



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE  
COORDENADORIA DE LICENCIATURA EM FÍSICA



LUCIVAL AQUINO SANTOS

## **EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE INÉRCIA**

LAGARTO - SE

2023

LUCIVAL AQUINO SANTOS

## **EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE INÉRCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe como pré-requisito para obtenção do grau em licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Augusto dos Santos Freitas

LAGARTO - SE

2023

Santos, Lucival Aquino.

S236e    Evolução histórica do conceito de inércia / Lucival Aquino Santos. – Lagarto, 2023.  
73 f. ; il.

Monografia (Graduação) – Licenciatura em Física. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Augusto dos Santos Freitas.

1. Lei de Newton. 2. Inércia. Relatividade. 4. Instrumento de pesquisa. I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS. II. Título.

CDU: 53:373.5



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE  
Av. Jorge Amado, 1551 – Loteamento Garcia, Bairro Jardins - CEP 49025-330 – Aracaju/SE  
Fone: (79) 3711 1400 – E-mail: [reitoria@ifs.edu.br](mailto:reitoria@ifs.edu.br)

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**Curso de Licenciatura em Física.**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**Evolução histórica do conceito de inércia**

**Lucival Aquino Santos**

Esta monografia foi apresentada às 09h00 horas do dia 04 (quatro) de julho de dois mil e vinte e três como requisito parcial para a obtenção do título de **Licenciado(a) em Física**. O(a) candidato(a) foi arguido(a) pela banca examinadora composta pelos examinadores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Augusto dos Santos Freitas  
Instituto Federal de Sergipe

---

Prof. Dr. Lucas Rodrigues dos Santos  
Instituto Federal de Sergipe

---

Prof. Dr. Leonardo de Sousa Silva  
Instituto Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Jarbas Cordeiro Sampaio  
(Coordenador do curso)  
Instituto Federal de Sergipe



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE  
Av. Jorge Amado, 1551 – Loteamento Garcia, Bairro Jardins - CEP 49025-330 – Aracaju/SE  
Fone: (79) 3711 1400 – E-mail: [reitoria@ifs.edu.br](mailto:reitoria@ifs.edu.br)

**ATA DA AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Curso de Licenciatura em Física.**

Em 04 (quatro) de julho de dois mil e vinte e três às 09h00, pelo Curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Sergipe, instalou-se a banca examinadora da apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do estudante: **Lucival Aquino Santos**, composta pelos(as) docentes: Augusto dos Santos Freitas (Orientador), Lucas Rodrigues dos Santos (Examinador 1) e Leonardo de Sousa Silva (Examinador 2), a fim de proceder a arguição pública e avaliação do TCC do candidato, no trabalho intitulado: *Evolução histórica do conceito de inércia*. Aberta a sessão, o presidente da banca examinadora autorizou o início da apresentação. Após a apresentação do trabalho, foi realizada arguição e na sequência a banca examinadora se reuniu para a atribuição do conceito final. De acordo com a NORMATIVA INTERNA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, o candidato foi considerado **aprovado** com conceito final **9,5**.

Assinam:

Prof.(a) Orientador(a): \_\_\_\_\_

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** AUGUSTO DOS SANTOS FREITAS  
Data: 21/07/2023 11:56:16-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Examinador(a): \_\_\_\_\_

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LEONARDO DE SOUSA SILVA  
Data: 20/07/2023 16:53:37-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Examinador(a): \_\_\_\_\_

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUCAS RODRIGUES DOS SANTOS  
Data: 10/10/2023 16:17:04-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Lagarto, 04 de julho de 2023.

Fazer em duas vias.

Dedico este trabalho a Stephen Hawking, a minha  
família, amigos e ao meu professor orientador  
Augusto dos Santos Freitas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Jesus Cristo** por me guiar, dar-me forças e paciência para que eu nunca desistisse desta jornada.

Agradeço a minha mãe **Josefa Gomes**, a meu pai **Luciano Ribeiro**, por me apoiarem em todos os momentos.

Agradeço a meus irmãos **Lucimarco Aquino Santos** e a **Lucimara de Aquino Santos**, por sempre estarem comigo e abraçarem a minha caminhada nos estudos.

Agradeço aos meus professores (ras) **Carla Priscila, Thamires dos Santos, Fabio Henrique, Aline Alves, Edney Nogueira, André Neves, Augusto Freitas, Sergio, Acácio Figueredo, Mauro Santos, Cíntia Teles, Alane Azevedo, Ana Júlia, José Uibson Moraes, Paulo Jorge, Héstia Precoma, Ronaldo da Maceno, Lucas Rodrigues, Luciano, Jussineide Fonseca, Jonas Janderson, Bruna da Costa e Michely Batista** por entenderem o jeito tímido de me expressar.

Agradeço aos meus amigos da vida, **Aila Pinheiro, Evandro Santos, Juscimaria Cruz e Hernani Nascimento**, por sempre me darem o suporte necessário para que a graduação se tornasse mais leve e conseqüentemente mais divertida.

Agradeço aos meus amigos do curso de Licenciatura em Física **Luzia Adriane, Matheus Oliveira, Girleide Nascimento, Joice Souza, Renata Costa, Renata Nascimento e Katila Conceição**, deixo aqui anotado/registrado meus agradecimentos pelo carinho, solidariedade, apoio e troca de conhecimento. Que, todavia, compartilhamos angústias e alegrias, e que sem sombras de dúvidas ficaram para sempre gravados em minha memória e em meu coração.

Aqui vai um agradecimento muito especial ao meu orientador **Augusto dos Santos Freitas**, obrigado pelas orientações, sugestões, conselhos e pela paciência, pois foi de essencial ajuda para que pudesse concluir mais uma fase da minha vida.

Enfim, agradeço a todos os amigos não citados, mas que também de alguma forma me auxiliaram neste trabalho.

“Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança.”

(Stephen Hawking)

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo discorrer sobre a história de um conceito explorado pela mecânica newtoniana: a inércia, bem como discutir e analisar as seguintes composições que advêm dela, origem da inércia, experiência do balde proposta por Newton, críticas de Ernst Mach sobre a existência de um espaço-tempo absoluto e por fim, o conceito da inércia na relatividade restrita. A metodologia utilizada é de revisão bibliográfica, exploratória, descritiva e qualitativa tendo sido construída com base em levantamentos de dados acerca da evolução da inércia, baseando-se no trabalho do Newton, Porto e Pessoa etc. Percebe-se que o conceito de inércia passou por diversas modificações no período compreendido pelo trabalho, de Galileu, Descartes até Einstein, bem como a de conceitos subjacentes, a exemplo da noção de espaço-tempo absoluto. A sequência reúne elementos que contribuíram para evolução da inércia ao longo do tempo, um período antes de Newton, com Galileu e Descartes e um momento após com Einstein. Assim, foi possível conhecer e identificar a solução para o conceito de inércia e a experiência do balde proposta por Newton, após pressupor a ideia de um espaço absoluto, a origem do formato côncavo da água. Vê-se que Newton estava completamente errado e o formato da água é explicado por Stevin através da sua lei que insere uma superfície líquida em rotação, do mesmo modo que consegue uma resposta diante da pergunta “A inércia de um corpo dependente de seu conteúdo de energético? ”, por meio do princípio da equivalência massa-energia de Einstein.

**Palavras-chave:** Inércia. Mecânica Newtoniana. Espaço Absoluto. Princípio de Mach. Experiência do Balde de Newton.

## ABSTRACT

The present work aimed to discuss the history of a concept explored by Newtonian mechanics: inertia, as well as to discuss and analyze the following compositions that come from it, origin of inertia, bucket experiment proposed by Newton, criticism of Ernst Mach on the existence of an absolute space-time and finally, the concept of inertia in restricted relativity. The methodology used is of bibliographical review, exploratory, descriptive and qualitative having been built based on data surveys about the evolution of inertia, based on the work of Newton, Porto and Pessoa etc. It is noticed that the concept of inertia has undergone several changes in the period covered by the work, from Galileo, Descartes to Einstein, as well as that of underlying concepts, such as the notion of absolute space-time. The sequence brings together elements that contributed to the evolution of inertia over time, a period before Newton, with Galileo and Descartes and a moment after with Einstein. Thus, it was possible to know and identify the solution to the concept of inertia and the bucket experiment proposed by Newton, after assuming the idea of an absolute space, the origin of the concave shape of the water. It can be seen that Newton was completely wrong and the shape of the water is explained by Stevin through his law that inserts a rotating liquid surface, in the same way that he gets an answer to the question "Is the inertia of a body dependent on its energy content?", through Einstein's mass-energy equivalence principle.

**Keywords:** Inertia. Newtonian mechanics. Absolute space. Mach's principle. Newton's Bucket Experiment.

## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Representação Esquemática do experimento do balde Newton..... | 54 |
| Figura 2 – Representação Esquemática do Pensamento de Mach.....          | 57 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**SciELO** – Scientific Eletronic Library Online

**CBEF** - Caderno Brasileiro de Ensino de Física

**RBEF** - Revista Brasileira de Ensino de Física

## SUMÁRIO

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                        | <b>13</b> |
| 1.1. OBJETIVOS .....                                                              | 15        |
| 1.1.1. Objetivos gerais .....                                                     | 15        |
| 1.1.2. Objetivos específicos .....                                                | 16        |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                                | <b>17</b> |
| 2.1 Considerações Preliminares .....                                              | 17        |
| 2.2 Origem do Conceito de Inércia .....                                           | 19        |
| <b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>                                       | <b>21</b> |
| <b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTADO DA ARTE .....</b>                            | <b>25</b> |
| <b>5. ELEMENTOS HISTÓRICOS DO CONCEITO DE INÉRCIA .....</b>                       | <b>38</b> |
| 5.1 Conceito de Inércia em Galileu e Descartes .....                              | 44        |
| 5.2 Mecânica newtoniana e o conceito de inércia.....                              | 47        |
| 5.2.1. Experiência do Balde de Newton .....                                       | 52        |
| 5.2.1.1. Críticas de Ernst Mach a concepção newtoniana de inércia.....            | 59        |
| 5.2.1.2. Afinal de contas qual a solução para o problema do balde de Newton ..... | 61        |
| 5.3 A inércia na teoria da relatividade .....                                     | 63        |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                              | <b>67</b> |
| <b>7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                           | <b>69</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A história da ciência foi marcada e caracterizada por uma série de discussões conceituais, de cunho filosófico, muitas vezes uma análise mais profunda sobre conceitos inicialmente aceitos. Discussões acerca dos fundamentos de modelos cosmológicos, a exemplo da mudança proporcionada pelo advento do modelo heliocêntrico, foram fundamentais para o surgimento da Física como a conhecemos hoje e, com ela, surgem debates relacionados a conceitos como o da inércia, experiência do balde de Newton e consequentemente tudo que envolve o debate sobre a formação da concavidade no interior do balde, ou seja, da existência ou não do espaço-tempo absoluto.

A compreensão histórica do conceito de inércia dar-se na medida em que se percebe a sua evolução, seja enquanto pensamentos ou como ponto fixo com caráter de mudança, de concepções e na maneira de enxergar a ciência, estudá-la pode abrir diferentes caminhos. Estudar o conceito de inércia é crucial para entender suas origens e os métodos empregados nas eras de Aristóteles, Galileu, Descartes, Newton e Einstein

Em linhas gerais, o estudo da inércia vem do desejo de saber o que leva um dado corpo a se mover e o que não promove esse movimento. Percebe-se que ela é elemento base para explicação em torno da quantidade de matéria e força aplicada a um corpo, o que vai discernir se um corpo está em repouso ou em movimento uniforme.

Desta forma fica evidente a importância do conceito de inércia, bem como os movimentos dos corpos,

[...] Estudando os movimentos dos corpos podemos entender as causas dos movimentos, podemos prever os possíveis movimentos e podemos projetar máquinas que executam determinados movimentos. [...]

O movimento é onipresente, integrando a mecânica clássica a diversas outras áreas da ciência. O movimento é crucial para os animais que estão na natureza, lutando pela sobrevivência. O predador precisa correr mais que a presa, e a presa precisa escapar do predador. Ambos precisam percorrer o espaço, em busca de abrigo, de água e alimentos. A biomecânica integra os fundamentos da mecânica clássica com os da biologia para entender esses movimentos. Os seres humanos precisam se mover e para isso inventaram várias máquinas que facilitam essa tarefa, desde a simples roda até o avião. A mecatrônica, e várias outras engenharias, integram os fundamentos da mecânica clássica com os do eletromagnetismo, da eletrônica e da computação para projetar e produzir essas máquinas. (REDINZ, 2021, p.1).

A medida da quantidade de inércia está associada à relação existente entre a inércia e a massa, o que pode diferenciar entre um corpo com maior massa e outro com número de massa

menor e consequentemente o seu estado de momento, ou seja, a origem da inércia se deu por conta da necessidade de estudar o movimento. O conceito de inércia também torna-se primordial para a explicação da relatividade restrita de Einstein, quando o assunto engloba a equivalência da massa e da energia, logo após Newton.

O experimento do balde de Newton também foi fundamental para a discussão da ciência, ainda que fosse um experimento de simples execução, a interpretação envolta dela está associado a uma gamificação de ideias, no que concerne a formato côncavo da água do interior do balde. Newton fala da possibilidade de haver um referencial absoluto o qual compunha o espaço absoluto, isto é, na visão de Newton a mudança do formato que se dá à superfície da água após a corda que segura o balde ser retorcida e logo depois solta, era efeito do espaço absoluto. Uma das consequências julgada pelo Newton como fundamental para entender essa sua abordagem foi a definição de tempo-espaço absoluto, constrói toda uma teoria para descrever o movimento dos corpos e acreditou que seria necessária a adição desse termo, como ele expõe no texto para explicar e diferenciar movimento relativos dos absolutos e uma forma de defender a existência do espaço absoluto foi a proposta do experimento do balde de Newton, proposto por ele (ver, por exemplo, Gardelli, 1999,p.46).

É sempre bom ressaltar que Newton define o que é espaço absoluto, sobre severas críticas e propõe uma experiência para reafirmar a sua composição sobre o tema, uma vez que a definição de espaço-tempo absoluto está presente no seu livro Principia.

A experiência mostra que, se o balde for posto a girar em relação a Terra, então, gradativamente, a água também entrará em rotação e passará a se afastar do meio do recipiente e subir pelos seus lados, assumindo uma forma côncava (ação de uma aparente força centrífuga). De acordo com Newton, esse efeito só é possível devido à rotação da água em relação ao espaço absoluto, e não em relação ao balde, à Terra ou às estrelas fixas. Dessa maneira, se o balde com água estivesse em repouso em relação ao espaço absoluto e todo o restante do universo estivesse em rotação em relação a ele, a superfície da água continuaria plana. Newton conclui então que a formação da concavidade na água do balde é o dado experimental que nos permite distinguir entre um movimento relativo qualquer e aquele feito com relação ao espaço absoluto. (GRACIA, 2019, p. 2)

Segundo Martins (2015, p.37), tanto a definição de espaço-tempo absoluto como a explicação que ele dá para a curvatura da água na experiência do balde de Newton, foram criticadas por G. Berkeley (1685-1753), G. W. Leibniz (1646 - 1716) e o principal deles, Ernst Mach (1838-1916). Mach argumentava que a matéria só poderia dialogar com matéria e não com espaço, dando início a uma discussão que duraria muito tempo.

O argumento desenvolvido por Newton foi usado a fim de derrubar a concepção relacional do espaço. Esse argumento resistiu durante muito tempo e ao menos Leibniz e Berkeley não conseguiram mais se opor eficientemente a ele. O sucesso experimental da teoria da gravitação universal também serviu para calar eventuais críticos. (GRACIA,2019, p. 2)

O presente texto irá discutir sobre a evolução histórica da inércia, esboçando aspectos importantes como a origem da inércia e seus conceitos, mostrando diferentes perspectivas, na visão de outros estudiosos como de René Descartes e Galileu Galilei, além de Newton e Einstein. A importância da inércia para o desenvolvimento da mecânica newtoniana, bem como para explicação de elementos que englobam a inércia como força e massa. A existência de um espaço absoluto e a reafirmação de Newton com a experiência do balde que leva o seu nome. Por fim, é tratado as objeções de Ernst Mach quanto a concavidade da água e o espaço-tempo absoluto admitida por Newton.

A monografia foi dividida em sete capítulos, o primeiro é a Introdução, no qual foram expostos dados mais gerais da inércia, objetivos gerais e específicos da pesquisa. O segundo capítulo é o Referencial Teórico, o qual foi dividido em duas seções, Considerações Preliminares e Origem do Conceito de inércia. No terceiro capítulo é explanado os Procedimentos Metodológicos que foram utilizados para essa pesquisa. O quarto capítulo apresenta a Revisão Bibliográfica/ Estado da Arte, onde foram discutidos os principais artigos utilizados na pesquisa. O quinto capítulo intitulado como Elementos Históricos do Conceitos de Inércia, o qual foi dividido em seis seções, Conceito de inércia em Galileu e Descartes, Mecânica newtoniana e o conceito de inércia, experiência do balde de Newton, Críticas de Ernst Mach a concepção newtoniana de inércia, Afinal de contas qual a solução para o problema do balde de Newton e A inércia na Teoria da Relatividade, discutindo pontos importantes para trabalho do desenvolvimento da inércia ao longo do tempo, assim como temáticas que envolvem a mecânica newtoniana. As Considerações Finais estão compreendidas no capítulo seis e em seguida vêm as Referência Bibliográfica no capítulo sete.

## **1.1.OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivos gerais**

Examinar ao longo da história os elementos que contribuíram para o desenvolvimento do conceito de inércia, explorando e analisando a evolução da inércia, bem como sua origem e

seus respectivos questionamentos e perspectivas, passando por físicos que deram importantes subsídios para a ciência, antes de Newton como, Aristóteles Galileu, e Descartes ou mais tarde com Albert Einstein.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Investigar a origem da inércia e a importância dela para a mecânica newtoniana;
- Analisar a evolução historicamente da inércia, antes de consolidada por Newton;
- Entender os conceitos fornecidos por Isaac Newton sobre a força e massa;
- Discutir a experiência do balde de Newton, espaço absoluto, formato côncavo da água no balde;
- Analisar as críticas emitidas por Ernst Mach em respeito do experimento do balde de Newton;
- Por fim, verificar do ponto de vista da Relatividade restrita de Einstein com a inércia.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Considerações Preliminares

Observar o comportamento de objetos em movimento em diferentes situações de diferentes ângulos abre uma infinidade de interpretações. O ponto de partida para a compreensão de tal evento envolve o entendimento de conceitos que envolvem nosso cotidiano, como: de um corpo em movimento e definição do que é inércia. Sim, definir adequadamente as coisas facilita (e é uma necessidade) o desenvolvimento de modelos para se descrever os fenômenos naturais. A maioria dos cientistas se vê nessa perspectiva, na qual a razão e a intuição falam mais alto.

Um dos conceitos que surgem da mecânica de Newton é o de referencial inercial. Trata-se de um referencial (sistema de referência) em movimento retilíneo uniforme (i.e., com velocidade constante) em relação ao referencial do espaço absoluto. As leis da mecânica clássica são invariantes ante mudanças de referenciais inerciais: eis o princípio de relatividade “galileano”. (PESSOA Jr, 2019, p. 88).

