



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

## **FORÇAS DE MARÉS PARA O ENSINO MÉDIO**

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador(es):  
Antônio Carlos Fontes dos Santos

Rio de Janeiro  
26 de junho de 2023

## FORÇAS DE MARÉS PARA O ENSINO MÉDIO

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Orientador:  
Antônio Carlos Fontes dos Santos

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

---

Dr. Antônio Carlos Fontes dos Santos (IF-UFRJ/M. interno) (Presidente)

---

Dr. Alexandre Lopes de Oliveira (IFRJ/M. externo)

---

Dr. Carlos Augusto Domingues Zarro (IF-UFRJ/M. interno)

---

Dr. Lucas Maurício Sigaud (IF-UFF/M. externo)

Rio de Janeiro  
26 de junho de 2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

M543f Menezes Junior, João Carlos Ferreira  
Forças de Marés para o Ensino Médio / João Carlos  
Ferreira Menezes Junior. -- Rio de Janeiro, 2023.  
341 f.

Orientador: Antônio Carlos Fontes dos Santos.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós  
Graduação em Ensino de Física, 2023.

1. Ensino de Física. 2. Marés. 3. Concepções  
espontâneas. I. Fontes dos Santos, Antônio Carlos ,  
orient. II. Título.

## **Agradecimentos**

A minha mãe, Valquíria de Souza Rodrigues, por ter me dado a vida, me protegido e me guiado durante meus primeiros anos de existência.

A minha esposa, Gabriella Galdino da Silva, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, por sua paciência, compreensão e apoio em todas as áreas da minha vida.

Às minhas irmãs, Aline de Mello Menezes e Michelle de Mello Menezes, pela companhia salutar, alegre e de aprendizado. Ao meu cunhado, Daniel Oliveira, pelas conversas construtivas e produtivas. A minha tia, Heloiza Helena, por ter me acolhido em um momento difícil da vida.

Aos colegas de classe, por tornarem o ambiente acadêmico mais agradável.

Por fim, ao meu orientador, Antônio Carlos Fontes dos Santos, por toda a orientação e *feedback* durante minha pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

### FORÇAS DE MARÉS PARA O ENSINO MÉDIO

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Orientador:

Antônio Carlos Fontes dos Santos

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

O ensino sobre o fenômeno das marés justifica-se por várias razões, incluindo sua importância histórica, social e econômica. A partir de uma análise da estrutura de conteúdo sobre marés nos livros didáticos e na literatura de ensino de física, levando em consideração as concepções alternativas dos estudantes sobre o assunto, apresentamos uma proposta de ensino de marés em uma abordagem simples e qualitativa para o Ensino Médio. Utilizou-se a Metodologia de Reconstrução Educacional para realizar um levantamento do universo de trabalhos sobre o ensino de marés, definindo os conteúdos presentes nos artigos consultados, classificando-os e categorizando-os. Propomos uma sequência didática baseada na análise de conteúdo do universo bibliográfico sobre o ensino de marés e das concepções alternativas dos estudantes. Dos 143 livros didáticos analisados, apenas 4 explicam as marés de forma adequada, considerando a análise de conteúdo do nosso estudo. Dos 55 trabalhos analisados, 27 são voltados para os professores e apenas 9 levam em consideração as concepções alternativas dos estudantes, ou seja, há muitos textos didáticos voltados para professores e poucos sobre a compreensão conceitual dos alunos. Assim, elaborou-se um compilado das principais concepções espontâneas dos estudantes a respeito do assunto. A proposta foi aplicada em duas turmas presenciais do Ensino Médio (1ª e 3ª séries) de um colégio e curso particular da zona norte do Rio de Janeiro, RJ. Mesmo sendo uma amostra pequena, as concepções mais evidentes apareceram. Como produto educacional, além do roteiro da proposta de aula, elaborou-se um livreto histórico das principais explicações das marés para auxiliar o leitor a identificar os pontos principais da história desse fenômeno.

**Palavras-chaves:** ensino de física, marés, concepções espontâneas.

Rio de Janeiro  
26 de junho de 2023

## **ABSTRACT**

TIDAL FORCES TO HIGH SCHOOL

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Supervisor:

Antônio Carlos Fontes dos Santos

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

Teaching about the tide phenomenon is justified for several reasons, including its historical, social, and economic importance. Based on an analysis of the content structure of tides in textbooks and physics teaching literature, taking into account students' alternative conceptions about the subject, we present a proposal for teaching tides in a simple and qualitative approach for high school students. The Educational Reconstruction Methodology was used to survey the universe of works on teaching tides, defining the contents in the consulted articles, classifying them, and categorizing them. We propose a didactic sequence based on the content analysis of the bibliographic universe on teaching tides and students' alternative conceptions. Of the 143 textbooks analyzed, only 4 adequately explain tides, considering the content analysis of our study. Of the 55 works analyzed, 27 are directed towards teachers, and only 9 take into account students' alternative conceptions; that is, there are many didactic texts aimed at teachers and few at students' conceptual understanding. Thus, a compilation of the main spontaneous conceptions of students regarding the subject was elaborated. The proposal was applied in two face-to-face high school classes (1st and 3rd grades) of a private school and course in the north zone of Rio de Janeiro, RJ. Even being a small sample, the most evident conceptions appeared. As an educational product, in addition to the proposal for the lesson plan, a historical booklet of the main explanations of tides was elaborated to assist the reader in identifying the main points of the history of this phenomenon.

**Keywords:** physics teaching, tides, spontaneous conceptions.

Rio de Janeiro  
26 de junho de 2023

## Sumário

Capítulo 1	Introdução .....	1
Capítulo 2	Metodologia de Reconstrução Educacional (MRE) .....	3
2.1	Análise da Estrutura de Conteúdo .....	5
2.2	Investigações Empíricas .....	6
2.3	Instrução .....	6
Capítulo 3	Ensino e Aprendizagem de Forças de Marés.....	8
3.1	Por que o Tema Forças de Marés?.....	8
3.2	Revisão Bibliográfica .....	11
3.3	Metodologia da Revisão Bibliográfica.....	13
3.4	Descrição dos trabalhos .....	14
3.4.1	Propostas Didáticas Testadas em Sala de Aula .....	15
3.4.2	Levantamento de Concepções Alternativas dos Estudantes.....	20
3.4.3	Bibliografias de Consulta para Professores .....	31
3.4.4	Livros Didáticos dentro do Programa Nacional do Livro Didático.....	57
3.4.5	Livros Didáticos fora do Programa Nacional do Livro Didático .....	87
3.4.6	Sites Populares.....	93
Capítulo 4	Teoria das marés de Newton.....	98
Capítulo 5	Aplicações da Sequência Didática.....	126
5.1	Primeira Aplicação .....	128
5.2	Segunda Aplicação .....	129
5.3	Entrevistas .....	130
Capítulo 6	Resultados das Aplicações.....	141
Capítulo 7	Considerações Finais .....	153
	Referências Bibliográficas.....	162
Apêndice A	Roteiro Didático: Forças de Marés.....	182
Apêndice B	Uma Aula sobre Forças de Marés para o Ensino Médio .....	206
Apêndice C	Teste Múltipla-Escolha de Forças de Marés para o Ensino Médio .....	213
Apêndice D	Livreto sobre a História das Principais Teorias das Marés .....	220
	Referências Bibliográficas.....	331

# Capítulo 1

## Introdução

O cotidiano das pessoas que residem nas regiões costeiras é influenciado pelas marés. Trabalhadores da pesca e da navegação, em especial, guiam-se pelas previsões de movimento das águas oceânicas para realizar suas atividades. As marés também têm sido utilizadas como fonte geradora de energia elétrica. Um dos modos de geração de energia funciona da seguinte maneira: gigantescos tanques são construídos para serem cheios com a água do mar na maré alta. Quando a maré baixa, ou seja, a água sai do tanque, faz girar uma turbina ali contida, assim produzindo energia elétrica. As marés, de duas formas, contribuem para a formação do relevo litorâneo: (a) o movimento das águas provoca continuamente o desgaste e a erosão – ou abrasão – do relevo da costa, desagregando rochas e deslocando materiais. Este processo cria diferentes formas de relevo ao longo do litoral e (b) as águas oceânicas, movidas pelas marés, transportam os sedimentos que se depositam ao longo da costa, contribuindo para a acumulação de materiais marinhos, criando assim outras formas de relevo como praias de areia, restingas, manguezais e ilhas (Martinez e Garcia, 2013). No Brasil, as marés apresentam um comportamento notável em diversas praias, tais como: Porto de Galinhas (PE), Maceió (AL), Maragogi (AL), João Pessoa (RN), Maracajaú (RN), Recife (PE), Praia do Atalaia em Fernando de Noronha (PE), Taipu de Fora (BA), Praia do Espelho (BA) e praias de Morro de São Paulo (BA), entre outras. O Maranhão, por exemplo, tem a maior variação de marés do Brasil e a terceira maior do mundo (<https://g1.globo.com/ma/maranhao/maranhao-natureza/noticia/variacao-de-mare-no-maranhao-e-uma-das-maiores-do-mundo.ghtml>). Não é para menos a importância de se consultar as tábuas das marés, pois os horários de passeio de barco dependem da maré alta para poder sair e não ficarem encalhados. Por isso que não é comum ter horários padrões para as chegadas e saídas dos passeios de barcos, apenas horários aproximados que variam de um dia para outro. Existem algumas regiões onde é possível notar uma diferença significativa entre os níveis da água durante as marés alta e baixa, chegando a aproximadamente 10 m. A baía de Fundy, localizada na Nova Escócia, é conhecida por apresentar as maiores variações, alcançando 15,3 m (Marmer, 1922; Walker, 1990). Isso

acontece devido à forma, tamanho e profundidade da baía, além da força de atração da Lua e do Sol.

Apesar de as marés estarem presentes no cotidiano das pessoas, o presente trabalho revela que muitos estudantes não sabem explicar suas causas e suas implicações na vida sociocultural de uma população, na história, na economia e na geografia de uma região. Pior que isso, é quando acabam acreditando em mitos e crenças a respeito da influência de eventos astronômicos na vida humana como as famigeradas míticas crenças das fases da Lua.

No capítulo **2**, descreve-se a metodologia empregada nesse trabalho: Metodologia de Reconstrução Educacional (MRE), em que se faz uma análise da estrutura de conteúdo, investigações empíricas e a construção da aula propriamente dita.

