria eletromagnética de Maxwell-Larmor, a partir de suas equações básicas, prediz que toda a carga acelerada perde energia em forma de radiação eletromagnética e, por isso mesmo, surgia uma discordância fundamental com o modelo planetário de Rutherford. Tal modelo implicava que os átomos eram instáveis, pois os elétrons girando em suas órbitas, com velocidade constante, possuem uma aceleração centrípeta e, por consequência, irradiariam emitindo energia sob a forma de ondas eletromagnéticas. Ao girarem, os elétrons deveriam ir perdendo, continuamente, a sua energia e, portanto, colapsar, ao aproximar-se do núcleo atômico. Estaríamos diante de uma possível “catástrofe atômica” que implicava na não estabilidade do átomo (FREIRE JR., 2011, p. 240, grifo do autor).

Contudo, Niels Bohr, que foi aluno de Rutherford, sabendo dos resultados da equação proposta por Rydberg e Balmer, que demonstrava os valores exatos das raias espectrais do átomo de hidrogênio, conjuntamente com a ideia de quantização de energia de Planck, propôs um postulado em que os elétrons ocupavam níveis de energias específicos, que eram quantizados, ou seja, cada órbita estava a uma distância definida, e o elétron só poderia ser localizado nessas órbitas quantizadas. Todos esses fatores determinaram que o movimento do elétron em torno do núcleo também era quantizado; além disso, ele girava em torno de si (spin). O raio médio, a forma elíptica das órbitas, o momento angular e o spin do elétron geram os números quânticos associados às órbitas e iriam se correlacionar com as propriedades químicas dos átomos (VARGAS, 1996, p. 268).

Com essas descobertas, a tabela de Mendeleev foi reformulada conforme o número de prótons e com os números quânticos. Desse modo, nasceu um modelo por meio do qual poderia se compreender a distribuição eletrônica dos átomos a partir das deduções, baseadas no *quantum* de energia, e assim possibilitar a identificação das propriedades da matéria. Ou seja, a quantização dos raios das órbitas e dos momentos de um elétron e o spin decifriariam toda estrutura atômica (VARGAS, 1996, p. 269).

Havia fenômenos em que os elétrons apresentavam comportamentos estranhos. Em geral, partículas não apresentavam características típicas de fenômenos ondulatórios, como a difração, por exemplo. Os experimentos e os cálculos realizados por de Broglie demonstraram que os elétrons sofriam difração e tinham comportamento ondulatório; logo, uma partícula poderia se comportar como uma onda, chegando-se à conclusão de que a matéria pode se comportar de forma dual, ora como onda, ora como partícula (VARGAS, 1996, p. 269).

Para se ter um modelo mais preciso do átomo, foi necessária a exclusão do princípio de que os elétrons orbitam o núcleo de forma análoga ao sistema de planetas. Era necessário que o núcleo estivesse envolto de elétrons com características ondulatórias. Com esse novo modelo atômico, foi possível o surgimento da Mecânica Quântica, que se ocupou de estudar os fenômenos ondulatórios no campo atômico. Erwin Schrödinger, por meio de equações diferenciais parciais, conseguiu modelar a equação, chamada de função psi ( $\Psi$ ), que demonstraria a variação da densidade de elétrons ao redor do núcleo (VARGAS, 1996, p. 269).

A equação de Schrödinger que descreve a variação da densidade de elétrons é:

Equação 7: Equação de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi$$

Max Born, posteriormente, mostrou que o módulo quadrado da função  $\Psi$  seria a densidade de probabilidade de se encontrar um elétron em uma determinada região. Werner Heisenberg, apoiado nas técnicas de álgebra matricial desenvolvidas por Hamilton, conseguiu descrever o movimento de partículas em propriedades quânticas, bem como desenvolver os mesmos resultados de Schrödinger com a utilização de matrizes (VARGAS, 1996, p. 269).

Paul Dirac, estudando sobre a teoria ondulatória para um elétron livre que se movesse aproximadamente perto da velocidade da luz, chegou a duas soluções para o nível energético, em que uma delas era negativa, e, quando inferiu que a energia fosse concentrada em um ponto ocupado pelo elétron de nível negativo, surgiria uma partícula de massa igual,

porém, de carga elétrica contrária, ou seja, positiva, que, mais tarde, veio a ser chamada de pósitron, sendo identificado experimentalmente por Occhialini<sup>10</sup> (VARGAS, 1996, p. 270).