De fato, a mecânica newtoniana traz bastante indagações com base nas suas experimentações. Isaac Newton, no seu celebre livro *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, também conhecido por *Principia*, esboça definições acerca de leis que favorecem o pensamento criativo, pois instigam a reflexão de temáticas como: inércia, referencial absoluto, referencial relativo, espaço absoluto, espaço relativo e movimentos dos corpos. Leis que fundamentam e caracterizam a chamada interação entre os corpos, assim como o movimento deles. Sobre a mecânica newtoniana, Porto e Porto (2008) comentam:

[...]a obtenção da trajetória de um corpo em movimento depende, não apenas do conhecimento das forças às quais está submetido, mas também de certas condições a respeito de sua posição e sua velocidade. Com efeito, a Segunda Lei de Newton estabelece que a aceleração adquirida por uma partícula é proporcional à resultante das forças que atuam sobre ela, sendo o fator de proporcionalidade dado pelo inverso de sua chamada massa inercial. Em termos mais elaborados, a Segunda Lei de Newton relaciona a aceleração, derivada segunda da função posição em relação ao tempo, à soma vetorial das forças que atuam sobre o corpo. Equações que envolvem derivadas de uma função são chamadas de equações diferenciais. Solucionar estas equações consiste em encontrar a função cujas derivadas obedecem à relação dada. (p.2)

A mecânica newtoniana descreve as relações entre forças, massas e movimento de maneira natural. A observação é, portanto, um aspecto fundamental e primitivo ao qual se aplicam as leis de Newton. Com relação as leis de newton Porto e Porto (2008) descreve:

[...]as Leis de Newton constituem uma verdade física, todos aqueles que se movam com velocidade constante em relação a ele também serão inerciais, ao passo que aqueles que se moverem com aceleração não nula em relação ao primeiro serão não inerciais. (p.2 e 3)

Remetendo-se a conformidade em que o espaço absoluto está sendo analisado. Percebe-se que explicita-lo é muito conveniente, visto que, ao entrar nessa abstração e tentar entendê-lo é uma questão de muita complexidade. Segundo Isaac Newton (2022, p.45) “O espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa que seja exterior, permanece sempre semelhante e imóvel.” A concepção de Newton não foi bem recebida por alguns cientistas da sua época como: Berkeley, Leibniz e Ernst Mach, pois não acreditavam em um espaço absoluto sem a aparição da matéria. Ernst Mach foi quem melhor confrontou as ideias de referencial absoluto na ausência de matéria, dita por Newton. Mach acreditava em um espaço dito como relativo em que haveria uma interação gravitacional com a matéria, a partir daí que se chegou no chamado princípio de Mach.

[...]o filósofo austríaco Ernst Mach era frontalmente contrário à ideia de movimento absoluto, fundamentada, por sua vez, na de espaço absoluto, tal como concebida por Newton. Em seu livro, *As Origens da Mecânica*, Mach apresentou seu pensamento de que toda determinação do movimento deve ser feita em relação aos corpos existentes. Em outras palavras, Mach rejeitava a noção presente na mecânica newtoniana de que a distinção entre as duas classes de observadores, inerciais e não inerciais, poderia se fundar no fato de os segundos se moverem com uma aceleração em relação ao espaço absoluto, enquanto os primeiros se moveriam com velocidade constante em relação a esse espaço. Como alternativa a essa concepção, Mach propunha que o caráter inercial (uniforme) ou não (acelerado) do movimento se definisse, não em relação a um espaço absoluto, inalcançável pela percepção direta, mas em relação a um referencial associado ao centro de massa de todas as partículas materiais existentes no Universo. Este pensamento ficou conhecido na história da ciência como princípio de Mach. (PORTO, PORTO, 2008, p.6)

A história da mecânica newtoniana pede passagem e mostra suas virtudes, conceitos e características em torno de fenômenos que são presenciados no dia-a-dia, como no exemplo do ônibus em movimento e seus referenciais, seja visto de fora ou do interior. A experimentação e observação são formas de obter melhores respostas até hoje. Portanto, analisar e discutir fisicamente o passo a passo de sua beleza é muito importante para obtenção de conhecimento assim como para a evolução histórica. As críticas durante toda história é o que faz a ascensão do nome, da física, matemática e filosofia, do cientista de modo geral, pois cientistas vão tentar rebater dada teoria, porém o que vai valer é sempre a última referência ou melhor dizendo o que melhor argumentar sobre.

## 2.2 Origem do Conceito de Inércia

Compreender como tudo começou é certamente uma das tarefas mais árduas do mundo, pois mexe com o imaginário, emocional, tempo, espaço e sobretudo com a história. A origem de cada objeto, monumento, bactéria tem a ver com seu processo construtivo/evolutivo, na física não é diferente. No que refere-se a inércia pode-se dizer que houve um processo construtivo em que ela foi ganhando cada vez mais destaque, visto que, a inércia está presente essencialmente em um estado em que um corpo ou um dado objeto se encontra, seja em repouso ou em movimento retilíneo uniforme.

Não é de hoje que se busca respostas quanto a sua origem e qual era a realidade proposta no que diz respeito a sua atuação. Antes mesmo de Isaac Newton (1642-1727) sintetizar a ideia do conceito de inércia e definir a sua composição quanto a mecânica clássica, outros cientistas percorriam caminhos para dar margem ao conceito de movimento, tal como a definição de inércia. O chamado movimento natural é discutido pelo filósofo Aristóteles no que se sugere ser a inércia, como um movimento especial de uma forma não forçada que o corpo tem.

Os escritos aristotélicos permitem delinear a sua elaborada concepção de movimento, possibilitando uma reflexão acerca da inércia, embora Aristóteles nunca tenha utilizado esse termo (ele não tinha uma noção de inércia como uma propriedade do movimento, ao contrário de Galileu). De fato, a inércia (persistência do movimento) não está elencada como um dos princípios internos do movimento, conforme vimos acima. Ademais, Aristóteles não compartilhava da ideia de que o movimento pudesse persistir por si só, afirmando que este era uma mudança de “alguma coisa para outra coisa”, ou seja, algo que possuía um início e um fim (momentâneos), tese diferente daquela defendida na modernidade, quando o movimento foi definido simplesmente como um estado. (SIMON; RESENDE, 2018, p.243).

A origem da inércia absorve uma série de situações em que ela perpetua, como por exemplo, do conceito de força, massa inercial, referenciais inerciais, não inerciais, a validade das leis do movimento, em outras palavras, remete aos conceitos newtonianos. Entra neste contexto também o princípio de Mach, que se deu por conta de uma objeção a narrativa construída por Newton em uma de suas experiências a qual discutia a respeito da existência de um espaço absoluto. O físico e filósofo austríaco Ernst Mach não concordava com tal interpretação dos resultados do experimento, pois o que se coloca em questão era a ausência de matéria, o que possibilitou análise dele sobre o que vem a ser inércia. Como bem salienta Gardelli (1999, p.49) “[...]Mach entendia a inércia como sendo uma força de interação gravitacional entre os corpos materiais e o conjunto das estrelas fixas[...].”

Isaac Newton em seu livro *Princípios: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, fomenta sobre diversos aspectos dos movimentos dos corpos e da sua lei da gravitação universal, explicando as suas causas e aplicações. Em uma de suas leis do movimento, comumente chamada de leis de Newton, define sua primeira lei como sendo princípio da inércia. Quanto a sua primeira lei Newton (2022, p.53) revela, “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele. ” Na primeira lei de Newton há definição de uma classe de referenciais inerciais porque afirma que toda partícula livre no universo só pode estar em repouso ou no referencial inercial MRU. O princípio da inércia foi o ponto de partida para se obter as outras leis, princípio fundamental da dinâmica e a última, princípio da ação e reação. Ainda que as leis de Newton só valham para referenciais inerciais, ainda que possa escrever as leis de Newton em referenciais não inerciais. Pode-se dizer que a mesma contribui para a análise gravitacional quando o assunto é força.

A importância da lei da inércia é clara, em particular, na construção da lei da gravitação universal newtoniana. De facto, a gravidade só pode ser encarada como uma força se se imaginar que, na sua ausência, os planetas seguiriam trajetórias retilíneas e uniformes. Como esse não é o caso, deduz-se a natureza da força gravítica tendo em conta as trajetórias observadas (cónicas), como desvios das trajetórias inerciais. (XAVIER, 2015, p. 6-7).

A ilustre experiência do balde, por exemplo, os movimentos ditos por Newton como absolutos será diferente do relativo devido à ação da força inércia. Apesar de Tempos depois o Ernst Mach alegar haver movimentos relativos e não absolutos como argumentava Newton, no entanto, se discute o antes e depois da rotação, do giro da corda que segura o balde, seja ele no sentido horário ou não. É assim que Newton observa a presença de uma curvatura da superfície da água em relação a um espaço absoluto. Newton discorre sobre o referencial não-inercial quando fomenta que o efeito que explica a concavidade formada na superfície do balde é provocado por existir um espaço absoluto, todavia essa argumentação é rodeada de críticas. Sobre isso Xavier (2015, p.8) argumenta: “Se é verdade que esta explicação de Newton revela algo muito importante sobre a natureza do movimento, não é verdade que ela resolva o enigma do espaço absoluto. ”

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente pesquisa científica é de revisão bibliográfica, esse gênero de pesquisa segundo Gil (2002) requer do investigador uma visão ampla dos fatos e acontecimentos que estão além do tempo. Na pesquisa de revisão bibliográfica é possível utilizar dados históricos, com vantagens de serem colhidos em diversos materiais, tal e qual, livros, revistas e artigos. Para Severino (2013) há aspectos imprescindíveis para quem se utiliza da pesquisa bibliográfica:

A pesquisa bibliográfica é aquela que se realiza a partir do registro disponível, decorrente de pesquisas anteriores, em documentos impressos, como livros, artigos, teses etc. Utiliza-se de dados ou de categorias teóricas já trabalhados por outros pesquisadores e devidamente registrados. Os textos tornam-se fontes dos temas a serem pesquisados. O pesquisador trabalha a partir das contribuições dos autores dos estudos analíticos constantes dos textos. (SEVERINO, 2013, p.95).

A pesquisa é elaborada com base no levantamento bibliográfico, isto é, onde a busca por informações torna-se indispensáveis, independentemente dos métodos empregados. Dessa maneira, a investigação é uma interessante aliada para esclarecer características preponderantes para o desenvolvimento do texto científico.

[...], seria impossível a um pesquisador percorrer todo o território brasileiro em busca de dados sobre população ou renda per capita; todavia, se tem a sua disposição uma bibliografia adequada, não terá maiores obstáculos para contar com as informações requeridas. A pesquisa bibliográfica também é indispensável nos estudos históricos. Em muitas situações, não há outra maneira de conhecer os fatos passados se não com base em dados bibliográficos. (GIL et al., 2002, p.45).

Para tanto, o estudo sobre o desenvolvimento histórico da mecânica newtoniana será edificado através de uma pesquisa exploratória e descritiva, com a perspectiva de gerar conhecimento e desenvolvimento de conceitos que constitui a problemática da pesquisa. Precisamente por este motivo que a pesquisa é baseada na investigação de textos contidos em artigos, livros, resenhas e teses para um melhor estudo e aproveitamento dos fenômenos a serem observados, tal como, o experimento do balde de Newton, espaço absoluto, inércia e seus conceitos etc. O que concerne em dialogar sobre as principais características que possibilitaram o desenvolvimento da mecânica newtoniana. Gerhardt e Silveira (2009, p.35) afirmam quanto a pesquisa exploratória o seguinte: “Este tipo de pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torna-lo mais explícito ou a construir

hipóteses.” Por ser também de caráter descritiva, o texto pode mostrar a aproximação entre as variáveis contidas na pesquisa e a natureza das suas associações, em outras palavras, consentir a proximidades dos termos científicos. Na mecânica newtoniana, existem inúmeras associações, uma delas é a de que a inércia está ligada a massa, isto é, a inércia é descrita como algo que inviabiliza o seu estado natural, no sentido de estar em movimento ou em repouso, e a massa pode facilitar ou não o seu movimento.

As pesquisas também podem ter uma abordagem qualitativa e quantitativa, na pesquisa qualitativa:

A pesquisa qualitativa não se preocupa com representatividade numérica, mas, sim, com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização, etc. Os pesquisadores que adotam a abordagem qualitativa opõem-se ao pressuposto que defende um modelo único de pesquisa para todas as ciências, já que as ciências sociais têm sua especificidade, o que pressupõe uma metodologia própria. (GERHARDT; SILVEIRA, 2009, p.31).

Já na pesquisa quantitativa, o pesquisador procura algo que pode ser quantificado, ou seja, focaliza na análise numéricas e na objetividade. Segundo Gerhardt e Silveira (2009, p.34) “[...]contudo, os elementos fortes de um complementam as fraquezas do outro, fundamentais ao maior desenvolvimento da Ciência.” A nossa pesquisa se enquadra na qualitativa, pois busca compreender e investigar a história da mecânica newtoniana, movendo-se através da evolução e dos conceitos. Como já foi dito anteriormente, a pesquisa atua sob elementos textuais como: artigos, livros, revistas, jornais e periódicos. Entende-se que a exploração desses registros é essencial para obtenção de esclarecimentos acerca de fenômenos naturais do ponto de vista histórico.

A princípio foi feita investigações por meio de artigos que conversava com a temática da pesquisa, isto é, mecânica newtoniana. No segundo momento utilizou-se da tese que fomentava em trecho sobre buraco negro newtoniano, a fim de ser usado como instrumento associativo para a mecânica de Newton, no que refere-se a sua história. Posteriormente a esse momento foi feita a exploração em revistas que dialogavam com a história de Newton, atrelado com os seus experimentos, conceitos e leis que regiam o movimento dos corpos. Por fim, houve a busca em livros que comportavam a mecânica de Newton, dentre eles, a obra mais conhecida de Newton, Principia, onde exerceu um grande papel para elaboração e desenvolvimento da pesquisa, ou seja, em sua essência. No que se refere as informações requeridas para confecção do trabalho científico e acadêmico, foram tomados como base a Revista Brasileira de Ensino de Física, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Scientific American do ano 2007,

onde tinha bastante material histórico a respeito do autor procurado, isto é, do físico e matemático Isaac Newton, além das revistas pronunciadas acima, o caminho percorrido para busca minuciosa por materiais que se adequasse ao tipo de pesquisa foi através de plataformas online, na biblioteca online Scientific Electronic Library Online, popularmente conhecido por SciELO e também no Google Acadêmico. O ponto primordial ou melhor dizendo as palavras-chaves para procura dos elementos de interesse para a pesquisa foram definidas no primeiro momento da pesquisa e são adjacentes à mecânica newtoniana, experiência do balde de Newton, espaço absoluto, origem da inércia e críticas de Ernst Mach.

Os artigos analisados para elaboração da pesquisa continham em sua estrutura várias referências do que se queria examinar, como por exemplo, no artigo intitulado “A Origem da Inércia” do autor: Daniel Gardelli, publicado em 1999, o qual informava muitos pormenores do espaço absoluto, das famosas leis de Newton, além da origem da inércia que leva o nome do título do artigo. O referido artigo ainda esboça e descreve a discussão em que se insere a experiência do balde, expondo as críticas do físico austríaco Ernst Mach.

Um artigo posterior ao de Daniel Gardelli e que também mostrou e descreveu uma bela elucidação a respeito da ideia de pesquisa que se queria foi, o artigo nomeado de “O experimento do balde girante de Newton: muitas perguntas, poucas respostas”, do autor: Luciano Carvalhais Gomes, de 2007, onde se buscava respostas a respeito da famosa experiência de Newton, quanto ao balde. Nessa linha de pensamento, buscou-se em Assis (2001) no artigo “Comparação entre a Mecânica Relacional e a Relatividade Geral de Einstein”, algo que nos outros textos não tinha. Tendo como pano de fundo a experiência do balde de Newton, da mecânica relacional até a relatividade de Einstein, como comparação.

No artigo “O conceito de Massa. I. Introdução História”, publicado em 1993a, Jorge Antônio Valadares, na primeira parte, caminha por motivos que engloba a evolução da massa relativista, a dependência da velocidade, além das ligações que existem com o físico Albert Einstein.

Valadares (1993b), no seu trabalho conhecido por “O conceito de Massa. II. Análise do Conceito”, na parte 2 ele argumenta sobre a concepção de massa, como termo dependência da velocidade. O aumento da velocidade está ligado ao crescimento da força aplicada a uma partícula, em um certo intervalo de tempo.

No que concerne a investigação em Revista de cunho científico, a Revista Scientific American (2007), a revista é inteiramente dedicada a história de Isaac Newton, teve grande

relevância para fins de obter informações pertinentes acerca da vida e obra de Newton, como a mais importantes delas, conhecidas como leis do movimento. Em seguida, várias referências no que diz respeito a mecânica newtoniana foram analisadas e aproveitadas, livros como: “Curso de Física básica Mecânica 1”, de Herch Moysés Nussenzveig, edição de 2013, sendo não só discutidas a mecânica de Newton como as figuras postas sobre a experiência do balde de Newton. No livro nomeado, “Commentariulus de Nicolau Copérnico” de 2003, na sua 2ª edição, trazendo à tona hipóteses acerca do movimento celestes, bem como, do sistema cosmológico defendido pelo Copérnico, no que diz respeito ao movimento dos astros e também sobre a teoria Ptolomaica, ou seja, sobre a revoluções dos orbes celestes. Ainda sim nas investigações feita em livros, no livro “Cosmologia” de Mário Novello, publicado em 2010, permite ao leitor ter um promissor entendimento a respeito da cosmologia, modelos cosmológicos.

No livro intitulado “Gravitação & Cosmologia”, do ano de 2009, de Antônio Manuel Alves Morais, traz elementos que fazem parte da evolução histórica dos conceitos newtonianos, dentre eles como se deu a formatação da lei da gravitação universal de Newton e aspectos introdutórios da cosmologia.

Todas as referências serviram como constituintes para formação bibliográfica deste projeto científico e que influenciou na confecção dessa monografia. Por fim, se fez presente a obra prima de Newton, a principal fonte para construção dessa monografia, o livro intitulado Princípios Matemáticos de Filosofia Natural ou simplesmente principia, edição do ano de 2022, onde trazia consigo informações cruciais para elaboração deste texto, como por exemplo dos principais conceitos que regem a mecânica newtoniana, inércia, espaço absoluto, leis do movimento, tempo absoluto e movimento relativo. Sem dúvidas todos os documentos verificados e investigados foram de muita relevância de um modo generalizado, pois foi partir deles que se teve uma ideia de como fazer a monografia a respeito da mecânica de Newton.

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTADO DA ARTE

Foi realizado o levantamento de trabalhos científicos referente ao estudo sobre a evolução histórica do conceito de inércia. O Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), Revista Brasileira de Ensino de Física (SBEF) e Revista de Ensino de Ciências e Matemática (Acta Scientiae), formam algumas das bases onde foram investigadas. Sabe-se bem que os artigos consultados seguem uma cronologia sobre referências, tentando identificar o ponto de partida da inércia e suas atribuições.

O artigo denominado “A Origem da Inércia” do autor: Daniel Gardelli, publicado em abril de 1999, discorre pela história para tentar desvendar a origem da inércia e mostrar conceitos regem a mecânica newtoniana. Para isso, Gardelli põe as mãos na obra de Isaac Newton, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, vulgo *principia*, publicado em 1687. O artigo aborda conceitos relevantes da chamada mecânica newtoniana que dialogam com a fomentação da possível origem da inércia, tais como: conceitos de massa inercial, espaço absoluto, referenciais inerciais e não inerciais. Não se pode esquecer também das leis de Newton, suas definições e condições para que ocorram. Elas são nomeadas deste modo: princípio da inércia ou primeira lei de Newton, princípio fundamental da dinâmica ou segunda lei de Newton e princípio da ação e reação ou terceira lei de Newton.