No capítulo **3** da presente dissertação, preocupou-se em fazer uma revisão bibliográfica sobre o assunto, levando em consideração artigos, revistas, dissertações, teses, livros didáticos e materiais de divulgação científica para verificar o que poderia ser levado para a sala de aula como uma proposta qualitativa a fim de contribuir para a compreensão desse assunto, relativamente complexo, por parte dos estudantes do Ensino Médio (EM).

No capítulo **4**, apresenta-se um resumo histórico das diversas teorias sobre esse fenômeno ao longo dos anos, citando alguns dos principais cientistas. A organização desse capítulo tentou seguir aproximadamente a linha cronológica das ideias sobre as marés. Ainda, tal resgate estará seguramente respaldado em diversos artigos e livros (Ekman, 1993; Marmer, 1922; Aiton, 1954; Cartwright, 1999; Mariconda, 2011; Woodworth, 2023; Bonelli e Russo, 1996, dentre outros).

No capítulo **5**, apresenta-se a proposta de aula, o pré-teste e o pós-teste aplicados aos alunos da 1ª série e da 3ª série do EM de um colégio e curso da zona norte do RJ. No capítulo **6**, aplicações dessa proposta são relatadas e analisadas. No capítulo **7**, faz-se as considerações finais da dissertação e, por fim, nos apêndices **A**, **B**, **C** e **D** encontram-se, respectivamente, o roteiro didático de forças de marés, uma aula sobre forças de marés para o EM, o teste múltipla-escolhas (pré-teste e pós-teste) aplicado, e o livreto sobre as principais teorias das marés ao longo da história (detalhamento do capítulo **4**).

## Capítulo 2

### Metodologia de Reconstrução Educacional (MRE)

Algumas das estruturas que têm sido usadas no desenvolvimento de sequências de aprendizagem baseadas em pesquisa podem ser encontradas na literatura de pesquisa. Por exemplo, Linjse (1995) descreve o modelo de pesquisa de desenvolvimento e Duit et al. (1997) usaram a MRE para desenvolver tais sequências. Essas estruturas contêm algumas diferenças entre si, mas o que todas elas têm em comum é a visão de que o desenvolvimento das sessões de ensino-aprendizagem é um processo cíclico, onde pesquisa, estudos empíricos e prática pedagógica caminham lado a lado.

Como referencial básico, o estudo relatado nesse trabalho aplica a MRE, utilizada por Viiri (1999, 2001 e 2004). A presente dissertação emprega o modelo metodológico focado nos estudantes brasileiros, cujo contexto social, econômico, cultural e geográfico é relativamente distinto dos finlandeses<sup>1</sup>. A MRE contém as seguintes fases interligadas: (1) *análise da estrutura de conteúdo*, (2) *investigações empíricas* e (3) *construção de instrução*. Este processo não é um processo linear, mas um processo cíclico contendo muitas interações e iterações entre essas três fases.

Dentro da MRE, é necessário analisar a estrutura de conteúdo. Esse componente tem como objetivo esclarecer a estrutura do conteúdo científico a partir de um ponto de vista educacional (Duit et al., 2012; Kattmann, 2007). Isso é feito com base em uma análise sistemática e crítica do conteúdo científico, envolvendo reflexões sobre sua validade e sobre sua importância para o ensino e na sociedade (Duit et al., 2012; Reinfried, Mathis e Kattmann, 2009). Com isso, busca-se identificar orientações educacionais sobre os conteúdos da ciência que possam contribuir para o planejamento de experiências de ensino e aprendizagem. Nesse sentido, sabe-se que o assunto marés se trata de um fenômeno relativamente complicado e, por isso, o autor da presente dissertação deliberadamente explica e ensina apenas uma ideia simplificada das marés para o público-alvo escolhido:

- (i) O que são as marés?
- (ii) A causa das marés.
- (iii) O gradiente gravitacional.

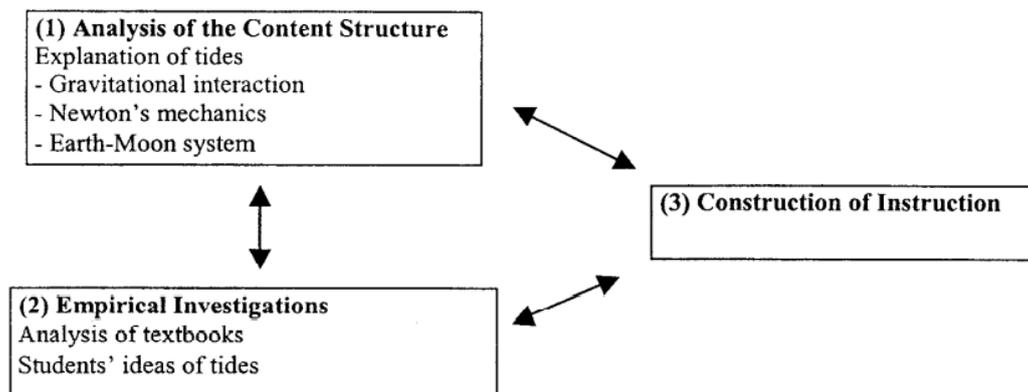
---

<sup>1</sup> Todos os trabalhos de Viiri são realizados na Finlândia.

- (iv) Periodicidade das marés.
- (v) Composição das forças de maré solares e lunares.

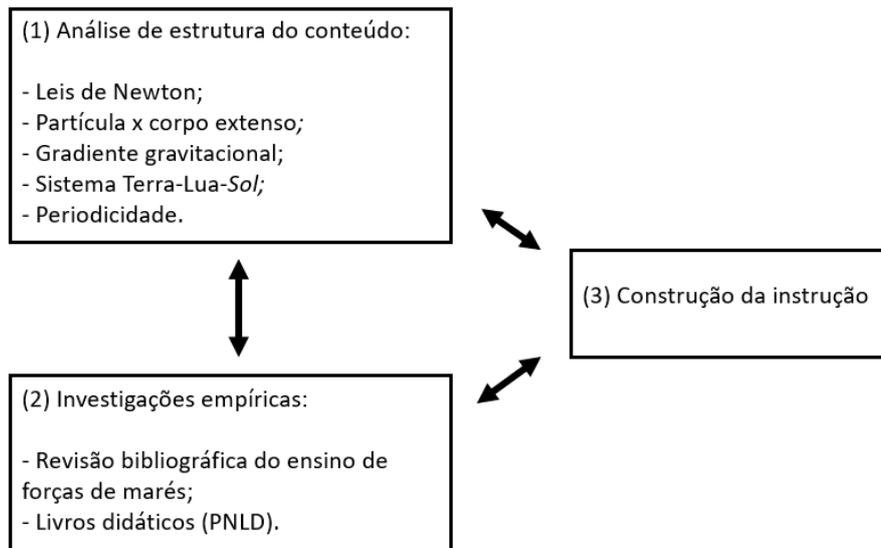
As teorias científicas que explicam as marés conforme são apresentadas em livros científicos (Darwin, 1962; Clancy, 1969; Landau, 1977; Arons, 1979; Marion, 1995; Moysés, 1997; Goldstein, 2002; Kibble, 2004; Morin, 2007, etc.) são inadequadas como tais para o nível do EM e precisam ser modificadas (Viiri, 2004). Ora, as teorias mais abstratas não podem ser ensinadas e apenas um número selecionado de modelos são adequados para uma faixa etária específica. Então, esses modelos precisam ser inteligíveis para os alunos e devem ser tão cientificamente válidos quanto possível (Viiri, 2004). Por essa razão, optou-se por aplicar, em sala de aula, a abordagem inspirada em Silveira (2003), com alguns ajustes, sobretudo na redução dos cálculos matemáticos.

A MRE foi aplicada ao desenvolvimento do ensino e aprendizagem das marés, elaborada por Viiri, conforme apresentada na figura 1 seguinte:



**Figura 1.** Reconstrução educacional usada por Viiri. Fonte: Viiri (2004, p.464).

Adaptando à realidade da vigente pesquisa, a reconstrução educacional aplicada ao desenvolvimento do ensino e aprendizagem das marés está apresentada na figura 2:



**Figura 2.** Reconstrução educacional usada na presente pesquisa. Fonte: autor, 2023.

## 2.1 Análise da Estrutura de Conteúdo

O objetivo da análise da estrutura de conteúdo era descobrir as ideias e conceitos centralmente importantes para descrever as marés no nível do EM. Consultando as referências do capítulo 3 e algumas do capítulo 4, separou-se cinco fatores básicos que foram julgados pelo autor e seu orientador como necessários para melhor compreensão do fenômeno das marés, a saber: (i) leis de Newton, (ii) diferença entre partícula e corpo extenso, (iii) gradiente gravitacional, (iv) sistema Terra-Lua-Sol e (v) periodicidade das marés. As leis de Newton são, na verdade, pré-requisito para o conteúdo de marés. No entanto, os sistemas compostos de três partículas de Silveira (2003, p.3-5) servem para embasar a aula e fazer esse resgate de conteúdo a fim de facilitar a compreensão de outros conceitos mais complexos, como por exemplo as forças internas e deformação dos corpos extensos. Nessa mesma linha de raciocínio, a diferença entre partícula e corpo extenso também foi escolhida como retomada de conceitos prévios para facilitar o entendimento das marés. Como se percebeu no estudo sobre o que os livros didáticos apresentam em suas explicações sobre as marés, o conceito de gradiente gravitacional (ou força gravitacional diferencial ou campo gravitacional não uniforme) é quase inexistente, embora seja um conceito-chave para entender o fenômeno. Por isso, ele é adicionado na análise de estrutura de conteúdo. O sistema Terra-Lua-Sol também é considerado por se tratar dos principais corpos envolvidos na formação das marés. Por fim, a periodicidade do fenômeno também é levada em consideração por ser, juntamente

com a explicação da causa do fenômeno, um dos tópicos recorrentes no levantamento bibliográfico.

## **2.2 Investigações Empíricas**

Nessa etapa, realizou-se uma análise de livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e o levantamento minucioso das concepções espontâneas dos estudantes sobre o fenômeno das marés. Essa parte será apresentada e analisada minuciosamente no capítulo 3.

## **2.3 Instrução**

Optou-se por uma aula expositiva e dialogada, pois julga-se que o assunto requer uma centralização voltada para o professor por conta de sua complexidade (Viiri, 2004, p.473).