Heisenberg, por meio de suas matrizes, conseguiu demonstrar que é impossível ter precisão nas medidas da posição e momento na escala atômica, o que ficou conhecido como o princípio da incerteza (VARGAS, 1996, p. 270). As inequações propostas pelo princípio da incerteza colocam um limite quanto à exatidão dos resultados quânticos. A Física, conhecida pela sua objetividade e precisão dos resultados no macro, passava a utilizar-se da incerteza probabilística quando se tratava do mundo atômico.

A matematização do nível atômico descrevia os fenômenos de forma mais satisfatória do que a observação e experimentação, uma vez que a própria equação define melhor o evento do que a própria experimentação. Vargas (1996, p. 270) endossa essa transformação na Física, em que as expressões matemáticas trazem mais informações e condizem mais com o evento real do que o próprio ato empírico:

Portanto, as experiências organizadas e interpretadas de acordo com a teoria ondulatória levam à conclusão de que partículas atômicas comportam-se em desacordo com as leis de identidade e da não-contradição que deveriam reger a realidade, conferindo a elas um caráter fantasmagórico. Entretanto, a equação de Schrödinger é única, coerente consigo mesma e verdadeira; por ser concordante com a experiência; portanto define melhor uma realidade do que a própria experiência. Assim, poder-se-ia conjecturar que as equações matemáticas não seriam apenas símbolos do real; elas passariam a ter características da própria realidade (VARGAS, 1996, p. 270)

Após os esforços para se entender como funciona o átomo, uma vez consolidada a existência dos elétrons, prótons e nêutrons, chegou-se à conclusão, através da matematização, que existiam partículas de antimatéria, além de outras subpartículas que tinham um tempo de vida muito curto. No desejo de fracionar as partículas cada vez mais e de saber o mistério do núcleo atômico, Hideki Yukawa, em seus estudos matemáticos, postulou a existência de uma partícula subatômica intermediária chamada de méson, que é duzentas vezes maior que o elétron e tem menor massa que o próton. Ele sugeriu que essas subpartículas funcionariam como mediadoras de outras forças, diferentemente da força eletromagnética e da força da gravidade, nascendo, assim, a ideia de novas forças nucleares (VARGAS, 1996, p. 272). Yukawa havia proposto a existência do méson pi, que, com a significativa contribuição experimental de César Lattes, foi descoberto de forma natural, com os estudos de raios cósmicos, em Chacaltaya, na Bolívia.

---

<sup>10</sup> Giuseppe Occhialini veio para o Brasil a convite de Gleb Wataghin e foi professor da USP no final dos anos 1930 e início dos anos 1940.

Lattes ainda conseguiu descobrir, junto com Gardner, em Berkeley, a produção de mésons pi de forma artificial no laboratório, por meio de um acelerador de partículas. Essas descobertas fizeram os físicos procurarem entender como as partículas interagiam e se mantinham juntas.

A partir da ideia da interação de cargas elétricas por meio de fótons, adotada pela eletrodinâmica quântica, foi possível montar um modelo matemático para explicar a interação entre partículas no núcleo atômico. Isso levou à definição do que se chama de forças fortes (de curta ação), intermediadas por mésons, e forças fracas, atuando entre as demais partículas. Dessas sugestões, surgiram hipóteses sobre a existência de partículas menores no núcleo do átomo, chamadas de *quarks*, unidas por *glúons*. Essas partículas compõem a formação dos prótons, nêutrons e mésons, de acordo com o modelo conhecido como “modelo padrão” (VARGAS, 1996, p. 272).

O modelo padrão não responde a todos os fenômenos no mundo quântico. Há outras propostas, como a teoria das cordas, na qual todos os fenômenos, inclusive as partículas, são explicados por movimentos ondulatórios. Porém, essa teoria também tem problemas, como um espaço dividido em 11 dimensões, por exemplo.