No decorrer do texto ele destaca os vis ínsita, relatado no livro *Principia*, como uma propriedade intrínseca dos corpos materiais ou comumente chamado de inércia, o qual pode ser medida pela massa inercial, o que explica o estado de um corpo de continuar em repouso ou em movimento retilíneo. Logo em seguida, é explicado o que é a massa inercial, sendo a capacidade de resistência que os corpos têm a mudança de estado e argumenta sobre o aumento de um corpo têm de resistir ao seu estado, caso haja o aumento da sua massa inercial, claro que com a atuação de uma possível força, dessa forma, a aceleração diminuiria no que tange ao referencial inercial. Percebe-se, que no texto um conceito leva a outro. Na tentativa de entender um conceito significativo da mecânica de Newton, o de referencial inercial, Gardelli vai à procura de uma experiência realizada por Newton, o experimento do balde de Newton.

O experimento consistiu em colocar água no interior do balde, estando seguro por uma corda, onde a água e o balde se encontravam em repouso em relação a Terra, inicialmente a água se encontrava plana junto a superfície, porém, em seguida rotacionou a corda e junto com a corda, o balde e água também giraram, também em relação a Terra e percebeu que formou

uma concavidade na superfície da água. O experimento levou a vários questionamentos/situações, pois o que teria ocasionado a concavidade da superfície da água? Sobre a concavidade da água, foram levantados vários questionamentos como por exemplo: situação de número um: a concavidade teria sido provocada pela rotação em relação ao balde? segunda causa da era em relação à Terra? terceira, seria em relação as chamadas estrelas fixas? Percebeu que a primeira situação não era levada em conta, pois não havia movimento relativo entre ambos, seja qual for a força aplicada do balde na água, ela será mesma, porque a água continuará em repouso. Na segunda situação, percebe-se que a Terra não pode ser vista como possível causadora da concavidade, visto que a força exercida pela Terra é atrativa para baixo e não com as paredes do balde. A terceira e a última que sugere o movimento relativo às estrelas fixas o autor do artigo cita uma fala presente em Principia, abordando a respeito do movimento relativo quando era máximo ou mínimo, de início não há esforço para o afastamento da água para sua borda, mantendo a superfície plana. O contexto se alterava quando o movimento relativo diminuía e mostrava a tendência de se afastar do eixo de rotação, aparecendo um movimento circular real. No entanto, a rotação relacionada as estrelas fixas não poderia responsabilizada como a causa do formato côncavo da superfície da água, isso poderia ser verificada por meio da lei da Gravitação Universal, cujo cálculo indica que a força resultante sobre um corpo no interior de uma casca esférica é igual a zero, a rotação não depende da velocidade ou da aceleração.

A oposição a concepção de espaço absoluto, consistia em dizer que a matéria só poderia comunicar-se com matéria no espaço, dessa maneira poderia ver a importância da massa para com o universo. Diferentemente de Mach, Newton acreditava que a inércia era uma particularidade intrínseca da matéria. O assunto se tornou tão grande que até Albert Einstein teve interesse em analisar, porém ele via os argumentos consistentes de Mach com caráter qualitativo.

No trabalho intitulado “O experimento do balde girante de Newton: muitas perguntas, poucas respostas”, do autor: Luciano Carvalhais Gomes, publicado em 2007, discute sobre o famoso experimento de Newton, espaço absoluto, inércia e busca soluções para determinadas questões. O presente artigo vem com o desígnio de analisar com criticidade em um primeiro momento as leis que ditam o comportamento de um corpo quanto a variação de posição, assim como, expor a ideia do experimento do balde girante de Newton ou comumente conhecido, balde de Newton.

Em seguida tem-se um breve contexto histórico a respeito da vida do físico e matemático Isaac Newton, relata o momento que ele ingressa na universidade do Reino Unido, mais precisamente Cambridge. Neste contexto, a filosofia espalhada por Aristóteles e outros autores como: René Descartes (1596 - 1650), Robert Boyle (1627 - 1691) e Pierre Gassendi (1592 - 1655) eram bem recebidas, pois era uma forma de estruturar sua mente filosoficamente. O escólio das leis de Newton, presente no famoso livro *Principia* de Newton, é detalhado as famosas definições acerca das leis da mecânica, isto é: vis insita, força imprimida, força centrípeta etc. Além disso, relata a importância da força centrípeta e sua peculiaridade de manter os corpos em órbita em relação aos corpos terrestres. Ao longo do artigo são relatados pontos preciosos para compreender a experiência do balde de Newton, como: tempo absoluto, tempo relativo, espaço absoluto e sua importância para entender melhor as leis que regem a mecânica newtoniana.

Para poder analisar a experiência do Balde de Newton ou balde girante e o espaço absoluto exposta por Newton, foi necessário entender características das leis da mecânica. Por isso, que deu-se o exemplo de um trem se deslocando com velocidade constante a partir de um espaço absoluto, a fim de dialogar com o leitor. Dentro do trem visualizava-se uma caixa sob uma superfície lisa e que se mexia de forma natural. No entanto, não foi possível enxergar o tipo de força e pudesse alterar o seu estado, o exemplo dado não poderia ser explanado por meio das três leis de Newton. Decerto, de acordo com o autor, pensou-se em uma violação da terceira lei, da ação e reação, porém, foi notório a atuação do movimento relativo e não verdadeiro. A ideia que se teve foi que ambos, o trem e a caixa de madeira estavam em movimento retilíneo uniforme sob ação do espaço absoluto, tendo um chamado movimento verdadeiro. Aceitando que variou sua velocidade e, portanto, acelerou, isso devido a atuação de forças externas, fez a caixa continuar no mesmo estado, por inércia, demonstrando a contradição do conceito de espaço absoluto. Nota-se o que faz com que o sistema se mova é a forças externas, elas é que realmente importam, exceto que a lei de ação e reação estejam erradas. No sistema todo é o trem que está dentro dele, o que se tira dessa análise é, até onde a terceira lei de Newton vale, chega à conclusão de que se existe forças externas o sistema todo acelera, se ele se move com velocidade constante não tem forças externas. Quando Newton admitir a existência do espaço absoluto usando o exemplo da caixa, ele viola por absurdo esta lei.

No que concerne a experiência do balde de Newton, a superfície da água com o formato côncavo é provocada em decorrência do balde evitar a passagem da água, por inércia, como é na primeira lei de Newton, claro em relação a um espaço absoluto. Diferente de quando o

movimento era relativo em que a água e o balde tendia aficar em repouso. Nesse ponto tinha o surgimento da força de inércia ou força fictícia, quando se colocou a água em movimento em relação ao balde, tendo assim uma certa analogia a caixa de madeira presente no trem. A ideia de Gardelli (2007), está interligada com movimento circular relativo, visto que o balde e a água sendo posta em giro com velocidade angular constante e em relação a um espaço absoluto, a velocidade relativa é nula e não irá provocar a eliminação da força de inércia.

Ao longo dos anos houve outras interpretações acerca do experimento, os chamados críticos e analistas que certamente contribuíram para o crescimento da ciência, bem como o crescimento da história. Muitos estudiosos foram em busca de respostas acerca da experiência do balde, em especial Fitas, Neves e Assis. O primeiro imaginava um outro molde semelhante ao balde, o segunda afirma que o Newton queria a confirmação da ideia do espaço absoluto e Assis, o engano quanto ao mecanismo relacional no que diz respeito a força, mesmo tendo o princípio de Mach como fonte. Esses estudiosos também procuraram seu mais famoso crítico, Ernst Mach e buscaram algo para tomar como base, a massa inercial, densidade e referencial inercial para poder discorrer sobre o experimento. Uma outra questão comentada por Gardelli é a respeito da relatividade geral e a tentativa de Albert Einstein acrescer as concepções de Ernst Mach, pois o princípio de Mach era apoiado em quatro consequências que se destacavam, baseadas em: com relação a inércia, a inércia aumentaria com aumento da massa, a segunda consequência estava ligada as massas dispostas ao lado do corpo acelerariam com, visto que resultaria numa força que aceleraria no mesmo sentido, a terceira correspondia a um corpo em rotação que formaria um campo de forças de forças centrífugas e um campo de coriólis, deslocados no sentido que ocorria a rotação e a última consequência está atrelada a ideia de que a inércia de qualquer corpo/objeto teria que ser acompanhado das interações com outra massas do universo. Por fim, tem-se o relato de uma mecânica relacional em que ela provocaria uma revolução em aspectos da física que está apoiada em questões filosóficas de uma maneira qualitativa e voltada para grandezas relativas, qualitativa as abstrações ao princípio de Mach.

Nesse trecho vai ser analisada a obra máxima de Newton 2ª edição, em especial as páginas que vai da 44 a 51 do livro “Principia: Princípios Matemáticos da Filosofia Natural” de Isaac Newton (2022), ele traz átona aspectos importantes para com a composição da mecânica clássica, discute tópicos relevantes no que concerne a física até hoje, detalhes que estão inseridos nas suas famosas leis do movimento. Newton define, dentro de suas perspectivas, o que inércia, quantidade de movimento, quantidade de matéria, força centrípeta de forma que

devem ser entendidas. É pertinente reforçar que Newton faz definição sobre espaço, tempo, movimento e lugar, não com tanto rigor exigido, já por ser algo comum para todos.

De acordo com Newton (2022), uma discussão sobre tempo absoluto, espaço absoluto, lugar e movimento absoluto. A princípio, ele afirma que o tempo absoluto flui uniformemente sem ligação com qualquer coisa externa, e também podendo ser expresso como duração. O chamado movimento relativo está associado a algo que é comum, vendo o que é definitivamente verdadeiro, como um ano, um mês e um dia. No que se refere a astronomia, o tempo absoluto é visto de forma diferente de tempo relativo, pode-se fazer a seguinte analogia, um dia não é igual a outro, apesar de serem considerados medida comuns do tempo, de medida do tempo.

Ao espaço absoluto, Newton propõe ser similar e imóvel, algo que se move em um referencial absoluto, já o espaço relativo é alguma dimensão presente do espaço absoluto e móvel, diferenciando em termos numéricos, enquanto em magnitude e configuração permanecem as mesmas. O que pode-se ressaltar é que os conceitos citados anteriormente, estão associados a lugar. O termo lugar está ligado a noção de espaço ou parte dele que um determinado corpo, objeto ou matéria ocupa, conseguindo ser relativo ou absoluto.

O movimento em torno de um sistema de referência é denominado movimento absoluto. O que pode diferenciar movimento relativo do absoluto é a translação de um objeto ou corpo de um certo lugar para outro, sendo absoluto, enquanto no chamado movimento relativo ao invés da translação será de um lugar relativo para outro.

A determinação para que um corpo esteja em movimento verdadeiro e absoluto está associado ao seu estado, quando se encontra em repouso e não apenas aparentar. O movimento revelado como relativo, seja ele avaliado a partir de qualquer observador ou um referencial, consegue ser alterado à medida que o chamado movimento real não mudar. Para tanto, saber diferenciar movimento relativo do absoluto e notar a atuação da força que provoca o distanciamento em relação ao eixo do movimento circular. Nesta ótica, a quantidade de movimento é quem vai apontar que tipo de força está agindo no movimento circular relativo, sendo menor ou maior. Com base nessa fundamentação sobre movimento relativo e sua perspectiva quanto a força. Quanto a experiência do balde, nota-se que de início ambos se encontram em repouso, porém depois de um certo tempo a água começa a se distanciar do meio e ir para as bordas do recipiente virando uma superfície côncava. Quanto mais rápido for o giro consequentemente a água vai se afastar do eixo de rotação, assim se visualiza um movimento circular e absoluto, sendo o inverso do relativo. No que se refere a experiência, a princípio, quando o movimento relativo se entendia como máximo não percebia nenhum afastamento para

as bordas do recipiente, mantendo-se plana a sua superfície, todavia, quando o movimento diminuía, mostrou-se o afastamento da água para os lados do recipiente, conhecido esforço a se distanciar.

Portanto, o empenho realizado no movimento circular não necessariamente depende do movimento de translação da água com os corpos presente em um determinado grupo, havendo até então o movimento circular real em termo de rotacionais. Assim sendo, vê-se que Newton esboça e reflete acerca dos conceitos/definições de lugar, movimento absoluto, relativo, espaço absoluto e relativo, assim como esses conceitos atuam em uma determinada situação, como é o caso do experimento do balde e seus movimentos e formatos estando em repouso ou em movimento, além do exemplo do navio, com o lugar relativo de um corpo, movimento relativo e também o movimento verdadeiro absoluto em relação a um espaço imóvel. Bem como, discute o que permeia a experiência realizada por ele, abordando o motivo do afastamento da água do seu eixo de rotação, seja a análise numa ótica relativa ao movimento ou tendo em contexto o espaço absoluto como motivo pelo qual acontece o que acontece com a superfície da água no recipiente.

Assis (2001) no artigo “Comparação entre a Mecânica Relacional e a Relatividade Geral de Einstein”, busca em seus relatos abordar teorias e conceitos que dialogam com a experiência do balde de Newton, discute a respeito da inércia, espaço absoluto e move-se em direção às críticas do físico austríaco Ersnt Mach e da opinião de Albert Einstein acerca dos conceitos newtonianos. Além de tudo, faz comparações entre a mecânica relacional e a teoria da relatividade de Albert Einstein como o próprio título mostra.

De início é apresentado a história de um dos mais famosos físicos do mundo Isaac Newton e com ele sua mais célebre obra *Princípios* publicado no ano de 1687. Na parte de codinome escólio, presente no livro *Principia*, Newton versa sobre espaço relativo, espaço absoluto, movimento relativo e tempo absoluto. Newton não é lembrado apenas pelas suas 3 leis do movimento, tem a mais conhecidas, da gravitação universal, diz que: é proporcional ao produto de sua massa e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

Foi perceptível a problemática que ocorria com relação ao espaço absoluto e com o tempo absoluto, no sentido de que se sustentava não satisfatoriamente. A partir daí surge a ideação da experiência do balde de Newton, numa primeira versão a superfície se encontra plana em relação a Terra, na outra em que o balde está sendo girado em relação a Terra a superfície da água se encontra côncava.

A interpretação acerca da experiência do balde, evidencia parte da sua ideia empírica com base nas suas definições apresentada logo no início de seu livro *Principia* e faz sua interpretação do que teria causado o formato côncavo da água e direcionando para o conceito de espaço absoluto, dele ser sempre similar e imóvel, levando Newton a criar alguns inimigos quanto a sua interpretação do sistema referencial com que se movimenta o balde e junto com ele a água.

A crítica mais consistente à interpretação dos resultados da experiência de Newton, executada pelo próprio, foi feita por outro físico, Ernst Mach (1838-1916), faz severas críticas a formulação de Newton. A descrença do Mach diante da teoria de Newton está na distinção quanto a espaço vazio e qualquer corpo material. Mach, discute também sobre a inércia e movimento em relação as estrelas fixas, em outras palavras, o corpo sem qualquer força agindo sobre ele, vai permanecer em repouso ou em movimento retilíneo, em relação a Terra, sendo somente o tempo relativo poderia explicar as leis da mecânica, quando está em um ângulo em conjunto da Terra e as chamadas estrelas fixas. Além de toda a crítica a teoria de Newton, Mach ainda explana sua insatisfação a respeito do conceito de massa, via-se que corpos ao comunicar-se com outro ele obteria certa aceleração para o lado contrário e vice versa.

Com relação a experiência do balde, Mach via os movimentos executados como de cunho relativos, o que para Newton isso não se concebia, já que, na mecânica de Newton se o balde e a água estiverem inertes em relação a Terra e girar o conjunto de estrelas fixas, isso ao em volta do balde, não terá nenhuma alteração na sua composição, superfície. Diferentemente de Mach, neste caso a água deverá subir as bordas do balde, contanto que, a velocidade dita angular entre ambas, a água e a estrelas não mude. A partir daí é criado o chamado Princípio de Mach, com a concepção de inércia obtida através da interação gravitacional. No entanto, tendo em vista as ideias de Mach, ela não foi matematizada. Seguimos com a teoria da Relatividade de Einstein, pois teve muita influência do Princípio de Mach, porém não foi levado a frente por Einstein.

Ainda de acordo com Assis, Albert Einstein argumenta ter uma quarta consequência, que aborda o espaço vazio e interação de um corpo qualquer, com outras massas do universo. Albert Einstein, faleceu acreditando na ideiação fomentada no trecho acima. O que aconteceu foi que Einstein não consegue explicar a experiência do balde de Newton, nos diversos referenciais. Nota-se que, o formato côncavo da água, caso esteja em um sistema de referência das estrelas fixas, rodopiando em relação a elas, não vai ocorrer este convívio, a concavidade não irá mudar. Contudo, se a análise for feita diante de outro referencial que gira em relação a

ambos os corpos, a água e o balde, a interpretação muda, visto que, a uma compreensão mútua, em que no momento a estrelas estão girando ao redor do balde. Vê-se até aqui que a interpretação de Mach, ou melhor dizendo, as críticas de Mach ao conceito de espaço absoluto tem muito fundamento, porém ao tentar esboçá-lo em seu Princípio, não consegue matematizá-lo e no que lhe concerne, a teoria da Relatividade Geral de Einstein não a incorpora, apesar de Einstein ter utilizado o “Princípio de Mach” como base para a sua teoria.

A quarta consequência citada anteriormente e enunciado por Einstein, não segue a diante a ideia do “Princípio de Mach”, pois as equações de campo têm por efeito de que um corpo de prova ou partículas tem atuações inerciais no chamado espaço vazio. Sob esta perspectiva, Assis discorre,

A quarta consequência também não acontece na teoria de Einstein. Einstein mostrou que suas equações de campo levam à consequência de que uma partícula teste num Universo vazio tem propriedades inerciais. Mesmo com a introdução do termo cosmológico, de Sitter foi capaz de encontrar soluções das equações de campo modificadas na ausência de matéria. Gödel encontrou também soluções das equações de Einstein em que o Universo como um todo está girando (como alguma coisa não pode girar em relação a si próprio, isto significa que tinha de estar girando em relação ao espaço vazio). Nada disto faz sentido de acordo com o princípio de Mach. (ASSIS, 2001, p.34)

Nesse caminho, a Mecânica relacional entra a frente e tenta explicar de maneira quantitativa o “Princípio de Mach” através da relatividade geral de Albert Einstein. A respeito da Mecânica relacional Assis, afirma que:

A essência da Mecânica Relacional é o postulado de equilíbrio dinâmico: a soma de todas as forças de qualquer natureza (gravitacional, elétrica, magnética, elástica, nuclear etc.) agindo sobre qualquer corpo é sempre nula em todos os sistemas de referência. (ASSIS, 2001, p.34).

Assim, a teoria da Relatividade Geral de Einstein, todavia, o que se vê é apenas a incorporação da Mecânica relacional ao princípio. Dado que, a implementação necessita de vários por menores, como: interações gravitacionais, eletromagnéticas etc.