Procurou-se tornar a duração do ensino da unidade tão curta quanto seria normalmente (2 tempos de 50 min = 1 h 40 min), para que ninguém pudesse criticar a sequência, alegando que os alunos aprenderiam naturalmente melhor se a unidade fosse mais longa do que o normal. Adicionalmente, para atender a falta de tempo que muitos professores alegam.<sup>2</sup>

O trabalho de Viiri foi feito em um curso de astronomia, de caráter facultativo<sup>3</sup>. Como nem todas as escolas oferecem eletivas ou cursos de astronomia aqui no Brasil, estruturou-se uma aula para ser inserida dentro de um conteúdo programático tradicional, mais especificamente no assunto de gravitação. A sequência didática sugerida pela maioria dos livros didáticos possui a seguinte linha cronológica de temas: (i) breve histórico da gravitação, (ii) leis de Kepler, (iii), lei da gravitação universal e (iv) outros assuntos<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> Esse talvez seja um dos grandes motivos de reclamações de professores que trabalham em escolas (ou cursos) públicas e particulares. Muitos reclamam que não tem tempo o suficiente para trabalharem determinados conteúdos da forma como gostariam.

<sup>3</sup> Como se fosse uma disciplina eletiva.

<sup>4</sup> A depender do livro didático, dentro destes “outros assuntos” tem-se: eclipses e fases da Lua, velocidade orbital de um corpo, imponderabilidade, velocidade de escape de um corpo, aceleração gravitacional aparente, marés, etc., vide capítulo 2 dessa dissertação.

Não optamos por aplicar um questionário aberto para analisar desenhos, pois isso já consta em alguns trabalhos (Viiri, 1999; Ucar, 2007), onde se percebe que alguns alunos procuram até mesmo apresentar em seus esquemas o(s) agente(s) causador(es) do fenômeno das marés e mudanças na paisagem para dar a ideia de periodicidade (desenha o mar de dia e de noite, por exemplo), só reforçando a importância de se dar atenção especial a esses dois tópicos principais, conforme constatado na análise da estrutura de conteúdo. Além disso, a opção pelo teste múltipla-escolha se dá pela sua preferência em aplicá-lo a uma população estatisticamente maior a fim de analisar seus resultados e com a possibilidade de validação estatística do teste, podendo ser facilmente aplicada em sala de aula por qualquer professor com o objetivo de realizar uma avaliação diagnóstica.

Iniciou-se com a aplicação do teste múltipla-escolha como pré-teste cuja duração deve ser de aproximadamente 15 min. Em seguida, a aula propriamente dita foi montada e lecionada no *Power Point* (PPT) através de alguns *slides*, usando imagens autorais e adaptadas para explicar as marés<sup>5</sup>. A duração dessa parte expositiva dialogada durou, em média, 45 min. Por fim, ainda usando os *slides*, são feitas algumas perguntas finais para verificar se houve alguma compreensão do tema por parte dos alunos, levando, em média 40 min. Por fim, em aula posterior, aplica-se o teste múltipla-escolha como pós-teste, cuja duração deve ser de aproximadamente 15 min, e com o objetivo de avaliar o ganho conceitual dos estudantes e da turma.

Resumindo, fez-se a análise de estrutura do conteúdo com as referências internacionais e nacionais. Em seguida, nas investigações empíricas, os livros didáticos do PNLD auxiliaram na escolha do tipo de abordagem em sala de aula com base nas principais concepções espontâneas dos estudantes. Finalmente, construiu-se a instrução formal. Apesar de parecer um processo linear, não se sucedeu dessa forma. Muitas vezes foi necessário reavaliar a instrução formal para adequá-la às concepções espontâneas dos estudantes. Como já foi destacado, essa metodologia se faz de maneira cíclica (Garcia da Silva et al., 2020).

---

<sup>5</sup> Por conta das inúmeras figuras complexas que são utilizadas, o PPT se demonstrou uma ferramenta mais promissora para otimização do tempo. A aula se encontra no apêndice B.

## Capítulo 3

### Ensino e Aprendizagem de Forças de Marés

Nesse capítulo, inicialmente, há uma explicação pela escolha do assunto (forças de marés). Em seguida, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o assunto, levando em consideração artigos, revistas, dissertações, teses, livros didáticos e materiais de divulgação científica para verificar o que poderia ser levado para a sala de aula como uma proposta de aula qualitativa a fim de contribuir com a compreensão desse assunto, relativamente complexo, por parte dos estudantes do EM.

#### 3.1 Por que o Tema Forças de Marés?

A escolha pelo assunto forças de marés se sustenta sobre os seguintes pilares: (i) o fenômeno das marés oceânicas é mais próximo da realidade de moradores de regiões litorâneas, podendo ser mais facilmente observado pelos alunos<sup>6</sup>, (ii) a pesquisa em ensino de física apresenta relativamente poucos trabalhos voltados para as concepções espontâneas dos estudantes sobre marés, (iii) a escassez do assunto em livros didáticos do PNLD, (iv) apesar de sua complexidade conteudista, pode ser entendido com uma abordagem mais simples e qualitativa e (v) a importância do tema para ordem histórica, social e econômica. À guisa de exemplo, para a ordem histórica, a Quarta Jornada do *Diálogo* apresenta a teoria de marés de Galileu, que ele pensava ser uma prova conclusiva do movimento da Terra.<sup>7</sup> Para a ordem social, sabe-se que a atividade

---

<sup>6</sup> Lembrando que os alunos que participaram das aulas são todos moradores da cidade do Rio de Janeiro, RJ, e que, de acordo com eles mesmos, frequentemente gostam de ir às praias da cidade. Em um julgamento com base na experiência do autor dessa dissertação, o assunto marés é bem mais próximo da realidade desses alunos quando se compara com outros assuntos presentes em livros didáticos e apostilas: velocidade orbital de satélites, velocidade de escape, aceleração em referenciais acelerados, etc., os quais ganham maiores destaques nos livros e nas próprias salas de aula. Essa é uma percepção subjetiva do autor de acordo com sua experiência em sala de aula. Evidentemente, a crítica aqui feita é quanto à relevância que os assuntos mencionados ganham em detrimento do assunto marés, no contexto de alunos moradores de regiões costeiras.

<sup>7</sup> Galileu conclui que as águas oceânicas, por apresentarem velocidade variável em decorrência da superposição dos movimentos de translação anual em torno do Sol e rotação diurna, sofreriam uma agitação como o chacoalhar de uma bacia com água, fazendo com que periodicamente (período de 24 h) houvesse uma maré alta e uma maré baixa em cada ponto da Terra. Galileu, assim, considerou que a existência de marés era prova indubitável dos movimentos da Terra, pois se esta estivesse em repouso, marés não existiriam. No entanto, a teoria das marés de Galileu é empiricamente falsa dado que se observam duas marés altas e duas marés baixas por dia quando sua previsão era de apenas uma. [Fonte:

pesqueira e a navegação dependem constantemente do conhecimento das oscilações das águas oceânicas para efetuarem com êxito suas tarefas. As tábuas de marés<sup>8</sup> contribuem fortemente para isso e se relacionam, de certa forma, com o turismo, pois as pessoas, em rigor, precisam consultar as tábuas de marés a fim de garantir um bom passeio em determinados locais completamente afetados pelo fluxo e refluxo do mar. Além disso, as crenças míticas sobre a influência da Lua no comportamento humano constituem aspecto social importante de ser avaliado com os alunos para confrontar o conhecimento científico com o conhecimento popular. Por fim, para a ordem econômica, as marés são aproveitadas em usinas de maremotriz para geração de energia elétrica. A energia das marés no Brasil é gerada principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país, como no estuário do Rio Bacanga, em São Luís (MA), que tem marés de até 7 m e na ilha de Macapá (AP), com marés de até 11 m. Porém, essa fonte de energia ainda é pouco explorada no Brasil, pois o investimento para a construção das barragens é muito alto para um retorno baixo de potencial energético. Além disso, a matriz elétrica brasileira ainda é muito dependente das hidrelétricas e termelétricas, de modo que é preciso que mais pesquisas sejam feitas para explorar demais fontes de energia, inclusive a maremotriz (<https://blog.esferaenergia.com.br>).

O levantamento bibliográfico se baseia em referências internacionais e nacionais, buscando categorizar o objetivo de cada um dos trabalhos, sobretudo aqueles que se dedicam a analisar as principais concepções espontâneas dos estudantes acerca do assunto. Avaliando algumas referências nacionais, foi relativamente difícil encontrar apontamentos mais objetivos e diretos sobre as concepções espontâneas dos estudantes brasileiros a respeito do assunto. Nesse sentido, avaliou-se cada proposta dessas referências para tentar identificar as possíveis concepções espontâneas dos estudantes. No sítio da Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA), usando as palavras-chaves: marés, forças de marés, *tides*, *tidal forces*, *mareas* e *fuerza de marea*, só se encontra um trabalho (Callegari Jr. Ressonâncias e marés em sistemas de satélites naturais. *Revista Latino-Americana De Educação Em Astronomia*, (3), 39–57, 2006). Este, tem como objetivo a divulgação de alguns tópicos de Mecânica Celeste e

---

<https://cref.if.ufrgs.br>. Acesso em: 31/01/2023 (adaptado)]. O raciocínio galileano incorreto será mais bem apresentado no Capítulo 4.

<sup>8</sup> As tábuas de marés, simplificadaamente, são uma espécie de calendário que mostram os horários e os níveis da maré. São disponibilizadas, gratuita e periodicamente, pela Marinha Brasileira no seguinte domínio: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>.

Planetologia para um público de nível de graduação em disciplinas na área de exatas, em especial astronomia e física. Assim, optou-se por deixá-lo de fora da análise dessa dissertação. As concepções dos alunos e professores dos fenômenos planetários e fenômenos astronômicos em geral foram muito estudadas (Paula e Oliveira, 2002; Langhi, 2005; Langhi, 2011). Por outro lado, o presente trabalho concentrou-se arduamente em levantar todas as possíveis e específicas concepções espontâneas dos estudantes acerca do assunto forças de marés para facilitar a vida de qualquer professor que queira lecionar as marés já sabendo previamente as principais dificuldades dos estudantes. Isso se tornou uma grande motivação para construção da presente dissertação.

Também já havia sido feito um breve levantamento dos livros didáticos do PNLD para saber como o assunto é abordado<sup>9</sup>, constatando-se que a maioria dos livros consultados negligenciam o assunto no EM. Häertel (2000) já havia escrito sobre a negligência do tema no ensino na Alemanha. Encontra-se resultado semelhante com os livros didáticos brasileiros. Na seção **3.4.4** da presente dissertação, lista-se todos os livros didáticos do PNLD analisados. Isso se tornou uma outra grande motivação para a construção da presente dissertação a fim de dar continuidade a um trabalho que iniciei na graduação.