Baseado no modelo padrão, Peter Higgs propôs um conceito que explicaria a massa contida nessas subpartículas, as quais seriam o efeito de um campo no mesmo espaço em que tais partículas estariam localizadas, sendo tal campo denominado “campo de Higgs”. O efeito de produção de massa reside no acoplamento da partícula com o campo, em que a partícula mediadora do campo de Higgs foi nomeada de bóson de Higgs, e sua atuação gera uma força de Higgs, sendo uma ação de modelagem matemática. Ressalta-se que a partícula em questão ainda não foi observada experimentalmente (PIRES, 2008, p. 441).

Nesta perspectiva, os estudos sobre os fenômenos físicos na contemporaneidade foram assumindo modelos matemáticos cada vez mais abstratos, partindo desde a geometrização da dimensão espaço-tempo até estudos puramente matemáticos, como a Física dos Materiais, Física da Matéria Condensada e a Física Quântica. Alguns dos modelos matemáticos atuais são complexos de serem resolvidos de forma mecânica ou experimental, o que requer a utilização da computação eletrônica e das técnicas matemáticas de simulação.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Elencado os cenários históricos e epistêmicos no que se refere ao elo entre a Matemática e a Física, por meio das análises feitas nesta pesquisa, que objetivou apenas evidenciar, de forma sucinta, eventos transformacionais na relação entre Física e Matemática, chegamos a resultados interessantes, dentro do viés previsto para este trabalho.

As características que nos lançaram ao conceito de linguagem estruturante foram, em nossa perspectiva, observadas ao transitar pela construção gnosiológica de ambas as Ciências, em especial, dos conhecimentos físicos.

Vimos que o ato de matematizar os fenômenos naturais é engradado pelo pitagorismo, fator importante, principalmente, quando o caráter aleatório e enigmático dos eventos parecia ser a tônica. Portanto, demonstrar que alguns fenômenos correspondiam a sequências matemáticas conhecidas poderia permitir antever situações. Para os pitagóricos, os números compunham toda a Natureza, de outra forma, tudo poderia ser transcrito em números ou formas geométricas. Essas ideias podem ter influenciado diversos pensadores que vieram posteriormente, pois muitas das explicações adotadas, especialmente quando estiveram relacionadas ao movimento dos astros, utilizaram bases geométricas, além de outras relações matemáticas. Ptolomeu e Arquimedes conseguiram matematizar alguns fenômenos físicos, ancorados na técnica de dedução euclidiana. Em nossa opinião, nestes dois pensadores, há o surgimento da concepção estruturante da Matemática, ainda que estes não a tivessem adotado como linguagem, ideia que é amadurecida e sistematizada de forma metodológica e cultural a partir de Galileu, no século XVII.

A racionalidade matemática tem sua forma pura e principiante nos estudos de Euclides. É neste dado ponto da História que a Matemática é desenvolvida de forma sistemática e dedutiva. A fama da Matemática como base de veracidade e cientificidade tem raízes euclidianas; ademais, se a Física goza de uma rica linguagem matemática, na qual essa tem teoremas axiomáticos dedutivos, muito se deve ao pensamento euclidiano.

No que diz respeito ao desenvolvimento epistêmico da Física e da Matemática, parece-nos haver uma certa interdependência, uma vez que, se uma das ciências avança em seus conceitos, são criadas condições para que a outra também se aprimore. Tais exemplos são apresentados ao longo da investigação histórica realizada por esta pesquisa. Dois exemplos são: os estudos geométricos na Antiguidade, que foram fundamentais para a matematização da Natureza, desenvolvida por Arquimedes, Ptolomeu e Eratóstenes; na necessidade de compreender as noções de variabilidade dos fenômenos mecânicos, Newton desenvolveu os

Cálculos Diferencial e Integral. Esses eventos colaboram para a função de linguagem estruturante da Matemática, uma vez que o desenvolvimento dos conceitos, símbolos, teoremas e códigos matemáticos, ou seja, todo o conteúdo da linguagem matemática, torna o entendimento dos fenômenos físicos mais fácil.