A Mecânica relacional, quando tende a explicar a concavidade na superfície da água, explica com base em uma rotação relativa presente entre a água e o balde, bem como em relação aos astros distantes. Dessa forma, a causa da superfície côncava fica atrelada a interação gravitacional entre o balde e a água e o universo. É importante ressaltar que tudo isso só ocorre se o meio pelo qual caracteriza a ideia acima, é numa rotação relativa. Assim, o princípio de

Mach discorre que a inércia de um dado referencial está relacionada com os corpos distantes. Sobre esta perspectiva Assis argumenta à seguinte conclusão:

[...] mostra-se matematicamente que mesmo quando o balde com água está parado em relação à Terra e gira-se as estrelas e galáxias distantes ao redor do eixo do balde, que a água vai subir pelas paredes do balde tomando uma forma parabólica. Isto é, pela primeira vez há uma teoria que implementa matematicamente o princípio de Mach. (ASSIS, 2001, p.35)

Há outros conceitos a respeito do formato côncavo da superfície da água, que fomenta a ideia discutida no parágrafo anterior, como por exemplo que se o formato côncavo em relação a Terra e as estrelas fixas, também seria possível ocorrer o formato côncavo com a água e o balde estando em repouso, levando em conta que em ambos os casos estão em movimento relativo.

No trabalho “O conceito de Massa. I. Introdução História”, publicado em 1993, Jorge Antônio Valadares, apresenta perspectivas históricas no que se refere ao conceito de massa, por intermédio de ideias relativistas. O conceito de massa abordado no texto de Valadares, move-se por razões que concerne a evolução da massa relativista, a dependência da velocidade, além das conexões que existe com as ideias por ele desenvolvidas sobre o tema o físico Albert Einstein. De forma introdutória é ressaltado em que véis o artigo dará andamento à discussão sobre o conceito de massa, a inércia e suas distinções.

Em um segundo momento, é feita uma comparação do conceito de massa, antes e depois de Einstein. Antes o que se entendia de massa era como um pedaço de material, uma pasta. Porém, a definição carregada por Isaac Newton sobre a massa era de quantidade de matéria, visualizando como produto do volume pela densidade. Apesar de Newton ter obtido uma opinião/ definição com relação ao conceito de massa vinculado ao da inércia, foi o matemático e físico suíço quem melhor definiu de maneira efetiva o conceito de massa, como sendo o quociente da força pela aceleração. Valadares afirma que há distinção conceitual entre massa inercial e gravitacional,

No quadro conceitual da Mecânica newtoniana, esta massa inercial de um corpo nada tem a ver com a sua massa gravitacional. A primeira destas duas grandezas quantifica a inércia do corpo, isto é, a oposição que ele oferece à mudança da velocidade por ação das forças. Da segunda grandeza depende proporcionalmente a força exercida pelo campo gravitacional no corpo. A primeira mede-se por um processo dinâmico, dividindo uma força aplicada ao corpo pela aceleração nele produzida. A segunda mede-se por um processo estático através do equilíbrio de forças numa balança de pratos. (VALADARES, 1993. p.111).

Outro tipo de força é a perpendicular à velocidade, modificando a sua direção, sendo que a resistência que possui a mudança de direção é medida por outro tipo de massa, a chamada massa transversal. Daqui em diante é ressaltada a importância da Mecânica newtoniana no decorrer dos anos e seu mais fervoroso crítico, Ernst Mach. Mach como já era de praxe, criticava os diversos conceitos newtonianos, encabeçados pela ideia de espaço e tempo absolutos. “O espaço e o tempo são grandezas eminentemente relativas e todas as massas estão relacionadas entre si desempenhando as acelerações um papel fundamental nessas relações. ” (VALADARES, 1993, p.111). No entanto, ele foi grande influenciador das ideias de Albert Einstein e que logo mais se soube que o Einstein não levou a diante.

No fim do século XIX e início do XX, o físico neerlandês Lorentz trouxe consigo sua teoria sobre eletrodinâmica dos corpos em movimento, pode-se dizer que o elétron que sofria certa deformação com formato esférico. O que se pensava enquanto hipótese era a dependência da massa do elétron com sua velocidade, isto é, dependência de seu conteúdo energético.

A teoria de Lorentz tinha como objetivo encurtar o caminho onde inúmeras experiências se faziam válidas ou tentavam. Como por exemplo da existência do chamado referencial absoluto e do éter. A perspectiva final foi a de que o elétron depende da velocidade, no que se refere a massa longitudinal e transversal. Sobre esse prisma tem-se o seguinte comentário:

Lorentz afirma que a massa de todas as partículas varia com a velocidade do mesmo modo que o elétron, “desde que se admita que as suas massas são influenciadas por uma translação no mesmo grau em que o são as massas eletromagnéticas dos elétrons. (LORENTZ, 1972, p.38 apud VALADARES, 1993, p.112)

É importante ressaltar a plena dependência da massa no que refere-se a velocidade e concomitantemente a distinção entre a massa e a energia, além da grande contribuição de Poincaré, físico francês quem atribuiu o termo energia como derivação da inércia. Nesse meio caminho é aludido aos vários conceitos de massas a busca pela definição, sentido da inércia dos corpos. A todo momento é levado ao contexto que o conceito de massa inercial e a dependência dela a velocidade foi algo anterior a Einstein. Contudo, Einstein tem em suas descobertas algo que é revolucionário para com a teoria da Relatividade Restrita, a partir do seu trabalho intitulado Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento de 1905, o qual explicava inúmeras experiências no que se referia a Mecânica newtoniana, enaltecendo o princípio da relatividade e o princípio da constância da velocidade da luz, ou as leis da física para todos os

referenciais inerciais, assim como a velocidade da luz torna-se a mesma para todos os referenciais inerciais.

No texto de Valadares ainda é possível notar que a ideia de que a inércia tem uma certa dependência do seu produto energético, ou seja, faz questão de destacar a importância do conteúdo energético para explicar a ação de um corpo em movimento ou em repouso. Dessa visão Valadares argumenta a seguinte situação:

[...] Einstein considera um corpo em repouso num referencial inercial a emitir duas ondas luminosas transportando cada uma a energia  $E/2$  e sentidos opostos. Dado que as emissões são simétricas, o corpo perde energia, mas seu momento conserva-se, permanecendo, pois, em repouso nesse referencial. (VALADARES, 1993, p.113).

E assim é evidenciado que a massa de um corpo é sim conteúdo energético, porém com algumas condições, uma delas é de que se a energia sofrer variação idêntica, a massa também sofrerá uma variação da grandeza de  $E/9 \times 10^{20}$  no sistema CGS de unidades. Segundo Valadares (1993, p.114), “A massa inercial de um sistema de corpos deve ser encarada precisamente como uma medida da sua energia.” Sendo assim, é fomentado que Einstein não segue outra linha de pensamento que não seja a massa vinculada ao repouso, além do mais, a massa e a energia estão prontamente associadas, todavia, as manifestações são diferentes.

Valadares (1993), no seu trabalho conhecido por “O conceito de Massa. II. Análise do Conceito”, a chamada parte 2 sobre o conceito de massa, sendo que a parte I aborda o contexto histórico do conceito de massa, vem com uma perspectiva mais fundamentada sobre o conceito de massa, inércia e conteúdo energético, assim como a massa inercial vinculada a velocidade.

No presente artigo, a concepção de massa, como termo dependência da velocidade é severamente discutida e por conseguinte, a extinção da chamada massa relativista. O aumento da velocidade está associado ao aumento da força aplicada a uma partícula, em um certo intervalo de tempo. A dilatação temporal relativista foi a grande responsável pela mudança estrutural da massa e energia de uma partícula. A massa e energia têm características que se diferenciam, uma é um vetor no espaço de Minkowski e a outra parte desse quadrivetor, ou seja, uma não varia de um referencial inercial para outro, a energia, sim. Existem elementos/partículas que dispõem de energia e não de massa, contudo, quando se fala de um sistema, o que corresponde a energia, vista em repouso, isto é, o referencial é tido como próprio. As chamadas variações também ocorrem, pois se a energia de repouso não mudar, a massa segue inalterada, assim como se a diminuição da massa caso haja perda de energia para exterior.

Uma das leis mais importantes que se verifica na física é a lei da conservação do momento linear, em virtude de que em um dado referencial inercial na Mecânica newtoniana tem um formato, na relatividade restrita passa a ser outra, com adição de um termo, chamado termo adimensional de Lorentz, onde pode deixar em termo da Mecânica de Newton, necessitando apenas integrar o fator de Lorentz. No que se refere a conservação de energia pode-se dizer que a referência de massa-energia do Einstein vista pela famosa formula dele ( $E=mc^2$ ), relaciona energia e massa, se traduz pela equivalência, ou seja, massa em repouso e energia também.

Sobre os aspectos que envolvem a massa e a energia tomando como base seu estado, Valadares afirma que:

A massa em repouso de uma partícula e a energia que ela contém podem considerar-se os dois aspectos, as duas manifestações de um atributo, uma mesma entidade referida à partícula, e que tem que ver com a sua natureza bem como com o nível energético interno em que ela se encontra. A essa entidade chama-se muitas vezes massa-energia da partícula. Tanto se pode exprimir em unidades de massa como de energia. Quando esse atributo varia, variam concomitantemente a massa em repouso e o conteúdo de energia da partícula. (VALADARES, 1993, p.120).

Percebe-se que é próprio da partícula, quando a massa dela em repouso que seja proporcional à sua energia diante do próprio referencial, uma vez que, depende do nível energético que se encontra. Se por acaso o átomo for propenso a ganhar energia, a sua massa aumenta a energia contida na partícula. No que diz respeito a abolição da massa relativista, massa dependente da sua velocidade e ao seu conceito, é posta na mesa para o abandono, devido a vários motivos, um desses motivos está relacionado a interpretação do conceito de massa inercial, massa relativista para se medir a inércia. Como foi visto na parte 1 do trabalho de Valadares (1993) sobre a introdução histórica do conceito de massa, onde é manifestada a ideia de massa longitudinal e transversal, cada uma em seus moldes, em uma física antes de Einstein e tendo como modelo estrutural o elétron. A força aplicada transversalmente condiz com atuação do fator de Lorentz, ou seja, perpendicular à velocidade, já quando a atuação da força é longitudinal, a força vai em direção a velocidade. “No caso da força atuar longitudinalmente, já é outra expressão da massa medidora da inércia.” (VALADARES, 1993, p.121). Assim, é certo que a aparência do aumento ou não da velocidade em função da mudança da sua estrutura, provocando o aumento da inércia, ou seja, de resistir a ação de forças, tratando-se dessa forma de uma dilatação temporal. Além disso, se verificou a exposição do fator de Lorentz associada

a massa newtoniana, sendo que a associação é legítima quando se atrela a composição da velocidade.

No que confere a massa de um corpo, isso incluindo a medida da inércia de um determinado corpo, pode-se dizer que ela é uma grandeza essencialmente voltada ao seu conteúdo energético. Além do mais, a energia é comumente associada aos elétrons, átomos etc., uma vez que a massa é modificada a sua inércia também se modifica. Enfim, a segunda parte do artigo consegue abordar o conceito de massa em diversas perspectivas, isto é, são análises que mostram a massa e a energia, massa inercial ou massa relativista e sua dependência da velocidade, massa transversal e longitudinal com um termo adicional, fator de Lorentz.

## 5. ELEMENTOS HISTÓRICOS DO CONCEITO DE INÉRCIA

A ciência há muito tempo tenta explicar a origem de vários fenômenos na natureza e do universo. A cada passo dado surgem mais perguntas, concepções e interpretações acerca de conceitos como o da inércia. O conceito de inércia, teve o seu limiar anterior à Newton com Galileu e Descartes durante o século XVI, sob a perspectiva de explicar questões em que a inércia estava inserida, o movimento, a força envolvendo sempre o desenvolvimento da física e das revoluções científicas. Assim, perceber as transformações históricas e ampliar as técnicas são fundamentais para o progresso da ciência, no que diz respeito a experimentações e busca por informações. René Descartes (1596 - 1650) e Galileu Galilei (1564 - 1642) foram grandes nomes da ciência que contribuíram para o que hoje se conhece como conceito de inércia. Ambos tiveram grande relevância por muitos motivos atrelado ao estudo do movimento, seja pela observação dos astros, experiência ou até mesmo pelo caráter dedutivo em Descartes e indutivo em Galileu que eles possuíam e que fundamentalmente estava voltado para física clássica.

Bem antes de Galileu e Descartes, Aristóteles (384-322 a.C.) também discutia e contribuiu no que diz respeito ao movimento dos corpos. Aristóteles criou uma teoria referente ao movimento da superfície terrestre e dividiu em dois tipos, movimento naturais e movimentos violentos ou forçados. A “visão de mundo” de Aristóteles estava ordenada em critérios bem rígidos e que seguiam uma ordem sublunar que correspondia a fogo, ar, água e terra, ou seja, seguindo uma determinação de movimento natural que conduzia o objeto, como o da pedra para baixo, isto é, dependendo do seu peso. Segundo Bertazi (2019) “Em Aristóteles, todo o movimento é a passagem da potência ao ato. O ato (que é a forma) é condição, norma, fim e objetivo da potencialidade.” Assim sendo, tudo que está de certa forma em movimento é porque foi por outro movido. Se de certa maneira o movimento for duradouro, duradoura será o seu estado. De acordo com Porto e Porto (2009) Aristóteles tinha certa ideia de como se comportava o tal do movimento:

[...], para Aristóteles, paralelamente aos movimentos cuja explicação podia ser encontrada na própria natureza dos seres, existiam movimentos que não eram conformes a essa natureza. Segundo ele, estes movimentos, cujas causas não eram intrínsecas aos móveis, jamais ocorriam espontaneamente; exigiam a atuação de uma força, exercida de fora por algum outro corpo. Eram, portanto, chamados de forçados ou violentos. Tão logo cessava esta força, estes movimentos se extinguíam. A existência desses movimentos fazia com que o ordenamento do Cosmos não fosse completamente estático. No mundo sublunar os fenômenos físicos se sucediam, com o resultado, muitas vezes, de que os elementos eram deslocados de seus lugares naturais, em movimentos violentos. Contudo, uma vez desaparecida a causa destes movimentos, os corpos, deixados por si, espontaneamente realizavam movimentos

(agora naturais) em direção ao lugar que lhes era adequando na estrutura hierarquicamente ordenada do Universo. O exemplo mais característico dessa situação era fornecido pelo lançamento para cima de um objeto qualquer. Sendo feito de matéria pesada (terra), o movimento natural desse objeto seria o de buscar a aproximação com o centro do Universo, e, deste modo, com a superfície da Terra. Portanto, o movimento de subida, ou seja, de afastamento da Terra, era um movimento antinatural; sua causa não poderia ser buscada na forma do próprio ser, mas lhe era exterior. Para Aristóteles, essa causa era fornecida pela força exercida pelo lançador, no ato de lançamento. (PORTO; PORTO, 2009, p. 4601-2)

Com o advento da revolução astronômica, a contraposição entre modelo copernicano e ptolomaico ganha grande destaque nas suas concepções. No modelo ptolomaico o mundo das estrelas e planetas eram considerados perfeitos, o céu da Lua era o seu limite, enquanto o modelo copernicano era mais próximo do modelo atual. Em suma, o modelo geocêntrico, onde o centro planetário era a Terra fica para trás e passa a valer o modelo heliocêntrico, onde o centro é o sol. Os modelos cosmológicos são aperfeiçoados por Johannes Kepler, com a descrição de uma órbita elíptica. Sobre esse prenúncio de mudança de um modelo astronômico para outro é correto afirmar que:

Embora Copérnico tenha preservado muito da concepção cosmológica de Aristóteles, por exemplo, a finitude do Universo, o abandono do caráter geocêntrico do modelo cosmológico comprometia bastante a unidade tão característica do pensamento aristotélico, pelas implicações que apresentava. (PORTO; PORTO, 2009, p. 4601-3)

Realmente foi um período de muita reflexão sobre os modelos cosmológicos e sua veracidade enquanto concepção e sobretudo da evolução científica, porque se tratava da natureza do movimento e sua completude, no sentido de que culminava numa quebra de ideias de uma estrutura que Aristóteles sustentava ou convenientemente baseada em recortes do seu pensamento registrado por escrito. Porém, o que se discutia era o movimento de projéteis e foi a partir dessa discussão que veio à tona o princípio do ímpeto, com o filósofo francês Jean Buridan (séc. XIII-XIV), onde se versava sobre uma virtude capaz de imprimir a um corpo ou objeto lançado uma continuidade do movimento inercial. De acordo com Porto e Porto (2009 *apud* Bertazi, 2019, p.505), o que vai diminuir até eliminar o impetus são a gravidade e a resistência do ar, fazendo com que o objeto assume a forma natural de queda. Sabe-se que a teoria citada anteriormente teve enorme influência sobre eclosão do conceito de inércia. Sobre as concepções Aristotélicas a respeito da natureza do movimento podemos afirmar que:

Finalmente, nesta breve incursão sobre a Física aristotélica e suas críticas decorrentes, é importante destacarmos que a natureza do movimento, para Aristóteles, não é um

estado, mas um processo que ocorre com o corpo que se move, por meio de sucessiva ocupação de lugares no universo (o seu “lugar natural”). Há, pois, uma completa ausência de simetria, na qual não existe uma equivalência imediata entre repouso e movimento. O movimento não é, portanto, um estado, mas um processo de natureza absoluta que ocorre com os corpos. (BERTAZI, 2019, p.505)

Foi com Galileu e Descartes que os pensamentos relativamente ao movimento ganharam uma nova estrutura enquanto conceito, colocados como caminho para afastar-se das concepções aristotélicas acerca do movimento e promover solução aos problemas no que refere-se aos modelos cosmológicos. No entanto, ambos não estavam certos quanto a natureza da gravidade, nem por eles e nem por seus antecessores. Galileu carregava consigo uma base de ideias a respeito da inércia circular que compunha uma ligação com a gravidade, mas sem respostas plausíveis sobre os efeitos dela. Contudo, foi Descartes que consegue se aproximar de uma inércia chamada de inércia retilínea. A concepção de gravidade e para que ela serviria só iria ser bem mais esclarecida com o filósofo, padre e matemático Pierre Gassendi (1592-1655) com a sua filosofia mecânica atomista, conceito de força e consequentemente logo depois com a mecânica newtoniana, com a gravitação universal que proporcionaria o verdadeiro agente causal da gravidade.