As marés são fenômenos planetários. Portanto, elas não podem ser explicadas sem levar em consideração outros corpos planetários, como o Sol e a Lua (Viiri, 2004). Para entender as marés, os alunos precisam entender as relações entre a Terra, a Lua e o Sol. As marés estão relacionadas, sobretudo, aos campos gravitacionais não uniformes do Sol e da Lua sobre a Terra. Entender as marés requer uma compreensão completa da gravidade e do sistema Lua-Sol-Terra em espaço tridimensional (Häertel, 2000). Porque entender as marés requer ter uma boa compreensão de outros conceitos astronômicos complexos (Taylor, Barker e Jones, 2003; Viiri, 2004), pode ser um dos tópicos mais difíceis de ciências para alunos e professores. As marés são fenômenos astronômicos em que causas e efeitos são mal compreendidos por muitas pessoas (Galili e Lehavi, 2003; Viiri, 2000a). Muitas pessoas até afirmam que a Lua causa as marés, mas elas não conseguem, muitas das vezes, explicar os mecanismos físicos por trás disso. A literatura de educação científica inclui poucos estudos que se concentram nas compreensões dos alunos e professores sobre as marés, conforme já relatado. No domínio da educação

---

<sup>9</sup> No meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), no capítulo 2, há um levantamento inicial dos livros do PNLD.

científica, Viiri (2000a, 2004) e Galili e Lehavi (2003) estavam entre os poucos pesquisadores que investigaram profundamente as compreensões dos alunos sobre as marés. Viiri (2000a) percebeu que os alunos têm dificuldades em entender as marés altas no lado da Terra que fica longe da Lua. Viiri descobriu que, em geral, as compreensões dos alunos sobre as marés eram muito pobres. Galili e Lehavi (2003) investigaram a importância da ausência de peso e das marés no ensino da gravitação. Eles descobriram que os livros didáticos raramente mencionam as marés e os que o fazem usam-nas para ilustrar a lei da gravitação. Nesse estudo dos autores, tanto os alunos quanto os professores não conseguiram explicar as marés. Livros didáticos e métodos instrucionais foram apontados como a principal razão para os equívocos relacionados ao ensino das marés (Viiri, 2004). Häertel (2000) apontou que há dificuldade em explicar as marés quando a explicação é restrita a mídia impressa. Com base nessa observação de Viiri (2004) e Häertel (2000), parece que materiais impressos podem não ser eficazes e novos *designs* instrucionais podem ser necessários para o ensino efetivo deste fenômeno astronômico complexo. Nesse sentido, espera-se que os materiais instrucionais apresentados nos apêndices **A** e **D**, sejam excelentes contribuições para a produção acadêmica.

### **3.2 Revisão Bibliográfica**

Nesse trabalho é apresentada uma revisão da literatura sobre a linha de pesquisa **Forças de marés no Ensino Médio** realizada com consulta a artigos em revistas, livros didáticos, dissertações, teses, projetos e navegações pela internet, que abordam esse assunto. A pesquisa concentrou-se em publicações direcionadas ao ensino de física e engloba os trabalhos publicados nessa linha desde 1974 até 2021. Os trabalhos encontrados foram classificados em três grupos: (a) propostas didáticas testadas em sala de aula, (b) concepções espontâneas dos estudantes, e (c) consultas bibliográficas do professor. É possível constatar que, apesar do notável número de publicações sobre o assunto marés que apresentam resultados de pesquisa, a maioria dos artigos ainda se refere à bibliografia de consulta para professores. Por outro lado, existe uma escassez de trabalhos sobre concepções alternativas de estudantes acerca de marés, bem como pesquisas que relatem propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem.

A primeira categoria se concentra na aplicação de estratégias didáticas inovadoras com o intuito de aprimorar a compreensão do tema em questão pelos estudantes. Essas estratégias abrangem alterações no enfoque, adoção de tecnologias de informação e comunicação, propostas didáticas inovadoras, dentre outras possibilidades. A segunda categoria engloba trabalhos que avaliaram o conhecimento de alunos do EM acerca do tema marés.<sup>10</sup> Nessa categoria, é contemplado o processo de identificação de concepções espontâneas, perfis conceituais, modelos mentais e modos de raciocínios relacionados ao tema em questão. Por fim, a terceira categoria trata de bibliografias de consulta direcionadas a professores de física, tanto de nível médio como de nível universitário, incluindo textos de apoio, recursos didáticos, propostas de unidades didáticas e divulgação científica.

Cabe salientar que essa categorização descrita não é a única possível e que alguns trabalhos se encontram citados em mais de uma categoria. Chama-se a atenção para o fato de que não é objetivo desse levantamento fazer qualquer análise crítica a respeito do material consultado. Embora essa possa ser uma limitação do presente trabalho, já que alguns artigos poderiam, em princípio, conter erros conceituais, acredita-se que essa opção não compromete a qualidade do trabalho que tem por objetivo apresentar um panorama geral dos estudos publicados no período de 1974 até 2021. Sendo assim, faz-se a ressalva de que as diferentes posições tomadas pelos autores consultados, com relação ao ensino de marés, não são necessariamente compartilhadas pelos autores do presente trabalho.

Por fim, dedica-se uma seção a parte para destacar alguns livros didáticos que abordam o assunto marés para facilitar a busca por parte de algum professor atuante no EM. Cabe reforçar que o assunto é negligenciado por esses livros.

---

<sup>10</sup> Alguns trabalhos consultados também levavam em conta as concepções de professores.

### 3.3 Metodologia da Revisão Bibliográfica

A realização desse trabalho foi feita com a seguinte metodologia de pesquisa: (i) levantamento do universo de trabalhos sobre o ensino de marés; (ii) definição dos conteúdos presentes nos artigos consultados; e (iii) classificação e categorização dos trabalhos (Pereira e Ostermann, 2009).

O universo de trabalhos é constituído do total de artigos publicados nas principais revistas de ensino de ciências do Brasil (A Física na Escola, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência & Educação, Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências, Investigações em Ensino de Ciências, Revista Brasileira de Ensino de Física e Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências) e do exterior (*Physics Teacher*, *American Journal of Physics*, *Enseñanza de la Ciencias*; *International Journal of Science Education*; *Physics Education*; *Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencias*, *Science Education* e *Science & Education*) no período de 1974 até 2021. O critério de seleção dessas revistas foi feito usando o banco de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), consultando seu catálogo com os termos de busca “marés”, “força de marés”, “ensino de marés”, “tides”, “tidal forces”, “teaching of tides”, “mareas”, “fuerza de mareas” e “enseñanza de las mareas.” e a lista de periódicos na página do instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (<https://www.if.ufrj.br/~pef/links/links.html>), utilizando-se das mesmas palavras-chave citadas. Foi excluído da pesquisa “marés atmosféricas”, “marés terrestres” e “marés em galáxias”. Além disso, ignorou-se qualquer artigo que se utiliza da palavra “maré” no seu sentido figurativo, isto é, maré como uma grande quantidade, multidão, estado de ânimo, disposição, etc. Fizemos também um levantamento na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) em busca de teses e dissertações sobre o tema.

Assim como Ostermann e Pereira (2009), essa pesquisa concentrou-se nas publicações direcionadas ao ensino de física, evitando “artigos gerais” que pudessem “distorcer” a amostragem. De acordo com esse critério, evitou-se artigos sobre descrições experimentais, cálculos teóricos, debates filosóficos e estudos sobre a história da física. Por exemplo, o trabalho de Nelson Callegari Jr. (2006) sobre ressonâncias e marés em sistemas de satélites naturais, foi excluído. O trabalho de Richard S. Gross (1993) sobre o efeito das marés oceânicas na rotação da Terra

conforme previsto pelos resultados por um modelo de maré oceânica também foi excluído por tratar de aspectos ainda mais complexos do fenômeno, em que, nitidamente, fica evidente que o público-alvo não são os educadores, mas sim pesquisadores. Compartilha-se da ideia dos autores mencionados logo acima, de que isto não significa afirmar que artigos dessa natureza não tenham implicações para a pesquisa em ensino de física – eles certamente têm. No entanto, classificar esses trabalhos como artigos de ensino implicaria um reducionismo difícil de justificar (Pereira e Ostermann, 2009, p.395).

Como relatado por esses autores, geralmente, a diferenciação entre “artigos de ensino” e “artigos gerais” nem sempre resulta em uma tarefa fácil. Essa dificuldade se intensificou, no presente trabalho, durante o levantamento de artigos na Revista Brasileira de Ensino de Física. Então, devido à subjetividade envolvida no processo de seleção e classificação de artigos, é possível que alguns trabalhos tenham passado inadvertidos. O processo como um todo teve início em junho de 2020 e resultou em uma amostra de 55 trabalhos.

Ao analisar o conteúdo presente nos artigos, definiu-se os temas a serem abordados (levantamento de concepções, avaliação de novas estratégias didáticas, uso de tecnologias da informação e comunicação, etc.). Desde o início, o objetivo foi enquadrar a diversidade de temas em categorias mais abrangentes, levando em consideração os objetivos dos trabalhos. Por fim, as categorias utilizadas na presente revisão foram elaboradas com base na classificação proposta por Ostermann e Moreira (2009), com a diferença na escolha do assunto.<sup>11</sup>

### **3.4 Descrição dos trabalhos**

A seguir são apresentadas as descrições dos trabalhos encontrados na literatura de ensino de física relativos ao tema marés, seguindo a metodologia referida anteriormente.

---

<sup>11</sup> Esses autores tratam do ensino de física moderna e contemporânea.

### 3.4.1 *Propostas Didáticas Testadas em Sala de Aula*

Os trabalhos classificados nessa categoria apresentam novas estratégias para o ensino de marés. Foi possível identificar, grosso modo, quatro linhas de pesquisa: 1) estratégia para abordar marés no ensino básico; 2) uso de tecnologias de informação e comunicação e 3) ensino investigativo com enfoque ciência, tecnologia e sociedade.

#### → *Estratégia para abordar marés no ensino básico*

- *Using Tide Data in Introductory Classes (2006)*

O objetivo de De Jong (2006) não é simplesmente apresentar aos estudantes uma explicação das marés, mas sim incentivá-los a descobrir relações entre hipóteses e evidências reais por conta própria. Para isso, ele sugere o uso do programa de planilha Excel e fornece instruções para a aquisição de dados. Além disso, ele prepara o professor para mediar possíveis discussões que podem surgir entre os alunos. De Jong utiliza sites que fornecem dados sobre a altura das marés ao longo do tempo para que seus alunos do curso de Introdução à Astronomia possam descobrir uma relação temporal próxima entre as marés e o movimento da Lua, e assim confrontar a hipótese de Galileu. Ele incentiva os alunos a fazerem perguntas e a trabalharem com os dados por conta própria, com o objetivo de desenvolver habilidades de pensamento crítico e descoberta.