A faculdade de tradução dos fenômenos físicos mostrou-se elemento característico da Matemática. Os símbolos e códigos matemáticos carregam consigo a transliteração das variáveis físicas e dos fenômenos particulares, permitindo que o pensamento físico seja assentado e produza modelos matemáticos correspondentes ao que se vê na natureza. Percebeu-se que os modelos matemáticos não se limitam apenas a um evento físico, mas ultrapassam o mero formalismo, pois possuem a habilidade de descrever fenômenos distintos usando uma mesma linguagem. Isso é demonstrado na lei da gravitação de Newton e na lei da atração de Coulomb. Outro exemplo disso são as semelhantes expressões matemáticas da Mecânica Analítica e da Termodinâmica. Nesse caso, não mais que uma linguagem comum pode caracterizar dois fenômenos distintos; assim, a Matemática demonstra ser uma linguagem.

A barreira posta nos estudos da relação entre os campos elétricos e magnéticos, devido à falta de desenvolvimento do pensamento físico e da adequação da linguagem matemática, fez com que a análise dos fenômenos se desse de maneira pormenorizada, em que se buscava entender os fenômenos por partes, para, posteriormente, se chegar a uma expressão geral. Um exemplo desta técnica são as quatro expressões matemáticas de Maxwell para o Eletromagnetismo. Este impasse também culminou na matematização da matéria, na qual se descreve não somente os fenômenos físicos de forma matemática, mas agora, até mesmo a natureza da matéria estava matematizada em modelos. Conclui-se, deste tempo em diante, que a matematização e os modelos matemáticos apresentariam peculiaridades dos fenômenos que nem mesmo da observação e experimentação poderiam obter-se. Os modelos matemáticos foram assumindo conjecturas cada vez mais abstratas para se adequar aos estranhos fenômenos espaciais e quânticos, em que as equações diferenciais foram sendo constituídas de elementos e símbolos matemáticos complexos. Tais eventos resultaram em uma concepção na qual as equações matemáticas passariam a ter características da própria realidade. Nisso, vemos que o nível mais alto de matematização da Física foi estabelecido na Física Moderna.

No entanto, a modelagem matemática é fruto de um pensamento físico que a fundamenta. Assim como a linguagem humana é dependente da cognição, a linguagem matemática tem significado apenas sob o aspecto lógico que se manifesta através de uma cadeia de hipóteses e conjugações sobre um fenômeno no mundo físico. Desse modo, podemos delinear que a linguagem matemática é a ponte entre o real e o abstrato e entre a concepção

humana e o fenômeno. Portanto, é de se apontar que o fator estruturante da Matemática está condicionado a uma organização sistemática do pensamento, e que a sua função como linguagem é circunscrita à análise fenomenológica, na qual sua participação no processo de modelagem se tornou um critério de cientificidade.

Por oclusão, este trabalho é satisfeito em uma análise simples e coesa sobre estes eventos transformacionais no conhecimento físico. Como já fora dito, não foi pretensão desta pesquisa seguir linhas de análise mais profundas, pois os textos referenciados foram provenientes de uma abordagem secundária e limitada. Para irmos além, necessitaríamos de mais tempo e de analisar materiais mais completos, em outras línguas, que, infelizmente, não temos à disposição.

Reconhecemos as limitações deste trabalho, principalmente com relação ao desenvolvimento de análises mais estruturadas em técnicas reconhecidas na literatura, como análise do discurso, análise do conteúdo ou análise textual discursiva. Contudo, entendemos que este material pode ser utilizado como um resumo de elementos históricos que vinculam o pensamento físico às estruturas matemáticas, enquanto linguagem.

As descrições e observações obtidas por meio deste trabalho podem ser continuadas para análises específicas. Um exemplo é o efeito da matematização da Física sobre o processo de ensino-aprendizagem de Física. Logo, este trabalho deixa muitas vias de investigações abertas acerca da relação entre a Física e a Matemática, que poderão ser continuadas de diversos âmbitos, sejam eles históricos, filosóficos, epistemológicos, culturais ou educacionais.

## REFERÊNCIAS

ARAGÃO, Maria José. **A História da Matemática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. *E-book*.

BOGDAN, R.; BIKLEN, S. K. *Qualitative Research for Education*. Boston: Allyn And Bacon, 1982. *In*: LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli E. D. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4091392/mod\\_resource/content/1/Lud\\_And\\_cap3.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4091392/mod_resource/content/1/Lud_And_cap3.pdf). Acesso em: 14 jun. 2023.