Em Galileu a concepção de inércia surgiu com o advento dos problemas cosmológicos, ou seja, heliocentrismo versus geocentrismo. O questionamento relativamente ao movimento terrestre provocou uma evolução muito importante para a física de modo geral. Claro que as ideias do filósofo e matemático Giordano Bruno (1548-1600) foram de grande ajuda do conceito relativo ao movimento dos corpos, logo depois expandida por Copérnico. Sobre as ideias de Giordano Bruno e Galileu acerca dos movimentos dos corpos celestes e o conceito de inércia podemos afirmar que:

[...], a solução para o problema da trajetória de um corpo em queda nas proximidades da superfície terrestre proposta por Galileu segue na linha já traçada por Giordano Bruno e Copérnico. Esse corpo, inicialmente solidário à Terra, mesmo depois de abandonado, compartilha do movimento do planeta. Desta forma, do “ponto de vista” do objeto, é como se a Terra não se movesse. Em relação ao sistema terrestre, sua queda ocorre ao longo da vertical, exatamente da maneira como ocorreria se o planeta estivesse parado. Entretanto, a explicação proposta por Galileu difere da de Giordano Bruno por um elemento decisivo: os corpos em queda mantinham paralelamente ao movimento vertical de queda um movimento igual ao do sistema de onde partiram, não porque recebessem daquele um impetus para tanto, mas apenas porque esse movimento simplesmente persistia inercialmente. Galileu desenvolvia assim o conceito fundamental da inércia. (PORTO; PORTO, 2009, p. 4601-5)

Apesar de Galileu acreditar no heliocentrismo o que fez ele abandonar a ideia de vez a teoria medieval do impetus estava em uma de suas primeiras obras “Sobre o Movimento”. Ele percebeu que a teoria do impetus não seria capaz de remover as objeções sobre a superfície terrestre, teoria da queda dos corpos etc. A ideia consistia na continuidade do movimento, porém sem aumento ou diminuição da velocidade. No que diz respeito ao movimento dos corpos, Galileu se atinha na gravidade como algo natural para queda dos corpos ao centro terrestre. Quanto ao movimento de queda é importante que se fale o seguinte:

O movimento de subida de um corpo por um plano inclinado é, segundo Galileu, desacelerado porque o corpo, ao executá-lo, se afasta do centro da Terra, realizando um movimento contrário a sua tendência natural de queda. Pelo contrário, o movimento de descida é acelerado porque coincide com a tendência de queda natural do corpo “grave”. Quando tomamos um plano horizontal, essa tendência não é nem contrariada nem favorecida, de modo que Galileu concluiu que a velocidade do movimento não deveria aumentar nem diminuir. (PORTO; PORTO, 2009, p.4601-7)

Na concepção galileana relativo ao movimento retilíneo não se associa a gravidade, caso não haja alteração da velocidade, isto é, para Galileu a veracidade da inclinação inercial ao progresso do movimento dava-se com o movimento circular. De acordo com Bertazi (2019, p.509) “A inércia parece ter aparecido a Galileu como a persistência do movimento, enquanto fundamento da gravidade. ” É importante que se fale que Galileu persistia com a ideia de movimento retilíneo em decorrência da gravidade, apesar de não a ter concebido intangivelmente. No que se refere as causas determinantes ao movimento podemos dizer que:

No entanto, esta resposta, na impossibilidade da colocação inequívoca da questão ele não a deu. Galileu aparentemente não foi capaz de conceber abstratamente a eliminação da gravidade, porque para ele esta ainda constituía uma tendência do corpo e não algo que atuasse sobre ele a partir de fora. Não havia ainda se concluído o processo de exteriorização das causas determinantes do movimento. (PORTO; PORTO, 2009, p.4601-8).

Na concepção de Aristóteles, para que houvesse uma continuidade do movimento era necessário a ausência da força motriz, em outras palavras, um agente causador do movimento. Por outro lado, Galileu precisaria que nada estivesse no caminho, isso foi chamado de ruptura de conceitos, pois era algo dito como novo para a física clássica. Assim sendo, em virtude do conceito de inércia em Galileu estar incompleto acabou afetando a evolução da cinemática matemática, o que acabou virando o ponto de entrada para a dinâmica em meados do século XVII.

Posteriormente a Galileu quem retomou desenvolvimento do conceito de inércia foi o filósofo René Descartes, com sua visão dedutivista e a reconstrução da ciência cartesiana através de princípios básicos dentre os princípios está inserida a inércia e que é válido até hoje. A física de Descartes é conhecida pela física das colisões, onde é abastecida por meios filosóficos o conceito de movimento. Descartes sem dúvidas foi um importante personagem na chamada revolução científica e filosoficamente falando. A ideia ou noção de Descartes acerca do movimento difere do ponto de vista de Aristóteles, pois em um não havia necessidade do teor duvidoso dos sentidos.

Nessa completa revisão da Filosofia, o francês estabeleceu três regras para as leis da natureza de um “mundo novo”. A primeira delas dizia que cada parte da matéria, tomada individualmente, continuava sempre no mesmo estado enquanto ela não encontrasse outra parte que lhe constrangesse a mudar. Tratava-se de uma definição de inércia muito próxima à contemporânea. De fato, para a Física cartesiana, repouso e movimento eram um estado puramente contingente da matéria (ou seja, podiam ou não acontecer) e não propriedades intrínsecas a certos objetos. (BERTAZI, 2019, p.513)

Na visão de Aristóteles o que condicionava a um fim já determinado de uma certa situação, ou seja, era um movimento dito como natural. No movimento dito por ele como violento (portanto não natural) só existirá movimento enquanto existir um causador do movimento. René Descartes, para descrever o movimento, se utiliza da palavra status (estado), deixando a entender uma ideia de permanência de movimento. A forma com que Descartes trata a questão do movimento de modo consequente é bem próximo do que se conhece o conceito de inércia hoje em dia. No que concerne o ponto de vista de Galileu sobre movimento, viu-se que ele conseguiu importante mérito quando o assunto é sistema de referência, porém sustentou algo distinto sobre o princípio de inércia e talvez tenha sido seu grande erro por seguir o movimento circular como sendo o responsável para melhor compreender o conceito de inércia, além falta de ação do uso da gravidade.

[...], Galileu havia mudado o princípio basilar da dinâmica aristotélica, segundo o qual o movimento era um efeito de um agente causal. Com a transformação do movimento em estado, um novo efeito dinâmico deveria ser atribuído ao agente causal (ou seja, força, em geral, ou gravidade, nos movimentos naturais). Galileu supôs, acertadamente, que esse efeito devia ser a aceleração. (POLITO, 2014, p.15)

Descartes articulava um princípio inercial voltado para o dinamismo, em termos gerais era a conservação do estado em que o corpo/ objeto se encontrava. Já Galileu, vinha com a

ideação que o princípio inercial ou da inércia era cinemático. De acordo com Polito (2014) pode-se dizer o seguinte:

[...], as causas são os próprios corpos, na medida em que são dotados de quantidade de movimento, e o princípio de inércia é tão somente a constatação de que, na ausência de interações, a quantidade de movimento de um corpo se conserva. Por outro lado, em Galileu, a formulação é sutilmente diferente e, em pelo menos um aspecto, vai um pouco adiante, pois, além de estabelecer, na essência, a mesma independência entre movimento e agente causal, ele também enfatiza uma relação entre movimento e sistema de referência. (PALITO, 2014, p.19)

Em Descartes o que é levado em conta a relação entre movimento e o agente causal. Segundo Bertazi (2019) “As causas do movimento eram os próprios corpos: como o universo não era vazio, tudo se dava através das colisões.” A física cartesiana está assentada no que é conservado nos estados dos objetos. Na 1ª lei do movimento de René Descartes pode-se dizer, “[...], a quantidade de movimento conservada na colisão era definida como a soma dos produtos individuais do tamanho e velocidade dos corpos impactados.” A história da ciência ganha grande destaque, pois Isaac Newton tem como base Descartes para a construção do conceito de inércia, tanto na ideia e até mesmo na linguagem. A respeito do movimento dos corpos pode-se falar que:

Não podemos fugir à confusão entre a afirmação de Descartes de que todos os movimentos realizados no mundo eram de algum modo circulares e sua terceira regra das leis da natureza, no qual afirmava que o movimento de um corpo tendia a continuar o seu movimento em linha reta. Ao mesmo tempo em que argumentava que o único tipo de movimento inercial consistia no retilíneo também assumia aquilo que parecia ser uma forma de inércia circular tal qual em Galileu. Com relação à colisão (segunda regra), na qual nos assegura de que um corpo móvel menor em colisão com um corpo maior em estado estacionário jamais moveria o maior, algo contradiz imediatamente nossas intuições empíricas sobre o que ocorre na verdade, e que não parece ter nenhuma razão cinemática de natureza óbvia (GAUKROGER; SCHUSTER; SUTTON, 2000, apud BERTAZI, 2019, p.516).

Assim sendo, vê-se que tanto Galileu quanto Descartes contribuíram e muito para o que conhecemos de inércia, cada um da sua maneira, com um tendo mais sucesso que outro e vice versa. Galileu sem conseguir a real utilização da gravidade e Descartes tendo quase que plena ciência dos seus conceitos de movimento, um tinha olhos para algo mais dinâmico, enquanto o outro tinha visão acerca da cinemática dos corpos. Dessa forma, pode-se afirmar que:

Galileu não deu o último passo de abstração, formulando a questão: como se moveriam os corpos na ausência de gravidade? Para ele, a gravidade se constituía em uma tendência inerente à matéria, de tal modo que sua eliminação exigiria a eliminação dos próprios corpos. Seria necessário que a ideia de gravidade evoluísse

de uma tendência, agindo a partir de dentro, para uma atração, exercida a partir de fora. (PORTO; PORTO, 2009, p. 4601-9).

Assim, pode-se dizer que as ações defendidas por ele eram, acima de tudo externas dentro da sua física, a física das colisões, com atuações de outros agentes. Enfim, o conceito de inércia em Descartes é decerto o que se conhece nos dias de hoje.

Descartes sentenciou a resposta, na forma de um princípios fundamentais de sua física: o corpo persiste indefinidamente em seu movimento retilíneo, a menos que outros corpos o retirem do estado em que se encontra. Estava assim explicitamente formulado o princípio da inércia. (PORTO; PORTO, 2009, p. 4601-9).

Em Newton a visão do conceito de inércia chegava com o seu célebre livro “Principia” publicado em 1687. Descartes e Newton apesar das muitas concordâncias acerca da conceituação e contribuições no que se refere a natureza do movimento, tinha também discordâncias teóricas. Isaac Newton foi o sucessor de grande físico, filósofos, astrônomos etc, assim foi abastecido de muito conhecimento e de conceitos que o ajudaram a desvendar a natureza do movimento dos objetos, relacionando a inércia a quantidade de matéria, ou seja, o próximo passo foi executado por Newton.

## 5.1 Conceito de Inércia em Galileu e Descartes

Muito antes de Galileu e Descartes, o desenvolvimento do conceito de inércia foi discutido e construído ao longo dos anos com filósofos como Diógenes (413-323 a.C.), com sua filosofia de ação e o pensador pré-socrático Heráclito de Éfeso (540-470 a.C.) e sua dissertação sobre o movimento contínuo da natureza, ou seja, tudo está em constante mudança, tudo flui. O fogo, por exemplo, seria a origem do movimento natural, o elemento instável.

No século XVII há disseminação da chamada Mecânica newtoniana, onde foi possível haver o desenvolvimento de inúmeras concepções, dentre elas as famosas leis do movimento. Logo após muitos anos de estudos, contribuições, observações e descobertas, Isaac Newton se torna uma das figuras mais influentes da ciência. Muito antes do conceito de inércia ser sintetizado por Newton no século XVII, ou seja, da ideia de inércia ser consolidada, já haviam outros cientistas com tal curiosidade em obter a respostas acerca da inércia.

Galileu Galilei, René Descartes, Jean Buridan e Pierre Gassendi deram cada um seu parecer acerca do movimento dos corpos e inércia, não necessariamente nessa ordem. Galileu, por exemplo, foi quem deu continuidade na chamada nova física e com ela Galileu consegue expor alguns fundamentos, como a relatividade do movimento e da inércia. E numa física

anterior a Galileu, Aristóteles dizia que o responsável pela manutenção do movimento era a força, enquanto permanecesse o movimento. Sobre o princípio da inércia, Galileu faz o seguinte comentário:

**Salviati** - [...] dissei-me: quando tivésseis uma superfície plana, polidíssima como um espelho e de matéria dura como o aço, e que não fosse paralela ao horizonte, mas um pouco inclinada sobre a qual se colocasse uma bola perfeitamente esférica e de matéria pesada e duríssima, como, por exemplo, de bronze, deixada em liberdade, o que acreditais que ela faria? **Simplicio** - Não acredito de modo algum que ela ficasse parada; ao contrário, estou perfeitamente seguro de que ela se moveria espontaneamente na direção do declive. [...]

[...] **Salviati**- E qual seria a duração do movimento daquela bola, e com que velocidade? Notai que me referi a uma bola perfeitissimamente redonda e a um plano perfeitamente polido, para remover todos os impedimentos externos e acidentais. E assim também quero que seja abstraído o impedimento do ar mediante a sua resistência a ser aberto, e todos os outros obstáculos acidentais, se outros pudessem existir.

**Simplicio** - Compreendi tudo perfeitamente: quanto à vossa pergunta, respondo que ela continuaria a mover-se ao infinito, se tanto durasse a inclinação do plano, e com um movimento continuamente acelerado;

**Salviati** - Mas, se outros quisessem que aquela bola se movesse para cima sobre aquela mesma superfície, acreditais que ela subiria?

**Simplicio** - Espontaneamente não, mas só arrastada ou lançada com violência.

**Salviati** - E quando ela fosse impelida por algum ímpeto que lhe fosse violentamente impresso, qual e quanto seria o seu movimento?

**Simplicio**- O movimento iria sempre enfraquecendo e retardando-se, por ser contra a natureza, e seria mais demorado ou mais breve, segundo o maior ou o menor impulso e segundo o maior ou menor aclave.

**Salviati**- Parece-me, portanto, até aqui, que vós me haveis explicado os acidentes de um móvel sobre dois planos diferentes; e que no plano inclinado o móvel pesado espontaneamente desce e vai continuamente acelerando-se, e que, para retê-lo em repouso, é necessário usar força; mas

sobre o plano ascendente é necessário força para fazê-lo avançar e também para pará-lo, e que o movimento que lhe foi impresso vai continuamente enfraquecendo, até que finalmente se anula. Dizeis ainda mais que em um e em outro caso nasce uma diferença dependendo de se a declividade ou aclividade do plano for maior ou menor; de modo que a uma inclinação maior corresponde uma maior velocidade e, ao contrário, sobre o plano em aclave o mesmo móvel lançado pela mesma força move-se uma distância maior quanto menor seja a elevação. Disse-me agora o que aconteceria com o mesmo móvel sobre uma superfície que não estivesse nem em aclave nem em declive.

**Simplicio** - Aqui preciso pensar um pouco na resposta. Como não existe declividade, não pode existir uma inclinação natural ao movimento e, não existindo aclividade, não pode existir resistência a ser movido, de modo que seria indiferente à propensão e à resistência ao movimento: parece-me, portanto, que ele deveria ficar naturalmente em repouso. Mas como sou esquecido! Porque não faz muito que o Sr. Sagra do me fez entender que assim aconteceria.

**Salviati** -Assim acredito, quando alguém o colocasse parado; mas se lhe fosse dado um ímpeto em direção a alguma parte, o que aconteceria?

**Simplicio**- Continuará a mover-se na direção daquela parte.

**Salviati** - Mas com que espécie de movimento? Por um movimento continuamente acelerado, como nos planos em declive, ou por um movimento sucessivamente retardado, como nos aclives?

**Simplicio** - Eu não consigo perceber causa de aceleração nem de retardamento, não existindo nem declividade nem aclividade.

**Salviati**- Sim. Mas se não existisse causa de retardamento, muito menos deveria existir de repouso: quanto acreditais, portanto, que duraria o movimento do móvel?

**Simplicio**- Tanto quanto durasse o comprimento daquela superfície que não é nem subida, nem descida.

**Salviati** - Portanto, se esse espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente sem fim, ou seja, perpétuo?

**Simplicio**- Parece-me que sim, sempre quando o móvel fosse de matéria duradoura (GALILEI, 2011, p. 227-9 *apud* CARMO, 2020, p.18-19).

O diálogo acima expõe de forma categórica o que se conhece sobre a inércia. Neste diálogo, a concepção de Aristóteles acerca do movimento, ou seja, da força manter o corpo em movimento é posta para baixo, uma vez que o diálogo, discute a respeito de uma bola, quando lançada em um plano horizontal e praticamente livre de atrito, permaneceria em movimento retilíneo uniforme continuamente. René Descartes também é importante para essa discussão sobre a inércia, pois ele defende como movimento inercial é, de acordo com o movimento retilíneo em linha reta. Sobre a natureza do movimento de um corpo e o desenvolvimento do princípio da inércia do século XVI, Descartes expõe o seguinte comentário:

Primeira lei da natureza: Que cada coisa permanece no estado em que está, se nada vier a mudá-la. [...]

Segunda lei da natureza: Que todo corpo que se move tende a continuar seu movimento em linha reta (DESCARTES, 1997, p. 76-77 *apud* CARMO, 2020, p. 20).

Já Galileu compartilhava a ideia de que caso um objeto esteja parado, para movimentar é necessário que uma força haja sobre o objeto. A inércia teria surgido para Galileu como algo duradouro ao movimento. Diferentemente de Aristóteles, Galileu, defendia a ação da propagação do movimento, era algo a parte, não afetava o movimento de um corpo, não havia alteração no seu estado. De acordo com Bertazi (2019, p.510), “[...]ao contrário, bastava que nada houvesse no caminho que pudesse obstruir o movimento que ele, por si só, se prolongaria ao infinito.” Em Galileu, o movimento era atribuído como algo intrínseco a natureza dos corpos, dessa forma, o repouso e o movimento são considerados como estado de um corpo, dando fim a visão aristotélica sobre o movimento dos corpos, isto é, movimento natural e violento, como dito acima o estado do movimento persevera.

Sobre a ideia de movimento, Aristóteles tinha uma percepção um tanto que distinta das ideias de Newton e por consequência das ideias do físico florentino Galileu Galilei, uma época muito distante do espaço permeado por Aristóteles.

De fato, a inércia (persistência do movimento) não está elencada como um dos princípios internos do movimento, conforme vimos acima. Ademais, Aristóteles não compartilhava da ideia de que o movimento pudesse persistir por si só, afirmando que este era uma mudança de “alguma coisa para outra coisa”, ou seja, algo que possuía um início e um fim (momentâneos), tese diferente daquela defendida na modernidade, quando o movimento foi definido simplesmente como um estado. (SIMON; REZENDE, 2018, p.243).

Aristóteles, que admitia que o movimento tinha uma finalidade, isto é, algo a ser seguido, seu lugar puro/ natural. Lembrando que a ideia que o próprio Aristóteles sustentava era de que um corpo vai retornar ao seu estado inicial, ou melhor falando estado natural, quando não mais houver a atuação de força sobre o corpo.

A partir das ideias de Galileu, Newton conseguiu definir a primeira lei de Newton, comumente chamada lei da inércia. Consistia dizer que, “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.” (NEWTON, 2022, p.53). Essa é a definição de uma das três leis criada por Newton e publicada no livro, *Principia*. Neste contexto, a massa é uma parte fundamental para o desenvolvimento do conceito de Inércia. Assim sendo, quanto maior a massa de um corpo, maior será a sua inércia, ou seja, a resistência que o corpo vai gerar a mudança de estado, conseqüentemente, o corpo tende a ficar em repouso ou em movimento uniforme, a menos que haja a ação de uma força que faça o corpo alterar o seu estado. Portanto, percebe-se a importância do conceito de inércia ao longo dos anos, com Aristóteles, Galileu Galilei e Descartes. O conceito foi se alterando, seja quanto ao ponto de partida do conceito de inércia, quanto em sua formação, estado de movimento ou de repouso.

## **5.2 Mecânica newtoniana e o conceito de inércia**

A natureza do movimento e o conceito de inércia são alguns dos assuntos que marcaram a mecânica de Newton. O próximo passo dado por Isaac Newton sobre a inércia dessa vez estar associada a massa, isto é, como quantidade de matéria. Nomes como os de Galileu Galilei e René Descartes tiveram grande participação no desenvolvimento da chamada mecânica clássica, dando subsídios para o florescimento da mecânica newtoniana e conseqüentemente para o que se conhece do conceito de inércia. Posto isto, vê-se que o desenvolvimento da concepção de inércia não foi um salto temporal, não partiu de Aristóteles e foi diretamente para Newton, ao longo dos séculos que separam as ideias de Aristóteles e Newton, por exemplo, o conceito de inércia continuou a se desenvolver, matemáticos e filósofos que contribuíram para formação das ideias que se tem hoje.