- *O Fenômeno das Marés: Gravitação e Astronomia numa Proposta de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para o Ensino Médio (2016)*

Na sua dissertação de mestrado, Da Silva (2016) aborda a elaboração, aplicação e avaliação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre o fenômeno das marés para estudantes do EM. O objetivo do estudo foi relacionar as marés com a gravitação e a astronomia, utilizando cerca de 14 atividades para promover e verificar a aprendizagem significativa dos alunos. Participaram do estudo 20 estudantes da 1ª série do EM de uma escola da rede pública estadual. A metodologia de aplicação consistiu em diversas etapas, como o levantamento de concepções iniciais dos alunos sobre o fenômeno das marés, sua relação com a gravitação e alguns conceitos básicos de Astronomia, a vivência do fenômeno das marés por meio de vídeos, textos e

observações diretas na praia, abordando também as fases da Lua e a relação com a amplitude das marés. Foram apresentados aos alunos conceitos de gravitação universal e teoria das marés, explicando o fenômeno em termos das forças gravitacionais diferenciais e da variação de sua amplitude relacionada às posições da Lua em relação à Terra e ao Sol. Ao final, foram realizadas atividades de síntese, mediadas por um simulador, para entender como o fenômeno das marés ocorre em outros corpos do sistema solar. A aprendizagem dos alunos foi avaliada por meio de questionários, desenhos e entrevistas finais. Aparentemente, em sua dissertação, faltaram informações por escrito no final do Capítulo 3 e início do Capítulo 4, apesar do registro das atividades e questionários realizados pelos estudantes.

- Uma Proposta de Ensino sobre Marés Oceânicas Baseada no Ciclo de Experiência de George Kelly (2020)

No artigo de Neta e Voelzke (2020), o objetivo principal foi ensinar sobre as marés oceânicas, baseada nos princípios teóricos do Ciclo de Experiência de George Kelly, a fim de promover a aprendizagem significativa durante as aulas de física no EM. O estudo foi realizado com 112 alunos da 1ª série do EM de uma escola pública localizada em Sirinhaém - PE. Para a metodologia do estudo, foram desenvolvidas sequências didáticas que guiaram as atividades propostas, a coleta de dados do pré-teste e pós-teste e a aprendizagem significativa. As atividades práticas foram divididas em cinco encontros, sendo: (1) um pré-teste com cinco perguntas abertas, (2) uma problematização utilizando vídeos que demonstraram o movimento de rotação e translação da Terra e da Lua, acompanhada de uma atividade escrita, (3) outra problematização que abordou os movimentos e fases da Lua, também acompanhada de uma atividade escrita, (4) uma problematização sobre o fenômeno das marés e, por fim, (5) um pós-teste com as mesmas cinco perguntas abertas do pré-teste. Os resultados mostraram que os conhecimentos prévios dos alunos eram elevados, a compreensão do tema tornou-se mais científica e a aprendizagem significativa foi possivelmente alcançada. Portanto, a metodologia proposta é viável, mas precisa ser adaptada para cada sala de aula, já que cada uma apresenta um contexto único.

→ *Uso de tecnologias de informação e comunicação*

- The Tides – A Negletec Topic (2000)

Härtel (2000), propõe o uso de simuladores para melhor compreensão do fenômeno dinâmico das marés. O autor apresenta a ferramenta de simulação xyZET, desenvolvida no IPN, que foi utilizada para simular o movimento de objetos estendidos dentro de campos gravitacionais. Dentro do xyZET, objetos estendidos são modelados por massas pontuais, conectadas por molas elásticas.<sup>12</sup> Com base no seu método, foi desenvolvido um curso completo de mecânica clássica<sup>13</sup>, tratando a maioria dos tópicos normalmente ensinados na 11ª série em um ginásio alemão. Um objeto bidimensional (corpo extenso) imerso em um campo gravitacional não uniforme pode ser movido em torno do ponto marcado por uma cruz e pode girar em torno de seu centro. A velocidade dos pontos e as forças centrípetas, podem ser visualizadas como vetores. A proposta do autor é apelar para a visualização dinâmica do fenômeno das marés em benefício de uma curva de aprendizado maior em função da complexidade do tema.

- Explorers Presentation - Explaining the Tides to children (2015)

No site da Explorers Education Programme há uma apresentação em *Power Point* (PPT) de uma proposta de aula sobre o ensino de marés para o Ensino Fundamental (EF). As aulas consistem em apresentar as órbitas da Terra, Lua e Sol, abordar as fases da Lua e seu ciclo, explicar a gravidade e sua relação com as marés, os tipos de marés, como as marés influenciam a vida em comunidade, apresentar as tábuas de marés e algumas informações adicionais. A proposta se dá através de uma aula expositiva-dialógica, em que o professor estimula seus alunos por meio de perguntas e, simultaneamente, dialogando com seus alunos, aproveitando-se das dúvidas para guiar a discussão. Os *slides* da apresentação estão disponíveis no site referenciado. Por se tratar de crianças do EF, não há, obviamente, menção às forças diferenciais. Não há nenhum questionário e avaliação.

---

<sup>12</sup> Tentamos acessar o simulador pelo *link* fornecido em seu artigo, durante os anos de 2019-2023, mas não foi possível encontrá-lo.

<sup>13</sup> Não foi possível ter acesso pela internet ao seu curso. Apenas encontramos algumas versões para compra em CD multimídia e livros.

- Um Marégrafo Ultrassônico Baseado na Placa Arduino para Investigação do Fenômeno das Marés (2020)

Soares e de Amorim (2020), apresentaram um projeto de construção de um marégrafo baseado em um telêmetro ultrassônico controlado por uma placada Arduino Uno. O projeto é de fácil construção e de baixo custo e tem por objetivo viabilizar o estudo do fenômeno das marés oceânicas integrando atividades investigativas com a prática experimental. Em sua dissertação de mestrado, Soares (2019) apresenta um texto com mais detalhes desta montagem, acompanhado de um conjunto de fotos e vídeos que retratam a montagem e o local de instalação. Neste trabalho, os autores centralizaram seus esforços na montagem experimental, apresentando alguns resultados preliminares. Reservaram para um próximo artigo sugestões de aplicações em eventos investigativos bem definidos envolvendo o modelo newtoniano para o fenômeno das marés. Esse artigo foi baseado na dissertação “As marés atmosféricas: uma abordagem para o ensino médio a partir de uma atividade experimental investigativa”, Soares (2015).

→ *Ensino investigativo com enfoque ciência, tecnologia e sociedade*

- Discutindo a física das marés como proposta para a crise de energia elétrica (2016)

A dissertação de mestrado de Ferreira (2016) é composta de duas atividades. A primeira aborda as crises na produção de energia elétrica que ocorreram em 2001 e 2013, acarretando os apagões em 2001, e no uso das usinas termoeletricas para auxiliar na produção de energia em 2013. Tal atividade propõe uma discussão sobre fontes de energia renováveis e sua utilização no país, dando destaque a usina maremotriz, apresentando o funcionamento deste meio de produção de energia elétrica e suas características. A segunda atividade é uma investigação – utilizando mangá (quadrinho japonês) e vídeo – que tem por objetivo explicar como a força gravitacional entre Lua e a Terra gera as marés sobre a superfície, mostrando a relação Sol-Lua-maré que influenciam na amplitude das marés altas e baixas durante um mês. Este material se integra às atividades produzidas pelo grupo de pesquisa em ensino de física (PROENFIS) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

- Estudando o Fenômeno das Marés na Praia de Ajuruteua-Pará: Uma Proposta de Ensino a partir da Aprendizagem Centrada em Eventos (2017)

Rodrigues et al. (2017), apresentaram no XI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – XI ENPEC, resultados obtidos de um minicurso em que o assunto norteador era “O fenômeno das marés na praia de Ajuruteua/Pará”. Esta proposta fundamentou-se no enfoque Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) e nos pressupostos da Aprendizagem Centrada em Eventos (ACE). Durante o minicurso foi proposta a produção, por parte dos participantes, de 6 planos de ensino baseados na ACE. O trabalho só apresenta 2 dos 6. As equipes organizaram suas apresentações através de uma lista de acontecimentos relacionadas à destruição da linha costeira da praia de Ajuruteua. Uma das equipes abordaram assuntos como impactos ambientais, erosão da praia e o turismo afetado. O público-alvo dessa equipe eram alunos do 5º ano do EF, como um enfoque nos impactos ambientais causados pela ação antrópica. Já a outra equipe planejou uma atividade para a 2ª série do EM, elaborando uma explicação dos fenômenos das marés através de uma concepção dos conceitos físicos, abordando as fases da Lua e atração gravitacional entre a Terra e este satélite natural. O minicurso contou com a participação de 32 estudantes de licenciatura em física, química, ciências naturais e licenciatura integrada em ciências, matemática e linguagens. O minicurso teve duração de 4 h e foi dividido em 3 etapas. Diante do contexto apresentado, o objetivo da atividade consistiu em analisar de que forma os estudantes de licenciatura, no papel de futuros professores, abordariam um plano de ensino baseados nos pressupostos da ACE.

- Significados Produzidos por Estudantes do Ensino Médio sobre o Fenômeno das Marés em Aulas Investigativas (2020)

Baptista et al. (2020), durante a primeira fase do desenvolvimento da pesquisa, elaboraram dois questionários prévios: um dirigido aos professores atuantes no EM e outro aos estudantes do EM. O objetivo da utilização deste instrumento de pesquisa foi identificar os interesses, as dificuldades, as concepções e as expectativas, tanto dos professores quanto dos alunos, referentes ao conteúdo de gravitação e às possíveis abordagens didático-pedagógicas que pudessem ser adotadas para tratar esta temática em sala de aula. O questionário prévio direcionado aos estudantes tinha o objetivo de identificar o que eles pensam sobre o estudo da física e do conteúdo de gravitação e qual

a importância destes para a sua formação como cidadão. Procurou-se também investigar os conhecimentos prévios que possuíam sobre o conteúdo de gravitação, e de que forma gostariam que fosse feita a abordagem de tal conteúdo. Após a aplicação e análise dos questionários diagnósticos, realizou-se uma busca de materiais com o objetivo de selecionar estratégias de ensino que pudessem contribuir para a elaboração de uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI). Em paralelo ao desenvolvimento, validação, aplicação e análise dos questionários, os autores se dedicaram ao estudo de bibliografias que propõem práticas diferenciadas de ensino acerca do conteúdo de Gravitação (textos históricos, textos de divulgação científica, simulações computacionais, vídeos e atividades experimentais). A SEI que propuseram é composta por 10 aulas com duração de 45 min cada. Toda a investigação ocorre em torno de uma Situação-Problema Central (SPC) que tem o objetivo de averiguar se a Lua influencia em nossas vidas e em caso afirmativo de que maneira o faz. A investigação é feita em partes, elaboradas em quatro Situações-Problema de Apoio (SPA) para auxiliar na discussão dos conceitos considerados fundamentais. O trabalho se dedica a analisar os resultados obtidos a partir da implementação da SPA3 que é sobre o Fenômeno das Marés.