CHASSOT, Attico. **A Ciência através dos tempos**. São Paulo: Editora Moderna, 1994.

FEYNMAN, Richard. **The character of physical law**. Cambridge: The MIT Press, 1967. Disponível em: <https://www.ling.upenn.edu/~kroch/courses/lx550/readings/feynman1-4.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2023.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

JAKOBSON, Roman. **Linguística e Comunicação**. 19. ed. São Paulo: Cultrix, 2003. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7685389/mod\\_resource/content/1/Jakobson%20-%20Lingu%C3%ADstica%20e%20comunica%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7685389/mod_resource/content/1/Jakobson%20-%20Lingu%C3%ADstica%20e%20comunica%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em: 11 out. 2023.

KARAM, Ricardo Avelar Sotomaior. **Estruturação Matemática do pensamento físico no ensino: Uma ferramenta teórica para analisar abordagens didáticas**. Orientador: Maurício Pietrocola. 2012. 275 f. Tese (Doutorado em Educação) - Programa de Pós-Graduação em Educação, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

KLING, Morris. **Mathematics and the physical world**. New York: Thomas Y Crowell Company, 1959.

LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli E. D. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4091392/mod\\_resource/content/1/Lud\\_And\\_cap3.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4091392/mod_resource/content/1/Lud_And_cap3.pdf). Acesso em: 14 jun. 2023.

MORAES, Roque; GALIAZZI, Maria do Carmo. Análise textual discursiva: processo reconstrutivo de múltiplas faces. **Ciência e Educação**. Bauru, 2006. v. 12, n. 1, p. 117-128. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/wvLhSxkz3JRgv3mcXHBWSXB>. Acesso em: 06 ago. 2024.

NEWTON, Isaac. **Principia: princípios matemáticos de filosofia natural**. 2. ed. 3. reimp. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2016. v. 1.

PATY, Miguel. O caráter histórico da adequação da matemática à física. **Comunidade de Madrid/CSIC**. Madri, 1994. p. 401-428. 1994. Disponível em: <https://shs.hal.science/halshs-00167193/document>. Acesso em: 31 maio 2023.

PIETROCOLA, Maurício. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. Florianópolis, 2002. v. 19, n. 1, p 89-109. 2002. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/9297>. Acesso em: 12 abr. 2023.

PIETROCOLA, Maurício. Construção e Realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações em ensino de ciências*. Porto Alegre, 1999. v. 4, n. 3. 1999. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=3207>. Acesso em: 29 ago. 2023.

PIRES, Antonio S. T. **Evolução das ideias da física**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

PONCZEK, Roberto Leon. Capítulo I - da bíblia a Newton: uma visão humanística da mecânica. *In: ROCHA, José Fernando (org.) et al. Origens e evoluções das ideias da física*. Salvador: EDUFBA, 2011. p. 10-104.

POINCARÉ, Jules Henri. **O Valor da Ciência**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

PUPPI, Alberto Irineu. **Comunicação e semiótica**. Curitiba: Intersaberes, 2012. *E-book*.

ROCHA, José Fernando Moura (org.) *et al.* **Origens e evoluções das ideias da física**. Salvador: EDUFBA, 2011.

ROCHA, José Fernando Moura. Capítulo III - Origem e evolução do eletromagnetismo. *In: ROCHA, José Fernando Moura (org.) et al. Origens e evoluções das ideias da física*. Salvador: EDUFBA, 2011. p. 134-217.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do Trabalho Científico**. São Paulo: Cortez, 2014. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5562413/mod\\_resource/content/1/Metodologia-Do-Trabalho-Cientifico-23%C2%AA-Edicao-Severino-EBOOK-Escolhido.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5562413/mod_resource/content/1/Metodologia-Do-Trabalho-Cientifico-23%C2%AA-Edicao-Severino-EBOOK-Escolhido.pdf). Acesso em: 14 jun. 2023.

VARGAS, Milton. História da matematização da natureza. **Estudos Avançados**. São Paulo, 1996. v. 10, n. 28, p 249-276. 1996. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/8962>. Acesso em: 15 maio 2023.