Foi por meio da publicação do livro *Principia* em 1687 que Isaac Newton estabelece importantes definições, tais como, o de massa e quantidade de movimento que dão alicerce e discernimento ao conceito de inércia. Sobre a fundamentação do conceito de inércia temos as seguintes definições:

[...] A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente à partir de sua densidade e volume[...] A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente à partir da velocidade e a quantidade de matéria[...] (NEWTON, 2022, p. 39-40).

No decorrer do *Principia* Newton define o que é inércia, na definição III, como sendo o poder que o corpo tem de resistir a aceleração, resistência a alteração do seu estado. A *vis insita* como também é conhecida está associada ao seu estado, isto é, enquanto não houver a aplicação de uma força que o faça mudar o seu estado presente, o que se tem é a medida da matéria. A resistência de um corpo é normalmente concedida ao seu estado de repouso, enquanto o movimento é atribuído a uma impulsão. Logo após a definição de inércia (definição III), temos a definição IV e V, a definição de força imprimida e força centrípeta. A chamada força imprimida é atribuída a ação, ela é responsável pela ação em um corpo, uma vez que ele permanece no seu novo estado, por conta da sua inércia, tendo origem da força centrípeta, percussão e pressão. Newton (2022) comenta que as forças centrípetas, são forças de gravidade, onde os corpos buscam o centro da Terra, assim como o magnetismo, o ferro tende para a magnetita, além das forças pela qual os planetas os movimentos dos planetas são desviados do seu movimento retilíneo.

[...] *A vis insita* ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através de que todo o corpo, no que depende dele, mantém seu estado presente, seja em repouso ou em movimento uniforme em linha reta[...]  
 [...] Uma força imprimida é uma ação exercida sobre o corpo a fim de alterar seu estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme em linha reta[...]  
 [...] Uma força centripeta é aquela pela qual os corpos são dirigidos ou impedidos, ou tendem, de qualquer maneira, para um ponto ou centro[...] (NEWTON, 2022, p. 40-41).

A respeito da força de inércia, Newton faz os seguintes argumentos:

Essa força é sempre proporcional ao corpo ao qual ela pertence e em nada difere da inatividade da massa a não ser pela maneira de concebê-la. A partir da natureza inerte da matéria, um corpo não tem seu estado de repouso ou movimento facilmente alterado. Nesse sentido, essa *vis insita* pode, por um nome mais apropriado, ser chamada inércia (*vis inertiae*) ou força de inatividade. Mas um corpo só exerce essa

força quando outra força, imprimida sobre ele, procura mudar sua condição; e o exercício dessa força pode ser considerado tanto como resistência quanto como impulso [...] (NEWTON, 2022, p. 40).

O comentário feito por Newton sobre a força de inércia nos fornece informações em relação a importância da presença da matéria, assim como, explica a relação da força de inércia com os movimentos acelerados. De acordo com Ghins (1991 *apud* CARMO, 2020), [...] a força de inércia é considerada para explicar movimentos acelerados, pois na ausência de forças de inércia, uma força imprimida muito pequena já seria capaz de comunicar ao corpo uma aceleração infinita. Ainda no livro *Principia* nos axiomas ou leis do movimento, Newton (2022, p. 53) discorre sobre sua primeira lei, a famosa lei da inércia, “[...] todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele. (NEWTON, 2022, p. 53). ”

Em anos anteriores, Galileu e Descartes discutiam sobre a natureza da inércia. Descartes compartilhava da ideia de que um corpo sendo posto em movimento em um espaço inexistente de matéria, continuaria seu movimento com uma velocidade constante, em outras palavras, a continuidade do estado, sem mudanças. Quanto a dependência do movimento, Pires faz o seguinte comentário:

[...], o criador da Geometria Analítica é o primeiro a enunciar o princípio da inércia ao escrever que Deus havia criado uma quantidade definida de movimento retilíneo em cada direção, de modo que um corpo não podia alterar sua direção de movimento, a não ser adquirindo ou perdendo movimento através de outro corpo. Assim, um corpo que tivesse sido colocado em movimento no vácuo se moveria indefinidamente e com a mesma velocidade. (PIRES, 2011, p.172)

Perante exposto, Isaac Newton apresenta o conceito de inércia como conhecemos hoje, foi ele quem conseguiu apresentar sentido físico a essas grandezas, como inércia, massa e força, em outras palavras, a tendência de um objeto permanecer em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, a menos que haja uma força externa que altere o seu estado. Newton foi importantíssimo para sintetização dos conceitos físicos, para que os conceitos realmente fizessem sentido matemático.

Assim, efeitos das causalidades ditos como reais a força impressa estão associados a mudança de estado de movimento, expressa como efeito espaço-temporal, termo relacionado ao seu estado de repouso ou movimento, sem a presença de efeitos reais. As leis de Newton são responsáveis por exprimirem a dinâmica do movimento e seus fundamentos, elas trouxeram explicações incríveis quanto as orbitas dos planetas e o surgimento das marés. A primeira lei, a

lei da inércia, define que um corpo que se move com velocidade constante ou parado, a menos que uma força atue sobre esse corpo e seja forçado a mudar. A primeira lei de Newton, a lei da inércia, conjuntamente com a segunda lei de Newton e a terceira lei de Newton, da ação e reação formam as bases do que conhecemos hoje como mecânica newtoniana.

No que diz respeito à história da inércia, sua origem e seu conceito foram discutidos ao longo desse trabalho, destacando pontos de grande relevância não só para a física, mas também para o estudo dos fenômenos da natureza, por meio de análises e experimentos. Viu-se que a inércia foi a grande responsável pelo estudo dos corpos em movimento idealizada por Isaac Newton, e graças a análise foi possível investigar e interpretar uma das inúmeras experiências realizada por ele, como por exemplo, a conhecida experiência do balde de Newton. Newton, em seu livro intitulado, *Principia*, percorre inúmeros assuntos, dentre eles, movimentos dos corpos, espaço absoluto e define o que é a inércia.

Já na visão do filósofo Aristóteles, lá por volta do século IV antes de Cristo, o conceito de inércia estava ligado a força, isto é, enquanto havia a atuação dela sobre um corpo, caso contrário retornaria ao estado inicial. Simon e Rezende (2018) falavam do discernimento que Aristóteles tinha da ideia do que era a inércia e movimento, mesmo que anormal e quanto foi relevante para a disseminação do conceito no presente momento. Decerto, quando fala-se de inércia, vem à tona vários termos ou características, dentre eles o de massa, força e movimento. Para Newton (2022) quantidade de movimento, estava ligada a ideia conjunta da medida da velocidade e da quantidade de matéria.

A Gravitação Universal, por exemplo, tem por definição a interação entre dois corpos, como uma força que é diretamente proporcional a massas dos corpos e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. A lei da Gravitação Universal, está associada a queda dos corpos e a força trocada entre os corpos celestes, mostrando os distintos movimentos. A interação que ocorre entre massas é de caráter atrativo, é a mesma que existe entre Terra e Lua, Júpiter e Sol etc. Posto isto, se percebe a importância do conceito de inércia para com as leis fundamentais do movimento, as famosas leis de Newton, bem como para formulação da Gravitação Universal, no que se refere a massa, força e interação entre os corpos.

Isaac Newton, ganha destaque por relatar a natureza do movimento, deixando claro o que é inércia, o que é movimento e o que é massa, além disso, fala das condições que se encontra um corpo, repouso e movimento retilíneo, argumentando ser relativo o seu estado. Aqui cabe uma breve reflexão as condições em que está imposta a teoria. Vejamos a seguinte situação, se João se encontra deitado em cima de um sofá, ele está em movimento ou em repouso? Se parar

para pensar e imaginar se for em relação ao sofá, João estará em repouso. No entanto, se o observador estiver em outro canto, em outro meio, se estiver vendo a outra pessoa em um ponto próximo ao Sol, de lá do Sol esse observador vê o João deitado no sofá; assim, como a Terra gira ao redor do Sol e João se encontra na Terra, então o observador que está próximo ao Sol, compreenderá que o João está em movimento, hipoteticamente falando. Assim sendo, entende-se que o movimento retilíneo e o repouso são considerados relativos. Contudo, Newton através de um experimento, conhecido como experimento do balde de Newton, argumenta o contrário.

O experimento, tratava-se de um balde erguido por uma corda, onde no seu interior continha água. Em um primeiro instante a superfície da água é plana, no entanto, não é visto da água em relação à Terra e nem da água em relação ao balde. No segundo instante, a superfície da água continua plana, porém a aceleração é máxima, a aceleração da água em relação à Terra continua não existindo. No terceiro instante já existe alteração quanto ao formato da água no interior do balde, a água e o balde se encontram em repouso, porém ambos se encontram acelerados em relação à Terra, além disso, a água se apresenta com uma superfície côncava, de acordo com Newton. O quarto instante e último, seu formato continua côncavo, todavia assim como no terceiro instante a água permanece acelerada em relação à Terra e o balde vai se apresentar em repouso em relação à Terra. Sendo assim, o fenômeno presenciado, a concavidade da água, não é capaz de esclarecer o movimento da água em relação ao balde, visto que as acelerações no segundo e quarto instante possuem superfícies diferentes, sendo uma plana e outra côncava, diante disso, o movimento relativo que se tem do balde e água, para fundamentar a concavidade da água no interior do balde não desconsiderada. Quando rotacionado inúmeras vezes, a corda sofre uma torção; ao ser liberado da rotação o balde irá girar em sentido contrário ao que foi torcido.

De uma maneira um pouco mais resumida que descrito anteriormente, em um primeiro instante, a superfície da água se encontra plana, momentos depois tende a subir pelas bordas ou paredes do balde, obtendo o formato de uma parábola. De agora em diante, Newton define o que vem a ser o espaço absoluto e atribuiu a ele como sendo a causa da mudança da superfície da água no balde. Newton (2022, p.45), define espaço absoluto como sendo, “[...], em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel.” Fomentando as seguintes situações, em primeiro momento a água contida no balde se encontrava em repouso em relação ao espaço absoluto, da mesma forma que a água estaria rotacionando em relação ao espaço absoluto em um segundo momento.

No que diz respeito ao sistema de referências, estado em que o corpo se encontra, seja em movimento uniforme ou em repouso, apresentam condições relativas, isto é, as condições que o observador e o corpo se expõem a interpretação. Para justificar o motivo que teria causado a concavidade da água no interior do balde, Newton defende a atuação de um espaço-tempo absoluto. O que difere do movimento relativo do movimento absoluto são as forças que atuam no sentido de distanciamento a começar do movimento circular, uma vez que as forças contidas em um movimento circular são relativas, enquanto que no movimento absoluto e verdadeiro, as forças dependem da quantidade do movimento. Daí alimentou-se várias situações, como, por exemplo, por que em uma configuração a superfície da água se encontra em repouso e em outra côncava? Essa ideia de espaço absoluto acabou gerando inúmeras críticas, a mais fervorosa feita pelo filósofo Ernst Mach e que é discutida nas seções seguintes.

Quando o assunto em questão é referencial inercial, ou seja, um referencial no qual um corpo independe e não muda seu estado de movimento, a menos que uma força externa atue sobre o corpo, a definição de inércia não é arbitrária. E a discussão da experiência do balde vai de encontro com os estudos dos referenciais, claro não deixando de lado a massa inercial. A conexão entre a experiência do balde com a inércia, fundamental para definir o que é o referencial inercial que é em relação a ele que se define a massa inercial, a resistência na mudança desse estado, tomando sempre como base o referencial inercial, porque se o referencial girar vão surgir forças que não são decorrentes de interações, são forças fictícias ou de inércia. Segundo Gardelli (1999) a massa inercial é a medida da resistência que os corpos colocam para mudar de seu estado original de repouso ou movimento uniforme em linha reta.

### **5.2.1. Experiência do Balde de Newton**

Ao longo dos anos, as pessoas foram aperfeiçoando a maneira de como analisar uma determinada hipótese e por vezes se buscava adquirir conhecimento por meio da análise do trabalho científico, na intenção comprovar um determinado fenômeno físico. No passado, os cientistas não eram munidos de grandes aparatos tecnológicos como se tem hoje e mesmo assim fizeram grandes descobertas, observavam os astros, hoje os telescópios possuem uma gama de configurações que dão mais informações acerca determinado planeta do sistema solar. Na mecânica newtoniana não foi diferente, ocorreu várias experimentações e que foi fundamental para propagação da Mecânica Clássica, seja colocando a mão na massa ou mentalmente. A dispersão da luz branca através de um prisma de vidro e suas inúmeras cores e lei da gravitação

universal são bons exemplos de experiências, pensadas e organizadas para evolução da ciência. A experiência do balde de Newton foi uma das inúmeras experiências realizada por Newton que teve como finalidade, discutir um tema específico: o espaço-tempo absoluto. A experiência do balde consistia em amarra a alça de um balde numa corda, inserir no interior do balde água, em um primeiro instante a água se encontra plana, visto que ainda está em repouso em relação a Terra, a água e o balde e em um segundo instante quando gira o balde, a água e o balde estão girando em relação a Terra. Um tempo após girar o balde a água no interior do balde se mostra em um formato côncavo.

A experiência levou a certos questionamentos sobre a provável causa da concavidade da água no interior do balde, as quais estavam atreladas a interação da água em relação ao balde, em relação as estrelas fixas ou em relação a Terra. Para relatar um pouco mais sobre essas possíveis causas pela concavidade da água, vamos analisar cada uma e o seu ponto de vista. Na primeira situação, em que se presume o formato côncavo da água se dá em relação ao balde. No entanto, a rotação em relação ao balde não é o causador do formato da superfície da água, pois não existe o chamado movimento relativo entre ambos. Assim, não importa qual seja a força aplicada irá continuar no mesmo estado, em repouso com relação a água. A segunda situação a se refletir é da rotação da água em relação a Terra. Neste caso a água está rotacionando em relação a Terra e a superfície da água ficou côncava, porém a força exercida pela Terra no balde é de caráter atrativo para baixo, em direção ao centro e não centrífuga, já que não importa qual seja o estado da água, rotacionando ou em repouso, a força será sempre para baixo. Por fim, a última possível causa da formação da concavidade da água está associada ao conjunto das estrelas fixas, se tem a seguinte interpretação que o sistema rotacional relativo não poderia ser responsabilizado pela formação parabólica da água, por motivos semelhantes a da situação dois, a interação presente é entre as estrelas e a água, interação gravitacional, pois nada influencia o movimento das estrelas. Foi pensando dessa forma que Newton concluiu que o balde só poderia estar girando em relação a um espaço absoluto. O espaço absoluto pode ser descrito como algo dado, um cenário acabado, imperceptível que não pode ser torcido ou comprimido, ou seja, sem ação inerente com a matéria, sem relação com outros objetos. É uma extensão com todos os elementos que o compõem, sem mudanças, como algo que existe independente do ser humano ou não, existe naquele espaço, sem estabelecer relações, ele é assim por si só. A experiência contribui para explicação favorável ao espaço absoluto:

Se um recipiente, suspenso por uma longa corda, e tantas vezes girado, a ponto da corda ficar torcida, e então enchido com água e suspenso em repouso junto com a

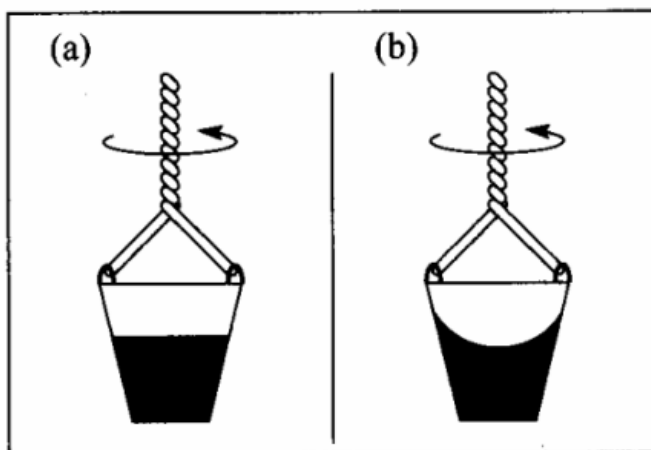
água; a seguir, pela ação repentina de outra força, é girado pelo lado contrário, e enquanto a acorda desenrola-se, o recipiente continua nesse movimento por algum tempo; A superfície plana da água, de início, será plana como antes do recipiente começar a se mover; mas depois disso o recipiente, por comunicar gradualmente o seu movimento à água, fará com que ela comece nitidamente a girar e a se afastar pouco a pouco do meio e a subir pelos lados do recipiente, transformando-se em uma figura côncava (conforme eu mesmo experimentei), e quanto mais alto se torna o movimento, mais a água vai subir, até que, finalmente, realizando suas rotações nos mesmos tempos que o recipiente, ela fica em repouso relativo nele (NEWTON, 2022, p. 49).

De acordo com Assis (1998, p.53) A respeito do conjunto de estrelas fixas é importante ressaltar que:

Uma consequência importante disto é que mesmo que as estrelas fixas e as galáxias distantes desaparecessem (fossem literalmente aniquiladas do universo) ou dobrassem de número e massa, isto não iria alterar a concavidade da água nesta experiência do balde. Elas não têm nenhuma relação com esta concavidade, pelo menos de acordo com a mecânica newtoniana.

Logo abaixo é possível visualizar uma representação esquemática na (Figura 1), da experiência do balde realizada por Newton, nos momentos citados acima, o balde suspenso, representando na figura 1 a o balde e a água no estado de repouso, já na figura 1 b é representado um outro momento, a corda que segura o balde torcida e a formação da parábola logo após ser solto e que será discutido um pouco mais sobre o experimento do decorrer do trabalho.

**Figura 1** – Representação esquemática do experimento do Balde de Newton.



Fonte: NUSSENZVEIG, (2013, p. 308)

O experimento do balde é um dos mais relevantes experimentos da física. O experimento surgiu da ideia de mostrar qual seria o motivo que teria provocado a formação da concavidade na superfície da água, como também imaginar o porquê a água apresenta dois

comportamentos, já que em ambos os casos a água se encontrava em repouso em relação ao balde, Newton caracteriza como prova, o referencial que rotaciona com a água em relação a um espaço absoluto, seja na rotação e na aceleração, com a ausência de força real presente, apesar disso a superfície que está a água forma uma concavidade.

O experimento do balde de Newton provocou inúmeras críticas de cientistas de renomes como: Mach Ernst, G. Berkeley e G.W. Leibniz. Contudo, só um consegue relatar de maneira mais aprofundada. Os relativistas como também eram conhecidos, tinham uma argumentação distinta ao espaço absoluto fomentada por Newton. Segundo Carmo (2010, p.26), sob perspectiva relativista, eles “[...] defendem que a causa de qualquer movimento devem ser a partir de movimentos relativos. ”. No entanto, Newton seguiu com sua análise, elencando o fator responsável pela formação da concavidade como sendo a rotação em relação a um espaço absoluto. Nesse contexto, as conhecidas leis do movimento têm muito que informar sobre a experiência do balde de Newton, bem como do questionado espaço absoluto, sobre essa questão temos que:

Para entendermos o que as três leis do movimento têm a haver com este assunto, imaginemos que um observador esteja parado dentro de um trem super silencioso se movimentando com velocidade constante em relação ao espaço absoluto. De repente, ele percebe que uma caixa de madeira que estava apoiada em um chão completamente liso começa a se movimentar para trás espontaneamente. No referencial dele, por não conseguir identificar nenhum tipo de força agindo por contato ou à distância sobre a caixa que pudesse modificar o seu estado de repouso, este fato não pode ser explicado pelas três leis do movimento. Pois, nesta situação, a Primeira Lei afirma que a tendência da caixa era continuar em repouso. De modo análogo, a Segunda Lei enuncia que sem força imprimida não poderia ocorrer variação na quantidade de movimento. Por último, a Terceira Lei também não é obedecida porque aparece alguma força sobre a caixa vinda "do nada", não existe ação agindo sobre a caixa, que, por sua vez, não exerce reação em corpo algum. Como explicar esta violação das Três Leis? Na realidade, não houve violação nenhuma, pois a caixa teve uma alteração de movimento relativo, mas não verdadeiro. (GOMES, 2007, p.48).