### *3.4.2 Levantamento de Concepções Alternativas dos Estudantes*

Os trabalhos classificados nessa categoria apresentam resultados da avaliação de professores e alunos acerca do tema específico marés. Essas avaliações buscam levantar dificuldades, atitudes, concepções prévias, modelos mentais, modos de raciocínio, perfis conceituais, interpretações, entre outros.

Os estudos de Viiri (1999, 2000 e 2004), listados como os três primeiros trabalhos, foram fundamentais para a realização desta dissertação. Eles foram cuidadosamente avaliados e analisados, pois estavam alinhados com os objetivos desta pesquisa.

- Tides in Textbooks, Expert Teachers' Ideas and Students' Understanding (1999)

Viiri (1999) constrói uma unidade de ensino baseada em pesquisa para marés. O estudo aplica a MRE, que contém análise da estrutura do conteúdo, investigações empíricas e construção da instrução. Neste artigo, relata-se os resultados das duas primeiras fases. A análise da estrutura de conteúdo das marés revelou dois fenômenos

principais. Primeiro, existem duas protuberâncias de maré ao mesmo tempo em lados opostos da Terra, o que pode ser explicado pelo gradiente da gravitação da Lua. Segundo, a maré alta ocorre a cada 12 h, aproximadamente, o que pode ser explicado pela rotação da Terra e pelas duas protuberâncias de maré. Os estudos empíricos incluíram análise de livros didáticos, pesquisas sobre a compreensão dos alunos e ideias de professores especialistas sobre o ensino. Os sujeitos que participaram do estudo foram: alunos do EM (idade 15 anos, N = 28), alunos do curso de formação de professores do EF (primeiro ano de estudo, N = 61) e alunos do curso de formação de professores de disciplinas específicas (física, matemática, química, geografia, biologia; terceiro ano de estudo, N = 41).<sup>14</sup> Os dados foram coletados por meio de questionários, ensaios abertos e entrevistas, que foi verificado por outros professores e pré-testado com alguns alunos. Os livros didáticos não explicavam os fatos básicos e as relações causais. Por fim, o autor também relata que a compreensão dos professores sobre as marés era mínima, e que não foi surpreendente descobrir que a compreensão dos alunos sobre o tópico era ruim e que eles não haviam mudado seus preconceitos. O *design*, a metodologia e as perguntas de pesquisa do autor são mostradas na tabela 1.

Research	Object/subject	Method	Main question
Content analysis	Articles and books, history of science	Concept analysis for learning	Main phenomena and explanations
Textbook analysis	Geography and physics textbooks, all school levels	Checking the ideas found in the content analysis	Text in relation to content analysis and students' ideas
Students' ideas	Secondary school pupils, teacher trainees	Open questionnaire	Typical categories of students' ideas
Teachers' ideas	in-service, geography teachers	Interviews, open essays	Teachers' self-reflection on teaching

**Tabela 1.** *Design*, metodologia e perguntas de pesquisa (Viiri, 1999, p.2).

Viiri (1999) analisou livros didáticos e descobriu que os antigos eram melhores que os modernos e que os livros de geografia tinham informações mais superficiais sobre marés. Apenas os livros de física explicavam o fenômeno da maré em termos da gravidade da Lua. Quando os alunos foram analisados, suas respostas foram categorizadas qualitativamente, principalmente com base em seus desenhos e depois em

<sup>14</sup> Tradução nossa: *Secondary school pupils*: ensino secundário inferior; *Primary school teacher trainees*: estagiários de professores do ensino primário e *Subject teacher trainees*: estagiários de professores da disciplina. Seria algo como: 28 alunos do EM, 61 alunos em formação de professores do EF e 41 alunos em formação de professores do EM.

suas explicações escritas.<sup>15</sup> Os livros didáticos não levaram em conta as concepções dos alunos sobre as marés. Os alunos tiveram baixo nível de compreensão. Os professores não entendiam o fenômeno e ensinavam de forma superficial.

- Students' Understanding of Tides (2000)

Viiri (2000) se dedica a conhecer as concepções alternativas dos alunos para melhor desenvolver o ensino e a aprendizagem do assunto marés. Como as ideias dos alunos sobre as marés não foram investigadas anteriormente, ele examina as categorias típicas nas quais as ideias dos alunos se enquadram e as diferenças potenciais entre vários grupos de alunos. A amostra foi composta por 130 estudantes residentes na Finlândia. As informações sobre a compreensão dos alunos foram coletadas por meio de um questionário. O questionário continha questões de múltipla escolha abertas e estruturadas. As questões do teste foram baseadas em estudos preliminares, discussões prévias com colegas e alunos, e na análise da estrutura do conteúdo e história das marés. Para aumentar a validade do questionário, ele foi verificado por outros professores e pré-testado com um grupo de alunos que não participou do teste. Quando os desenhos e explicações dos alunos foram analisados, nenhum conjunto predeterminado de categorias foi usado. Em vez disso, as categorias qualitativamente diferentes foram derivadas das respostas dos alunos. As categorias descobertas basearam-se primeiro nos desenhos dos alunos e depois nas suas explicações escritas. A razão para esta estratégia foi que as respostas dos alunos mostraram tanto implícita quanto explicitamente que se eles achavam que não entendiam a noção de marés, eles se recusavam a desenhar qualquer coisa. A compreensão das marés pelos alunos é descrita por meio de categorias hierárquicas. Essas categorias apresentam as formas qualitativamente diferentes de descrever e compreender as marés. Uma vez que as categorias foram fixadas, cada resposta foi atribuída à sua categoria apropriada. Para melhorar a confiabilidade da categorização, um pesquisador de pares verificou a distribuição com uma amostra de artigos. A sobreposição na categorização foi muito alta, pois 82% dos alunos foram colocados nas mesmas categorias por ambos os pesquisadores. Isso mostra que a descrição das categorias foi adequada. As principais categorias estabelecidas foram a

---

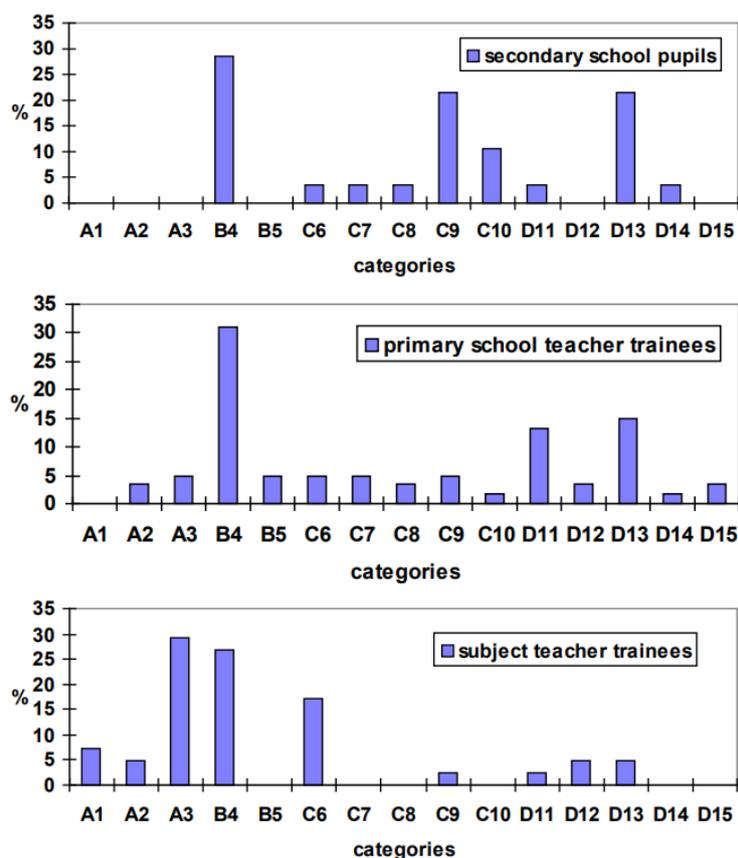
<sup>15</sup> Por mais que o autor já apresente as categorias nesse primeiro artigo, reservamos sua apresentação para o próximo artigo (Viiri, 2000) que o apresenta em forma de gráfico com os percentuais de alunos em cada subcategoria.

(A) categoria de duas protuberâncias, (B) a categoria de uma protuberância, (C) marés na costa e (D) a categoria em que os alunos não fizeram nenhum desenho para representar as marés. As categorias principais foram divididas em subcategorias com base nas explicações escritas dos alunos sobre as marés, apresentadas na tabela 2, no que segue:

A. Two tidal bulges	A1. Two tidal bulges and the gradient of the Moon's attraction A2. Two tidal bulges and two forces A3. Two tidal bulges and the Moon's attraction
B. One tidal bulge	B4. One tidal bulge and the Moon's attraction B5. One tidal bulge and the movements of the Moon and the Sun
C. Tides at the seashore	C6. Tides at the seashore and the Moon's gravitation C7. Tides at the seashore and the Earth's rotation C8. Tides at the seashore and the movements of the Earth, the Moon or the Sun C9. Tides at the seashore and wind, rain, etc. C10. Tides at the seashore with no explanation
D. No pictures	D11. The Moon's gravitation D12. The Earth's rotation D13. Movements of the Earth, the Moon or the Sun D14. Wind, rain, etc. D15. No explanation

**Tabela 2:** Categorias sobre as concepções dos estudantes (Viiri, 2000a, p.107).

Viiri descobriu que, em geral, a compreensão dos alunos era muito pobre; nenhum dos alunos do EM mencionou as duas saliências, todos os grupos favoreceram a atração da Lua e 25% dos alunos do EM mencionaram fatores como vento, chuva e pressão atmosférica como as causas das marés. A distribuição dos estudantes em cada categoria pode ser vista na figura 3 a seguir:



**Figura 3:** Distribuição dos estudantes em cada categoria (Viiri, 2000a, p.109).

- Research-based Teaching Unit on the Tides (2004)

Viiri (2004) desenvolve uma nova unidade de aprendizagem baseada em pesquisa para marés a ser usada nas escolas secundárias. A unidade de aprendizagem foi baseada na teoria científica das marés, livros didáticos e uma análise das concepções dos alunos. Estão incluídas descrições do conteúdo e das atividades de ensino-aprendizagem da unidade. A fala do professor foi analisada para descobrir possíveis informações sobre as razões subjacentes aos efeitos de aprendizagem observados. Um pré-teste revelou que os alunos dos grupos de pesquisa tinham o mesmo tipo de equívocos que o autor encontrou anteriormente em outros grupos de alunos. Um mês após o período de ensino, o teste mostrou que os alunos aprenderam sobre marés com um grau considerável de proficiência. O raciocínio apresentado pelos alunos durante a recepção da unidade de ensino também revelou os eventuais resultados de aprendizagem. Também é apresentada a discussão das implicações do projeto para o planejamento e implementação de sessões de ensino baseado em pesquisa.