Para que se tenha uma ideia do que Newton pensava ao fazer a experiência do balde, vamos para um exemplo análogo ao balde. É a experiência da caixa e um trem, onde tem uma pessoa dentro do trem, o trem está se movimentando com uma certa velocidade, isso em relação ao famoso espaço absoluto. A pessoa que está dentro do trem nota que uma caixa se move em uma superfície livre de atrito. Do ponto de vista da pessoa que se encontra dentro do trem, do referencial dele, não se percebe forças agindo sobre a caixa ou algo que pudesse alterar o seu estado de repouso. Essa narrativa não pode ser atrelada às famosas leis do movimento, pois na primeira lei, o comportamento, a tendência da caixa era de ficar em repouso. Não pode ser

explicada pela segunda lei, porque sem força impressa não há movimento e por último, não pode ser responsabilizada a terceira lei, pois não existe ação sobre a caixa, logo não há reação.

Quando a caixa apresenta um movimento dito verdadeiro em consenso com o movimento relativo, ou seja, uma a força é imprimida ao corpo e a outra sem ação da força aplicada a um corpo. Essa analogia que se faz entre a experiência do balde de esta do trem, estar no campo de que a primeira é vinculada ao espaço- tempo absoluto e a segunda é quanto a movimentação da caixa dentro do trem sob o olhar de um observador. “Em algum momento, por forças impressas apenas no trem, este variou a sua velocidade - acelerou - o que deixou a caixa para trás, continuando, por inércia a se movimentar uniformemente em relação ao espaço absoluto.” (GOMES, 2007, p.48-49). O que aconteceu no experimento do balde está relacionada a força aplicada pelo balde na água, ou seja, no momento em que ambos se encontram em repouso, quando a superfície é plana e quando não. A discussão em foco é de que em um primeiro instante a água se encontra em repouso em relação ao espaço absoluto e em outro instante a água está rotacionando no que tange o espaço vazio. Na figura 1 a é possível visualizar o estado do balde em um primeiro momento, isto é, quando a água e o balde se encontram em repouso em relação a Terra.

Gomes (2007, p.49), argumenta a seguinte ideia sobre o formato parabólico da água, “[...] na visão de Newton a superfície da água torna-se côncava por ela ser impedida pelo balde de seguir, por inércia, um movimento retilíneo uniforme em relação ao espaço absoluto, como reza a Primeira Lei.” Na figura 1 b nota-se que o balde e a água estão girando em relação a Terra, assim a sua velocidade angular constante, quando se refere a um referencial inercial, provoca o formato de uma parábola.

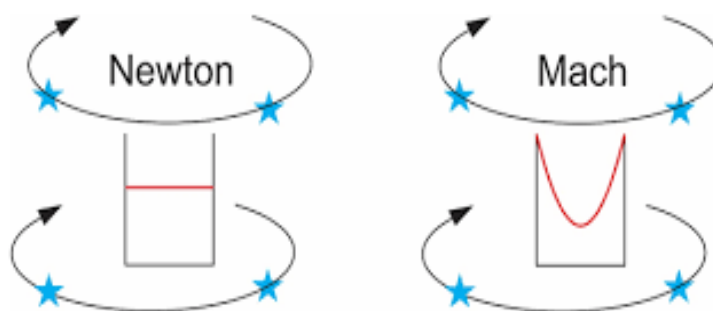
Sobre a experiência do balde de Newton, segundo Assis (1998, p.50) fica evidente a seguinte questão:

A importância desta experiência de Newton reside no fato de que ela mostra, para ele, como distinguir entre uma rotação absoluta e uma relativa. De acordo com Newton, a superfície da água será côncava apenas quando ela está girando em relação ao espaço absoluto.

Como é possível perceber, apesar de ser uma experiência aparentemente simples e ter sido realizada em meados do século XVII, ela abre um emaranhado de possibilidades, pensamentos e dúvidas acerca dela. Além de promover dúvidas, Newton conseguiu juntar inúmeros críticos a sua teoria, da existência de um espaço absoluto, sendo o mais famoso deles o físico austríaco Ernst Mach, coerente com seus pensamentos e suas concepções. Mach não

concordava com muitos dos conceitos newtonianos, não era apenas a respeito do espaço absoluto, era alvo de críticas por parte de Mach o conceito newtoniano de massa, tendo como argumento a interação entre os corpos, ou seja, ao interagirem um corpo com o outro vai ocorrer uma aceleração em direções opostas.

**Figura 2** – Representação esquemática do Pensamento de Mach



Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=inerzia-e-principio-de-mach>

Ernst Mach criticou os conceitos newtonianos de espaço absoluto, argumentando que ele não é válido e não promove ações no que tange a composição da matéria, ou seja, quando o assunto está relacionado aos fenômenos naturais. Após examinar a experiência do balde de Newton, Mach fala a respeito da concavidade da superfície da água. Mach acreditava que a formação da concavidade da água se dava por meio de forças desenvolvidas pela rotação relativa à massa da Terra e de corpos celestes. Ele defendia ser inviável a interação de objetos no espaço, exceto pela interação de matéria com matéria. Segundo Newton (2022, p.45), “O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel.” Toda essa discussão sobre os relevantes conceitos newtonianos com base na experiência do balde, possibilitou Mach esboçar seu princípio, conhecido como “O Princípio de Mach”, tendo como grande viés a existência da inércia em decorrência da interação gravitacional (Figura 1a).

A ideia de Mach foi muito bem vista pelos cientistas, em especial, pelo físico alemão Albert Einstein. Einstein, viu a teoria de Mach com bom apreço, porém não foi levada a frente, visto que ela não estava matematizada, ou seja, provada matematicamente, apesar de fazer muito sentido. Mach consegue dar uma resposta ao que falou Newton sobre o espaço absoluto, pois se não haveria uma razão pela qual o espaço absoluto se encaixaria na conjuntura do balde, porque foi fomentada essa ideia? Nesse ambiente de interrogações, se não era em razão do conjunto de estrelas fixas, o motivo da forma côncava da água no interior do balde, poderia

estar associado a um cenário simétrico. Assim, de acordo com Gracia (2019, p.2), “[...], se apenas podemos experienciar o espaço dado com relação aos demais corpos, deve existir sempre uma influência mutuamente simétrica entre dois sistemas físicos. “Ainda que sua teoria a respeito do espaço-tempo absoluto não tenha sido carimbada, Mach fez grandes contribuições para a ciência, como na relatividade geral, onde Mach com a ação da distribuição do conjunto massa e energia, além da adoção referencial adotado, independentemente de seu referencial.

Nesse sentido, Gardelli (1999) afirma que:

É curioso notar que a noção de espaço absoluto (ou de referencial inercial desvinculado de qualquer corpo material) ficou tão enraizada entre os físicos que embora Einstein fosse simpatizante das idéias de Mach, o que ele acabou fazendo na prática, com sua Teoria da Relatividade Geral, foi dotar o espaço de propriedades físicas, preservando dessa maneira a idéia inicial de Newton sobre o espaço absoluto. (GARDELLI, 1999, p. 49).

Pode-se ressaltar a comparação da Mecânica Relacional e a Relatividade Geral de Einstein e a incorporação ao “Princípio de Mach”, seja de forma qualitativa quanto de forma quantitativa. Nesse contexto, onde somente a Mecânica Relacional consegue implementar quantitativamente as ideias de Mach, sendo que a teoria da Relatividade Geral não incorpora.

[...] a Relatividade Geral de Einstein não consegue explicar a experiência do balde de Newton em todos os referenciais. Se estamos no referencial das estrelas fixas, a concavidade da água quando está girando em relação às estrelas não tem nenhuma relação com as estrelas e galáxias distantes. Isto é, pode-se dobrar ou dividir por dois a quantidade de estrelas e galáxias, que a concavidade não vai ser alterada. Mas se analisamos o mesmo problema no referencial que gira com o balde e com a água, a situação muda na Relatividade Geral. Neste referencial observam-se as estrelas e galáxias girando ao redor do balde. De acordo com a força de Thirring, elas vão exercer uma força gravitacional real sobre a água, de tal forma que a concavidade da água passa a depender da quantidade e distribuição de estrelas e galáxias que existem no Universo. Isto é certamente insatisfatório, pois é a mesma situação, apenas analisada em referenciais diferentes. Num referencial os corpos celestes distantes não influenciam o comportamento local, sendo que isto já não acontece no referencial que gira com a água! Isto só acontece na teoria de Einstein. (ASSIS, 2001, p.33).

A experiência do balde de Newton entra como pano de fundo para que se tenha essa comparação. Foi a partir do resultado da experiência que Mach conseguiu elaborar o seu princípio. Assim sendo, foi necessário ter em mãos a base da experiência do balde, a concepção de Newton para que houvesse essa interpretação acerca da Mecânica Relacional e a teoria da Relatividade Geral. Portanto, viu-se que a experiência do balde de Newton foi e continua sendo muito discutida ao longo de muitos anos e percebe-se que apesar de ter hipóteses levantadas sobre o efeito da concavidade da superfície da água diante da atuação de um referencial

absoluto, de um espaço absoluto, em contrapartida, existe a crítica e no que lhe concerne por sua vez, um esboço de um princípio com base em seus pensamentos que alega que a concavidade produzida é por efeito/ação da rotação relativa à massa da Terra.

#### **5.2.1.1. Críticas de Ernst Mach a concepção newtoniana de inércia**

A mecânica newtoniana ficou marcada por emitir as concepções acerca das leis fundamentais do movimento dos corpos, além disso, várias outras definições foram exibidas no livro *Principia* de Newton, apresentando o que vinha ser massa, inércia, tempo absoluto, movimento absoluto e o espaço absoluto. A primeira concepção é exposta na definição I de acordo com Newton (2022, p.39), “a quantidade de matéria é a medida da mesma, [...]”, sendo obtida a partir do volume e da sua densidade. A massa muitas vezes é tida pelo nome de corpo ou como o peso de um corpo. Na segunda concepção é da inércia, também chamada de vis insita, Newton denomina a inércia como sendo a resistência a ação de uma força, isto é, de manter o seu estado em que determinado corpo se encontra, seja em repouso ou em movimento uniforme. Assim, Newton (2022, p.40) afirma que, “[...], um corpo só exerce essa força quando outra força, imprimida sobre ele, procura mudar sua condição;” notadamente, o ato de resistir, estar atrelado a objetos em repouso, do outro lado a impulsão estar associado ao movimento. No que se refere ao tempo absoluto, movimento absoluto e espaço absoluto se encontra no livro *Principia*, no entanto, está denotado na parte denominada como escólio. No *Principia*, Newton define o que é tempo absoluto e compara com o tempo comum. O tempo comum é contado a partir de termos concretos, associado a objetos, podendo está sob ação das leis da física. Newton acreditava que poderia medir o intervalo de tempo entre dois acontecimentos, desde que se utilize um relógio bem calibrado.

Sobre o tempo absoluto Newton (2022.p.45) afirma o seguinte:

I – O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração. O tempo comum aparente e relativo é uma medida de duração perceptível e externa (seja ela exata ou irregular) que é obtida por meio de movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano.

O movimento absoluto é aquele que independe da fonte externa que esteja atuando em um corpo em movimento. Movimento absoluto é conveniente quando está atrelado a um sistema

de referência nomeado como fixo, considerado também um procedimento abstrato. Um exemplo é em relação ao Sol, se ele é visto pelo planeta Terra, então as pessoas que estão se movendo ao redor. Newton (2022, p.) afirma no IV escólio, “[...] é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro.” Assim, se não for pela ação de uma força, o movimento absoluto não pode ser modificado e nem criado. Por fim, o tão questionado espaço absoluto, que segundo Newton (2022, p.45), “[...], em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel.” Isaac Newton foi sem dúvidas um grande nome da história da ciência, no entanto, nem todos os cientistas concordava tudo que Newton definia como algo certo, houve muitos que discordaram das suas ideias, um dos mais lembrados foi Ernst Mach. Mach fez severas críticas a concepção de Newton acerca do espaço e tempo absoluto, e à interpretação que o Newton deu aos resultados da conhecida experiência e à sua tentativa de vincular tais resultados à existência de um espaço-tempo absolutos, além de sua massa e conceito de inércia.

A concepção fomentada por Mach, está no campo dos movimentos relativos, ou seja, sem distinção do que é rotação ou translação. Como bem afirma Gardelli (1999, p.48) “[...]físico austríaco Ernst Mach (1838-1916) que afirmava ser inconcebível corpos interagirem com espaço, pois para ele, matéria só poderia interagir com matéria.” Quando o assunto em questão é a experiência do balde girante de Newton, Mach parte da ideia de que a água no interior do balde ficará côncava, do ponto de vista cinemático. Sabe-se que foi a partir da concepção anterior que formulou o chamado princípio de Mach, onde relaciona a inércia e sua interação gravitacional.

Segundo Carmo (2020, p. 26-27):

A argumentação a favor do espaço absoluto não agradou a todos, principalmente os que chamaremos aqui de relativistas, que defendem que a causa de qualquer movimento devem ser a partir de movimentos relativos. Contemporâneos à Newton, Huygens e Leibniz foram os que mais tentaram refutar a teoria newtoniana de espaço absoluto e posteriormente, Ernst Mach, quase 200 anos após as publicações de Newton, tentou criar uma nova teoria para a origem da inércia com argumentos a favor ao relativismo do movimento.

A possibilidade da existência de um espaço absoluto lançada por Isaac Newton, era visto como algo incompreensível por parte de Mach. “Mach não via sentido em movimentos absolutos, sua aversão a conceitos metafísicos era enorme, de acordo com Max Jammer (JAMMER, 2009, p. 185 *apud* Carmo. 2020, p. 28).” Para o caso da experiência do balde, Mach

argumenta sobre a possibilidade de uma origem dinâmica, para uma dada força centrífuga, em relação aos corpos celestes.

O experimento de Newton com o recipiente cheio d'água é submetido a um movimento de rotação, nos informa, simplesmente, que a rotação relativa da água com respeito aos lados do recipiente não produz forças centrífugas aparentes, mas que tais forças são produzidas por seu movimento relativo à massa da Terra e aos outros corpos celestes. Ninguém pode dizer como transcorreria o experimento se os lados do recipiente aumentassem em espessura e massa até finalmente alcançarem várias léguas de espessura. (JAMMER, 2009, p. 184 in CARMO, 2020, p. 29)

Assim sendo, as críticas realizadas por Mach vai no sentido de que o balde em consonância com a água não poderia formar uma força centrífuga visível. Segundo Carmo (2020, p.29) “Para Mach, o movimento do balde apenas em relação à água não gerava forças centrífugas perceptíveis. O giro do balde em relação às massas contidas no universo eram geradas, uma vez que as bordas do balde se alongassem. Dessa maneira, Mach achava desnecessária levantar essa questão: a existência de um espaço absoluto na experiência do balde.

#### **5.2.1.2. Afinal de contas qual a solução para o problema do balde de Newton**

Certamente, o problema do balde de Newton abriu caminho para muitas concepções e controvérsias no que corresponde a formação da concavidade da água no interior do balde. Newton admitia que o formato se dava por conta do giro da água em relação ao espaço absoluto, todavia nem todos os estudiosos como Ernst Mach considerava uma solução a ser encarada como certa. Newton pressupõe três possíveis razões à causa da depressão da água, a rotação em relação ao balde, em relação às estrelas ou em relação à Terra, mas nenhuma delas é conclusiva. Para Mach, o movimento do balde em relação à própria água não criou forças centrífugas perceptíveis, em outras palavras Mach nota que a concepção de Newton está errada, porém, não consegue expor suas ideias matematicamente falando.

Então, qual é a solução para o problema do balde de Newton? A solução para o problema está no que se refere a superfície do líquido em rotação, através da lei de Stevin, matematicamente falando. A lei de Stevin enuncia a variação da pressão de acordo com a sua profundidade, isto é, a pressão do fluido aumenta se a profundidade aumentar. Trata-se da variação de pressão em dois pontos num mesmo líquido ou fluido, onde  $p$  é a pressão em um

ponto qualquer no interior do líquido, a uma dada profundidade **h**, **p<sub>0</sub>** é pressão atmosférica, pressão no líquido. É certo que em ambos os casos, a unidade é representada por **Pa**, pascal. O **ρ** é determinado como a densidade do líquido, podendo ser expressa nas seguintes unidades g/cm<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>, **g** corresponde a aceleração da gravidade dada por m/s<sup>2</sup> e por fim, **h** a altura da coluna do líquido acima do ponto observado calculado em metros.

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1)$$

Considerando um recipiente contendo um líquido girando uniformemente com uma velocidade angular diferente de zero em relação ao eixo vertical qualquer (x, y ou z). Vê-se que após um certo tempo o líquido gira junto com o recipiente, neste cenário o líquido se encontra em equilíbrio quando tem-se um referencial não inercial.

Fazendo a decomposição e as substituições necessárias, por meio da densidade da força centrífuga, logo após substituir pelo componente da energia potencial centrífuga, encontra-se a densidade total, dada pela junção dessas forças. Situando como origem o centro do balde, tomando como distância **r** do eixo e o eixo **Z** iguais a zero, sabendo que **p = p<sub>0</sub>**. Possibilitando chegar na distribuição de pressão no líquido, dada pela seguinte equação:

$$p = p_0 + \frac{1}{2}\omega^2 r^2 - \rho gz \quad (2)$$

Percebe que existe forças agindo sobre o líquido, como da gravidade que se dar pela força peso, de densidade de energia potencial e centrífugas conhecida também como força fictícia.

Esta força fictícia é causada por um objeto que se encontrar em um referencial não inercial, onde Newton diz não existir. Esta força de inércia, que só existe no referencial S' em rotação, chama-se força centrífuga: ela é dirigida radialmente para fora e tem magnitude  $m\omega^2 r = mv^2/r$ , onde  $v = \omega r$  é a velocidade de rotação da partícula. (NUSSENZVEIG, 2013, p.356)

Dessa forma, imaginando novamente um balde suspenso por uma corda presa na alça do balde, no seu interior foi posta água, ele se encontra parado, em relação à Terra, assim, se

ambos estão parados, ou seja, em repouso a velocidade angular da água e do balde é igual a zero e o formato da água é plana. No segundo momento, a torção na corda faz com que o balde gire, quando o balde é solto movendo-se em uma determinada direção, a velocidade angular do balde é diferente de zero e, como resultado, a velocidade angular da água é diferente da velocidade angular do balde, exceto nas bordas do balde, porque há atrito entre a água e o balde, a energia e velocidade são transferidas. Após um período a velocidade angular da água e do balde, nessa terceira situação acontece a curvatura da água, a famosa concavidade, onde pode ser descrita matematicamente pela equação da superfície livre dada por:

$$Z = \frac{\omega^2}{2g} r^2 \quad (3)$$

A fórmula representa a altura com que a água subiu as paredes do balde representada por **Z**, quando elemento girante é diretamente proporcional a velocidade angular da água, dada por  $\omega$ , onde g que divide a velocidade angular e está sendo multiplicado por 2 é a aceleração da gravidade, pelo produto da distância sendo representada por **r**, distância que vai do centro do paraboloide a borda do balde. Na distância do eixo de simetria até a borda do balde, há uma tendência da água em se afastar do centro do balde, (ver, por exemplo, Nussenzweig, 2018, p.7-8). Portanto, por esta indagação acima comprova que Newton estava errado na sua proposição, no de vincular a concavidade da água no interior de um balde ao referencial absoluto, através da paraboloide de revolução.