- Using inquiry-based instruction with web-based data archives to facilitate conceptual change about tides among preservice teachers (2007)

Ucar (2007), objetivou nesse estudo de método misto sequencial em duas fases (Creswell, 2003) descrever e compreender as concepções de maré de professores em formação e explorar uma estratégia instrucional projetada para promover a aprendizagem de conceitos científicos. Foram coletados dados qualitativos de uma subamostra desses professores em formação para descrever suas compreensões e possíveis concepções alternativas sobre marés. Dados quantitativos foram coletados da subamostra e de uma amostra maior de professores em formação para explorar seu conhecimento sobre marés. Os dados qualitativos e quantitativos foram usados para descrever e medir o impacto potencial de uma instrução baseada em pesquisa e tecnologia na mudança conceitual. As compreensões conceituais de marés de professores em formação foram exploradas usando métodos de coleta de dados qualitativos. Dados qualitativos foram coletados de uma subamostra de professores em formação por meio de entrevistas, que incluíram perguntas estruturadas, desenhos e o uso de modelos tridimensionais. Os modelos foram feitos a partir de três pequenas bolas de isopor representando a Terra, o Sol e a Lua. Além dos dados qualitativos, um teste de realização (instrumento quantitativo) foi administrado para medir as mudanças no conhecimento de marés deste subconjunto de professores em formação antes e depois da instrução. O formato dos itens do teste incluiu perguntas de múltipla escolha e desenhos dos participantes.

- Understanding the Alternative Conceptions of Pre-Service Secondary Science Teachers about Tidal Phenomena based on Toulmin's Argumentation (2013)

Oh (2013), explora os elementos e as origens das concepções alternativas dos professores de ciências atuantes no EM sobre os fenômenos das marés com base nos elementos usados no Modelo Argumentativo de Toulmin por meio de pesquisa qualitativa. O autor acredita que estratégias devem ser desenvolvidas para ajudar os alunos a compreender o centro de massa do sistema Terra-Lua.

- Ideas de estudantes de instituto y universidad acerca del significado y el origen de las mareas (2017)

Corrochano et al. (2017), buscou investigar como estudantes em diferentes níveis de ensino percebiam e compreendiam o fenômeno das marés. Foram entrevistadas 321 pessoas, incluindo 129 estudantes do EM, 19 de Ensino Técnico e 173 universitários de diferentes áreas, como Educação, Geologia e Biologia. Os participantes responderam a um questionário que indagava sobre o que eram as marés e quais suas causas, além de serem convidados a fazer um desenho que explicasse o fenômeno. Os autores destacaram que, na região espanhola onde a pesquisa foi realizada, as crianças começam a estudar as marés por volta dos 10 ou 11 anos, durante o sexto ano do EF. Durante o EM, os estudos sobre o tema também devem estar presentes de forma mais sistematizada. O objetivo da pesquisa era verificar como essas informações eram assimiladas pelos alunos e se estavam bem estruturadas em seus conhecimentos. Mesmo sendo uma região distante do litoral, cerca de dois terços dos alunos relacionaram as marés com a atração gravitacional da Lua sobre a Terra. Entretanto, apenas 24 alunos (7,5% do total) desenharam o modelo científico mais próximo da realidade, com dois bojos de marés em lados opostos alinhados com o astro que provoca o fenômeno. Além da Lua, outros fatores mencionados pelos participantes para explicar as marés incluíram a força das placas tectônicas, mudanças de temperatura, rotação da Terra, fenômenos climáticos e magnetismo terrestre. Os autores destacam que a maioria dos estudantes não possui um entendimento sistemático do conceito de marés de acordo com a teoria científica, e que a compreensão do fenômeno é um desafio para o ensino de ciências. Vale ressaltar que a maioria dos estudantes que desenharam o modelo mais próximo da realidade eram universitários da área de Ciências Experimentais, indicando a importância da formação em Física e Astronomia para um melhor entendimento do fenômeno das marés.

- Concepções Apresentadas por Estudantes do Ensino Médio da Baía de Camamu e de São Miguel das Matas com Relação ao Fenômeno das Marés (2018)

De Jesus (2018), aproveita a perspectiva do surgimento de várias explicações sobre marés ao longo do tempo em vários locais, tendo como base as concepções apresentadas por dois grupos de estudantes que estudam em regiões diferentes, sendo que um grupo reside na Baía de Camamu e vivenciam este fenômeno quase que

diariamente e o segundo grupo está em uma região afastada do litoral chamada de Vale do Jiquiriça no município de São Miguel das Matas. Todos os estudantes responderam um questionário com questões pessoais e sobre informática, gravitação e fenômeno das marés. As questões foram analisadas e discutidas. Posteriormente, foram feitas intervenções utilizando-se um *site*, desenvolvido ao longo da pesquisa intitulado “Universo na escola” (produto educacional), com atividades relacionadas aos temas presentes no questionário inicial, possibilitando que os estudantes interagissem com o objeto de estudo. De acordo com o autor, o quadro esperado pelos dois grupos de estudantes não foi atingido de forma satisfatória. Após a análise dos dados, os estudantes em sua maioria não apresentaram respostas aceitáveis com relação à gravitação e o fenômeno das marés, podendo ser comprovado nos gráficos apresentados no corpo do trabalho. O autor esperava que os estudantes apresentassem um conhecimento sobre gravitação, desta forma podendo responder questões relacionadas ao fenômeno das marés, pois são conteúdos sugeridos pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) no 4º ciclo do EF. Os dois grupos de estudantes apresentaram tais concepções, dando destaque para os estudantes de Camamu. Quando questionados onde adquiriram conhecimentos sobre astronomia, 20% responderam no convívio familiar, o que está de acordo com Langhi (2004) em que essas concepções podem estar relacionadas com sua vivência, pois esses estudantes vivenciam o fenômeno no seu dia a dia. Já com os estudantes de São Miguel apenas 1,0% responderam essa alternativa e eles não presenciam tal fenômeno. Os resultados obtidos mostram que a vivência dos indivíduos envolvidos diariamente com o tema da pesquisa influenciou no resultado obtido. Em geral, os dois grupos de estudantes não apresentaram em termos percentuais um conhecimento relevante com relação à lei da gravitação e o fenômeno das marés. Em algumas questões apareceram diferenças consideráveis entre os grupos e destaques individuais dentro de cada grupo. O autor levanta alguns fatores que podem ter influenciado essas distorções, destacando o ensino tardio de temas relacionados à astronomia, ou, até mesmo a não inserção da astronomia no currículo dos estudantes e a não disponibilidade de recursos para os professores e estudantes.

- Um Material para Professores de Física sobre o Ensino de Marés na Educação Básica (2020)

Dantas (2020) em sua dissertação, apresenta um material com as principais ideias e teorias que foram propostas na história da ciência para explicar as marés e os desafios que o fenômeno ofereceu para sua compreensão, com uma explanação mais detalhada sobre a Teoria do Equilíbrio. Apresentou ainda, no material, resultados de uma pesquisa que realizou em duas escolas do Rio Grande do Norte, sobre as concepções prévias de 115 alunos da 1ª série do EM, acerca das marés. O objetivo dessa pesquisa foi entender como os estudantes interpretam as marés e o que pensam que as origina, bem como as eventuais relações que estabelecem entre esse fenômeno, aspectos do seu dia a dia e de seu entorno. No que diz respeito à literatura nacional em Ensino de Ciências, realizou-se uma busca em diversas revistas e anais de eventos em Educação em Astronomia, Ensino de Física e de Ciências [aqui do Brasil](#), a fim de encontrarem relatos de experiências ou de investigações sobre o ensino (e a aprendizagem) desse tema. A busca foi realizada nas atas de todos os SNEA's (Simpósio Nacional de Educação em Astronomia) desde o primeiro evento, em 2011; de todos os EPEF's (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física) desde o primeiro, em 1994; e de todos os ENPEC's (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências) desde o primeiro, em 1997, até o momento de seu levantamento, em dezembro de 2018. Pesquisaram ainda em todas as edições da Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) e nos artigos dos últimos vinte anos do Caderno Brasileiro de Ensino de Física, considerando o momento de seu levantamento. Fizeram também um levantamento na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) em busca de teses ou dissertações sobre o tema. Em todas as pesquisas, buscaram publicações que contemplassem em seus títulos as palavras-chaves: “ensino de marés”, “gravitação e marés”. O autor encontrou 21 artigos, os quais de algum modo a temática das marés era contemplada. Entre os artigos, alguns temas foram: aspectos gerais sobre a teoria newtoniana de marés, como aborda o artigo de Silveira (2003), e propostas para o ensino, como o trabalho de Bisch (2016). Encontramos também artigos que se preocuparam em pesquisar o que os alunos entendem sobre esse fenômeno, levantando concepções de alunos do Ensino Fundamental (Silva et al., 2012), e de estudantes do Ensino Médio (Batista et al., 2020). No caso da busca em teses e dissertações na BDTD, foram encontradas 5 dissertações: as de Silva (2016); Santos Neta (2017); Rezende

(2017); de Jesus (2018) e Soares (2019). Essas dissertações estão relacionadas ao Ensino de Física ou Astronomia e todas apresentam aplicações de unidades didáticas em turmas do Ensino Médio. Para finalizar, ofereceu algumas sugestões didáticas para auxiliar na montagem de um plano de ensino que o professor venha a produzir sobre marés. Nessas sugestões, estão algumas propostas de práticas sobre as quais tiveram conhecimento por meio de suas vivências e de sua pesquisa bibliográfica, bem como alguns *softwares* para ilustrar a Teoria do Equilíbrio e uma lista de vídeos acelerados de algumas regiões costeiras do Brasil e de outros países, objetivando explicitar as variadas formas com que a intensidade das marés pode se manifestar em diferentes locais.