### 5.3 A inércia na teoria da relatividade

“A inércia de um corpo dependente de seu conteúdo de energético?”. Esta pergunta se encontra no livro “Textos Fundamentais da Física Moderna: O Princípio da Relatividade”, volume 1 de 1958, no artigo intitulado de “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”, publicado em 1905 por Einstein. Nele, Einstein escreve um trabalho inteiro para provar a afirmação de que sim, a inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético, em outras palavras o vínculo da massa com a energia existe a depender da massa e a sua quantidade energética. Porém, antes de alcançar o sim, muito foi discutido a respeito da relação entre a massa e energia.

James Clerk Maxwell (1831-1879), conhecido por sintetizar a teoria moderna do eletromagnetismo, tendo em vista, estudos sobre as propriedades do éter em meados do século XIX, entendeu que a energia poderia ser associada ao campo elétrico e também ao magnético. Para Martins (2015), considerando um capacitor inicialmente descarregado e com cargas elétricas opostas, a energia eletrostática que nele se acumula pode ser calculada simplesmente calculando o trabalho realizado sobre as cargas que se movem sobre as placas. Maxwell tinha em mente que a energia eletrostática na verdade era energia potencial ligada as chamadas tensões do éter e não dentro da carga, por exemplo (ver, por exemplo, Martins, 2015, p.133-139). Contudo, um outro pesquisador já havia conseguido realizar verificação matemática, William Thomson (1824-1907). Maxwell demonstrou quantitativamente que a energia eletrostática ligada a um dado condutor poderia ser calculada verificando o campo elétrico, por exemplo (ver, por exemplo, Martins, 2015, p.147-148).

O éter na teoria de Maxwell também possuía energia cinética, porém era associado a um campo elétrico. Já que a energia cinética está relacionada ao movimento, pode-se fazer uma associação com a corrente elétrica quando se movimenta através do fio e a transmissão é interrompida, vê-se uma pequena faísca ao cortar o fio, pode-se dizer que o movimento da faísca continuaria caso o fio não fosse partido ao meio. De acordo com Martins (2015, p.135), “esse fenômeno é devido à autoindução das correntes elétricas e foi considerado por Maxwell como semelhante à inércia dos corpos materiais.” Entretanto, não se pode levar ao pé da letra, pois a ideia acima não possibilita dizer que tal efeito se deve ou é semelhante à inércia, independente da intensidade da corrente, comprimento do fio e do condutor. É verdade também que o conceito de energia naquela época estava em ascensão e por isso que muitos pesquisadores foram em busca de explicações quanto as transformações energéticas. O éter por sua vez, foi associado a muitas coisas, como do movimento e da pressão, por exemplo (ver, por exemplo, Martins, 2015, p.137). A pressão de radiação é consequência da teoria de Maxwell, porém ela já tinha sido realizada por outro estudioso, Adolfo Bartoli (1851-1896), com um dispositivo que utilizava cilindro com pistão responsável por verificar o trabalho realizado por um gás.

Martins (2015, p.137), faz o seguinte comentário sobre o dispositivo de Bartoli:

[...], supôs que o espaço dentro do cilindro estava cheio de radiação (e não de matéria), e que as paredes do cilindro e do pistão seriam espelhos perfeitos. Quando o pistão se move, o comprimento de onda da radiação refletida é comprimida, (por causa do efeito Doppler-Fizeau). Quando a radiação é comprimida, sua temperatura aumenta, e quando a radiação se expande, sua temperatura diminui.

A teoria de Bartoli foi logo aperfeiçoada por Boltzmann (1844-1906), levando em consideração na análise da termodinâmica em 1844 que concorda com a teoria de Maxwell, no que se refere a pressão da radiação. Outros estudiosos como Henri Poincaré, no final do século XIX, tomaram partido da teoria do Bartoli analisando outras questões como quantidade do movimento e a sua conservação, relacionada aos meios eletromagnéticos. As características do éter eram muito debatidas por diversos cientistas, o movimento do éter no fluxo de energia de Poyting e Heaviside, o éter como algo mais estático, como na visão de Lorentz, ou seja, que não poderia existir momentum no éter, as teorias de Fresnel e Stokes sobre o éter (*ibid.*). Para que isso ocorra, muitos defendiam que se deveria levar em conta que o éter possuía massa e, portanto, ele se movia. No século XIX, os estudantes William Craig e John Henry buscaram entender o famoso fluxo do éter, tentaram identificar um fluxo de energia perpendicular aos campos, campo magnético e elétrico de forma cruzada, por meio de uma técnica interferométrica, a intenção era observar o comportamento da velocidade da luz em direção ao fluxo energético e perceberam que a variação da velocidade era muito pequena, Lorentz ainda não acreditava que o éter podia se mover (*ibid.*).

Realmente, vê-se que o assunto do momento, era a energia e concomitantemente a massa, tendo em vista a sua utilidade para com a inércia e principalmente para sintetização da famosa fórmula de Einstein,  $E = m.c^2$ , onde concede a equivalência massa-energia, ou seja, a massa estando em repouso equivale a energia em repouso. Vale a pena ressaltar que mais à frente do trabalho, a fórmula  $E = m.c^2$  é representada por letras diferentes, apenas para seguir a referência que está representada no livro “Textos Fundamentais da Física Moderna: O Princípio da Relatividade”, como a energia  $L$  equivalendo a  $E$ , velocidade da luz  $c^2$  como sendo  $V^2$ . Segundo Lemos (2001, p.3), “[...] Einstein considerou irrelevante o fato de a energia ter sido emitido pelo corpo na forma de radiação, [...].” Supondo que um dado corpo emite pulsos de radiação semelhantes e em direções distintas, ou seja, a medida em que a energia de um corpo aumenta, a sua inércia vai aumentar junto, da mesma forma se fosse do contrário, na diminuição energética. Do mesmo modo, uma porção grande de energia recebida ou cedida, corresponde a uma mínima quantidade de inércia, recebida ou perdida. “Se um corpo perder a energia  $L$  em forma de radiação, a sua massa sofre a diminuição  $L/V^2$ . É claro que nada importa ser ou não direta a transformação da energia saída do corpo em energia de radiação, [...]” (LORENTZ; EINSTEIN; MINKOWSKI, 1958, p.90). Assim, a massa de um corpo é dita como uma medida de seu conteúdo energético. “[...], se a energia sofrer uma variação igual a  $L$ , a sua massa sofrerá, no mesmo sentido, ocorre uma variação igual a  $L/9.10^{20}$ . ” (LORENTZ; EINSTEIN;

MINKOWSKI,1958, p.90). Quando se fala no mesmo sentido, fala-se que se a energia sofrer alteração a massa sofrerá também. Assim, Albert Einstein utiliza a velocidade da luz no vácuo, onde aqui está representada pela letra  $V$ , ainda no sistema CGS, isto é  $V = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s, a massa sendo medida em gramas e a energia em ergs, unidades de medidas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A discussão sobre o conceito de inércia e sua evolução foi o ponto central para entendimento da mecânica newtoniana, para aplicações e foi crucial para o advento da teoria como o da relatividade. Levando em conta tudo que foi fomentado no trabalho acima, pode-se ressaltar que a inércia é uma temática muito extensa, porque traz considerações relevantes acerca da origem e também de seus aspectos evolutivos, indo de Aristóteles a Einstein, com base no desenvolvimento histórico.

O processo construtivo do conceito de inércia foi marcado por inúmeros acontecimentos. Para obter a definição que se tem hoje, muito foi discutido sobre a natureza dos movimentos dos corpos, buscou-se o entendimento do que era força e massa. O conhecimento adquirido com a definição de força e quantidade de matéria contribuíram para a expansão do que hoje é conhecido por mecânica newtoniana, do mesmo modo que possibilitou a difusão da mecânica clássica. As leis fundamentais dos movimentos dos corpos se tornaram cada vez mais importantes, pois proporcionava o entendimento de que modo os corpos interagiram e se moviam.

A história da inércia conduzia os estudiosos e suas indagações para um caminho de descobertas e deu margem para debater a proximidade que ela reunia com outras bases teóricas, cada uma no seu devido tempo e com entendimento próprio do que o conceito de movimento revelava do comportamento do estado de inércia de um corpo.

Foi possível também compreender um pouco mais sobre uma das experiências mais famosas de Newton, a experiência do balde de Newton e obter a conexão com a inércia, a partir do conhecimento adquirido por meio do referencial inercial e consequentemente da sua massa inercial. Além da discussão em torno da existência de um espaço absoluto, em relação à justificativa dada pelo Newton para a concavidade da superfície da água. E como toda hipótese ou teoria, ela é observada, tem delas que são consideradas possíveis e tem delas que não, são rebatidas, questionadas, a existência de um referencial absoluto foi veementemente questionada por Mach, apontando outro motivo para a formação da concavidade da água.

Vale ressaltar a solução matemática para o problema do balde de Newton, apesar de não tocar no porquê da superfície ser curva. A solução via mecânica newtoniana encontra uma paráboloide, mas afinal de conta ser inércia é resistência na mudança em seu estado de movimento, mudando em relação a que referencial inercial, quanto a isso ela não entra em

discussão é meramente matemático. Além da dependência da inércia quanto ao seu conteúdo energético, na chamada equivalência massa-energia, ou seja, conforme a energia do corpo aumentava, sua inércia aumentava junto, um questionamento muito importante e que contribuiu para construção da relatividade restrita de Einstein. Assim sendo, torna-se perceptível a relevância que a inércia teve para explicar assuntos diversos, da quantidade de matéria, força, bem como para explicar assuntos associados a ela como foi do experimento do balde e da relatividade restrita e percebe o quanto a inércia foi ganhando corpo entre todas as definições e interpretações para quem se mostrou interessado em explicar o movimento dos corpos.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, I. do N. **Uma breve discussão sobre a cosmologia newtoniana baseada na abordagem de Milne**. Orientador: Prof. Dr. Jean Paulo Spinelly da Silva. 2013. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/123456789/2266>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ASSIS, A.K.T. Comparação entre a Mecânica Relacional e a Relatividade Geral de Einstein. **Fundamentos da Física**, p. 27-38, 2001. Disponível em: [https://www.ifi.unicamp.br/~assis/comparacao-mec-relac-relat-geral-p27-38\(2001\).pdf](https://www.ifi.unicamp.br/~assis/comparacao-mec-relac-relat-geral-p27-38(2001).pdf). Acesso em: 19 jun. 2023.

ASSIS, A.K.T. Experimento de pensamento de Mach. 2020. 1 imagem. 600 x 280 pixels. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=inerzia-e-principio-de-mach>. Acesso em: 15 de novembro de 2022.

BERTAIZI, M. H. Da relatividade de movimentos ao universo pleno: as concepções de inércia em Galileu e Descartes. **Temporalidades**, v. 11, n. 2, p. 501-519, 2019.

CARMO, H.D.O.D.D. **A origem da inércia e referenciais não inerciais**. Orientador: Prof. Dr. José Lourenço Cindra 2020. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/235336/carmo\\_hdod\\_tcc\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/235336/carmo_hdod_tcc_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 19 jun. 2023.

CARVALHO, H. R. D.; NASCIMENTO, L. A. D. COPÉRNICO E A TEORIA HELIOCÊNTRICA: Contextualizando os Fatos, Apresentando as controvérsias e Implicações para o Ensino das Ciências. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia - RELEA**, Santa Catarina, n. 27, p. 7-34, 2019. Disponível em: <https://docplayer.com.br/174260818-Copernico-e-a-teoria-heliocentrica-contextualizando-os-fatos-apresentando-as-controversias-e-implicacoes-para-o-ensino-de-ciencias.html>. Acesso em: 19 jun. 2023.

COPÉRNICO, N. **Commentariolus**: Pequeno Comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes. 2ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

DE GRACIA, G. B. A física na visão de Ernst Mach: De uma crítica a Newton às teorias gravitacionais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, 2019. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/cn4MJqCktwCcrjczfFjC9xH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 jun. 2023.

DIAS, R.H.A. “**Ano Mundial da Física**”: A história de Albert Einstein e o papel do jornalismo mundial. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337657594\\_Ano\\_Mundial\\_da\\_Fisica\\_A\\_historia\\_d\\_e\\_Albert\\_Einstein\\_e\\_o\\_papel\\_do\\_jornalismo\\_mundial](https://www.researchgate.net/publication/337657594_Ano_Mundial_da_Fisica_A_historia_d_e_Albert_Einstein_e_o_papel_do_jornalismo_mundial). Acesso em: 19 jun. 2023.

FABRISH, J. C.; VELTEN, H. E. S. Cosmologia neo-newtoniana: Um passo intermediário em direção à relatividade geral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Espírito Santo, v. 34, n. 4<sup>a</sup>, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Q8Y8jW9XjcDKcwhRjPnWdsK/?lang=pt>. Acesso em 19 jun. 2023.

GARDELLI, D. A origem da inércia. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 43-53, 1999. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6875/6335> Acesso em: 15 jul. 2023.

GERHARDT, T.E; SILVEIRA, D.T. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GIL, A.C et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, L.C. O experimento do balde girante de newton: muitas perguntas, poucas respostas. **Acta Scientiae**, v. 9, n. 2, p. 39-63, 2007. Disponível em: <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/acta/article/view/85/77>. Acesso em: 19 jun. 2023.

LEMONS, N.A. E mc<sup>2</sup>: Origem e Significado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, 2001. Disponível em: [https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v23\\_3.pdf](https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v23_3.pdf). Acesso em: 19 jun. 2023.

LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **Textos fundamentais da física moderna: o princípio da relatividade** Tradução Mário José Saraiva. 3.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, [1983]. v.1. Título original: Das relativitätsprinzip. Conforme 6 ed. de B. G. Teubner, Stuttgart, 1958.

LOUZADO, G. L. Considerações sobre inércia, causalidade e temporalidade em Descartes. **DoisPontos**, v. 16, n. 3, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/doispontos/article/view/66669>. Acesso em: 19 jun.2023.

MARTINS, R. D. A. A dinâmica relativística antes de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 11 - 26, 2005. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/VKmQQSDtnY7GQ3YNQF5sZpM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 Mar. 2023.

MARTINS, R. D. A. **A origem Histórica da Relatividade Especial**. 1ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2015.

MARTINS, R. D. A. **O Universo**: Teorias sobre sua origem e evolução. 2ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

MARTINS, R.D. A. O surgimento da teoria da relatividade restrita. **Tópicos de história das ciências naturais**. São Paulo: Editora Manole (no prelo), 2018.

MOREIRA, M.A.; ROSA, P.RS. Pesquisa em ensino: métodos qualitativos e quantitativos. **Porto Alegre: UFRGS**, 2009.

MORAIS, A. M. **Gravitação & Cosmologia**: uma introdução. 1ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2009.

NEVES, M. C. D. A Terra e sua Posição no Universo: Formas, Dimensões e Modelos Orbitais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Maringá, v. 22, n. 4ª, p. 557-567, Dezembro 2000. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/341685909\\_A\\_Terra\\_e\\_sua\\_Posicao\\_no\\_Universo\\_Formas\\_Dimensoes\\_e\\_Modelos\\_Orbitais](https://www.researchgate.net/publication/341685909_A_Terra_e_sua_Posicao_no_Universo_Formas_Dimensoes_e_Modelos_Orbitais). Acesso em: 19 jun.2023.

NEVES, M.C.D. “Conatus recedenti ab axe motus” ou a parábola do balde de Newton. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 22, p. 1263-1267, 2000. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277050114\\_Conatus\\_recedenti\\_ab\\_axe\\_motus\\_ou\\_a\\_parabola\\_do\\_balde\\_de\\_Newton](https://www.researchgate.net/publication/277050114_Conatus_recedenti_ab_axe_motus_ou_a_parabola_do_balde_de_Newton). Acesso em: 19 jun.2023.

NEWTON, I. **Principia**: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2022.

NOVELLO, M. **Cosmologia**. 1ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica, 1: Mecânica**. 5ª. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

NUSSENZVEIG, H.M. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor**. Editora Blucher, 2018.

PESSOA Jr, O. Experimento do Balde e Espaço Absoluto, In: **Filosofia da Física Clássica**. São Paulo: USP, 2019. nº XII p. 88-94. Disponível em: <https://opessoa.fflch.usp.br/sites/opessoa.fflch.usp.br/files/FiFi-20-Cap12-Balde-Espaco-Absoluto.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

PIRES, A. S.T. **Evolução das Idéias da Física**. Editora Livraria da Física, 2011.

POLITO, A. M. M. Galileu, Descartes e uma breve história do princípio de inércia. **Physicae Organum-Revista dos Estudantes de Física da UnB**, v. 1, n. 1, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/physicae/article/view/12624/11031>. Acesso em: 19 jun.2023.

PORTO, C. M; PORTO, MBDSM. Galileu, Descartes e a elaboração do princípio da inércia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, p. 4601-4610, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/pyGCXNv3VrFmscJLXG9csLH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 jun.2023.

PORTO, C. M.; PORTO, MBDSM. Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 1603.1-1603.8, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/66h6nNwH5hdBMM9MMQ36YkK/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03 dez. 2022.

REDINZ, J. A; **As aulas de mecânica clássica Newtoniana**. 6ª.ed. Minas Gerais, 2021.

RIBEIRO, M. B. Cosmologia Newtoniana. **Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 34-63, 1994.

RIFFEL, R. A. Uma Introdução a Teoria da Relatividade Especial. **Material didático elaborado para a disciplina de Relatividade Especial do curso de Física Licenciatura a Distância UFSM/UAB**. Santa Maria, 2010. \_E-book.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. Cortez editora, 2017.

SIMON, S.; REZENDE, E. Breve História da Inércia-I: o problema do movimento de Aristóteles a Copérnico. **Revista de Filosofia Moderna e Contemporânea**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 241–266, 2018. DOI: 10.26512/rfmc.v6i1.20409. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/fmc/article/view/20409>. Acesso em: 13 dez. 2022

SISTEMA do mundo: A Cosmologia Newtoniana é um Esforço de Acomodação de Problemas Matemáticos e Questões de Ordem Teológica. **Scientific American Gênios da Ciência: Newton Pai da Física Moderna**, São Paulo, n. 1, p. 71-75, 2007.

VALADARES, J.A. O conceito de massa. I. Introdução histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 15, p. 110, 1993. Disponível em: <  
<https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol15a13.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2022.

VALADARES, J.A. O conceito de massa. II. Análise do conceito. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 15, p. 118, 1993. Disponível em:<  
<https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol15a14.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2022.

XAVIER, M.B. **Inércia, Espaço e Tempo (com uma aplicação teórica que dispensa a Matéria Escura)**. 2015. 68f. Tese de (Doutorado) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015 Disponível em:<  
[https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/20150/1/ulfc114352\\_tm\\_Manuel\\_Xavier.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/20150/1/ulfc114352_tm_Manuel_Xavier.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2022.