- A Concepção sobre Marés dos Estudantes do Litoral Norte Paulista: Investigando as Relações Existentes com o Desenvolvimento Histórico do Conceito (2020)

Lino (2020) tem como objetivo investigar as concepções que os estudantes do ensino básico e superior do litoral norte paulista apresentam a respeito do efeito das marés assim como traçar e comparar essas concepções espontâneas com as explicações que surgiram ao longo da história. Trata-se de um trabalho em construção e, de acordo com o autor, por meio dessa comparação, ele poderá inferir se algumas dessas concepções são obstáculos de natureza epistemológica. Para isso realizou-se uma pesquisa bibliográfica em livros e artigos sobre o tema história da ciência traçando uma cronologia a respeito do desenvolvimento da explicação do efeito de maré. O autor diz que posteriormente serão aplicados questionários aos estudantes alvo para coleta de dados sobre o conhecimento dos estudantes e verificar a existência de obstáculos epistemológicos sobre o tema. Assim, com base nos resultados será avaliada a produção de material didático a respeito do tema para ser trabalhado em sala de aula.

Uma revisão da pesquisa sobre concepções alternativas indica que tanto os estudantes quanto os professores possuem-nas sobre uma variedade de tópicos científicos, e pode ser difícil mudar essas concepções (Wandersee et al., 1994). Diferentes modelos de mudança conceitual fornecem explicações para as causas das concepções alternativas (Chi et al., 1994; diSessa, 1993; Vosniadou e Brewer, 1992) e esses modelos oferecem sugestões sobre como mudar as concepções alternativas e promover a compreensão científica nas salas de aula de ciências. Por exemplo,

Vosniadou (1991) sugere que as concepções alternativas ocorrem como resultado de conflitos entre as crenças iniciais, que os alunos adquirem por meio de experiências cotidianas com o mundo físico, e a explicação científica, que os alunos são expostos na escola. Vosniadou sugere que as crenças ingênuas, ou o que ela chama de crenças arraigadas, limitam o modelo científico e estão na raiz das concepções alternativas dos alunos. Quase todas as crianças e adultos têm experiências com diferentes tipos de fenômenos astronômicos, como dia e noite, fases da Lua, estações e marés. As crianças geralmente trazem suas próprias ideias sobre eventos astronômicos facilmente observáveis para a sala de aula de ciências, e muitas pessoas mantêm essas ideias iniciais até a vida adulta (Driver, 1989). As compreensões conceituais dos alunos sobre os fenômenos astronômicos foram amplamente estudadas por meio da pesquisa em educação científica, e muitos artigos focando na compreensão das pessoas sobre diferentes eventos astronômicos foram publicados. Esses artigos se concentraram principalmente em: a forma da Terra e a gravidade da Terra (Baxter, 1989; Mali e Howe, 1979; Nussbaum, 1979; Sneider e Pulos, 1983), as causas do dia e da noite (Atwood e Atwood, 1995; Vosniadou e Brewer, 1994), as causas das estações (Atwood e Atwood, 1996) e as causas das fases da Lua (Trundle et al., 2002). Entre os tópicos de astronomia, as marés são uma área que os pesquisadores não investigaram completamente. Isso é surpreendente porque as marés estão especificamente relacionadas às fases da Lua e às forças gravitacionais, e parcialmente relacionadas a outros conceitos astronômicos.

### 3.4.3 Bibliografias de Consulta para Professores

Nos trabalhos classificados nessa categoria, foi possível identificar quatro diferentes tipos de produção acadêmica: 1) textos didáticos; 2) novos recursos didáticos; 3) novas propostas e estratégias didáticas; 4) divulgação científica.

#### → Textos didáticos

- Note on Tides (1974)

Tsantes (1974), preocupa-se em descrever dois parâmetros de que a força de maré depende: a dimensão do objeto e a variação (gradiente) da força gravitacional. Adicionalmente, usando cálculo integral e diferencial evidencia os dois bojos de marés na Terra, um do lado voltado para a Lua e o outro do lado oposto ao da Lua. Assume o modelo simplificado da Terra, inicialmente esférica, rígida e sem rotação. Essa é a teoria do "equilíbrio" das marés na qual a rotação diária da Terra não desempenha nenhum papel (exceto na localização da protuberância das marés).<sup>16</sup> Por fim, o autor faz algumas considerações da teoria dinâmica das marés, desenvolvida por Laplace, em que a profundidade do oceano, limites geográficos, a força de arrasto e efeitos decorrentes da rotação da Terra são alguns dos fatores a serem levados em consideração.

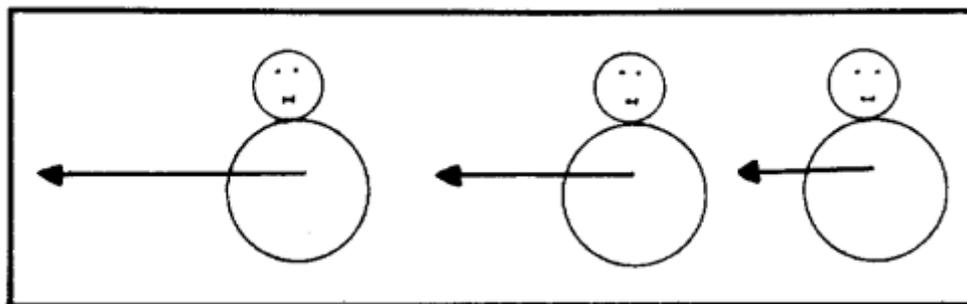
- Explaining Tides (1977)

Loxson (1977), afirma que os estudantes não apresentam grandes dificuldades em entender a formação de um bojo de maré na porção da Terra próxima à Lua. No entanto, apresentam uma dificuldade maior em entender a formação do bojo de maré na porção da Terra distante da Lua. Por essa razão, o autor oferece uma analogia para melhor compreensão desse fenômeno. Ele pede ao leitor para que imagine três astronautas, alinhados numa mesma reta, mas em posições distintas, sendo puxados pela ação gravitacional lunar. O astronauta mais perto da Lua será acelerado com maior intensidade que o astronauta do meio e, este, será acelerado com maior intensidade que o astronauta mais longe da Lua. Finaliza a analogia chamando a atenção para o fato de que, do ponto de vista do astronauta do meio, é similar à de um observador na Terra.

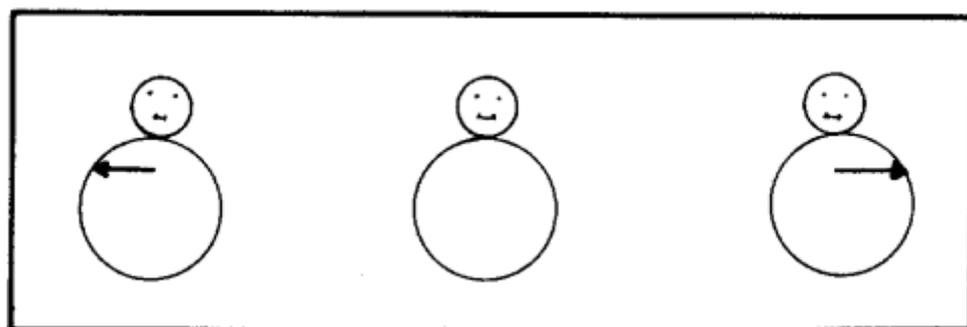
---

<sup>16</sup> Teoria apresentada por Newton, em seu *Principia*.

Ele vê o oceano do lado próximo cair em direção à Lua e o oceano do outro lado se afastando na direção oposta. Essas imagens podem ser vistas nas figuras 4 e 5 a seguir:



**Figura 4:** Três astronautas caindo em direção à lua. O astronauta à esquerda está mais próximo da lua (Loxsom, 1977, p.304).



**Figura 5:** A mesma situação vista pelo astronauta do meio. (Loxsom, 1977, p.304).

- On the Generation of Tides (1985)

Kapoulitsas (1985) descreve o efeito da geração das marés como consequência da ação da Lua e do Sol. Inicialmente, é apresentado um esboço das teorias existentes e, em seguida, o fenômeno é examinado com base em um modelo estático, assumindo que em cada instante a água dos oceanos está em equilíbrio sob as forças atrativas da Terra, da Lua e do Sol. O autor ressalva que o modelo estático não é o real, em que pese à análise usada fornecer uma imagem satisfatória apenas para as características gerais das marés devido à atração da Lua e do Sol. O pesquisador aponta que a Terra não é totalmente coberta por água como presumido em seu modelo descrito, mas inclui grandes continentes, demonstrando que a forma das costas e a profundidade variável da água desempenham um papel significativo na formulação das marés. Chega a exemplificar que se um golfo raso estiver conectado a um mar por uma ampla abertura, então, durante uma enchente, uma grande quantidade de água entra no golfo, tornando a amplitude das marés muito maior do que o previsto. O oposto acontece se um mar

fechado (como o Mediterrâneo) estiver conectado a um oceano por uma abertura estreita. Então, apenas uma pequena quantidade de água entra no mar e não afeta significativamente o nível do mar. Ainda cita outras fontes que descrevem tais efeitos dinâmicos das marés: as costas interpostas contribuem para a criação de várias ondas de maré (por exemplo, as chamadas ondas de Kelvin (Proudman, 1953) e é possível produzir efeitos de difração do distúrbio de maré original. Nesse caso o nível da água pode sofrer alteração considerável perto das costas (Kapoulitsas, 1980; Haines, 1981). Também a tensão do vento e os gradientes da pressão atmosférica na superfície do mar, bem como a elasticidade da Terra, podem influenciar a formação das marés. Finaliza, de forma irônica e criativa, alegando que se a Terra fosse totalmente coberta por água e os seres humanos vivessem sobre a água, então o fenômeno das marés não seria facilmente descoberto, pois as costas (assim como o fundo dos mares próximos às costas) são tomadas como pontos de referência para a altura da superfície livre da água e, portanto, a amplitude da maré.

- Estimating the Power in the Tides (1987)

Shea (1987) também já havia feito um exercício semelhante para estimar a potência dissipada devido ao atrito das marés oceânicas. Levando em conta a informação da diminuição da taxa de rotação da Terra (16 segundos em 1 milhão de anos), calcula a mudança da energia cinética rotacional da Terra. O autor assume que essa mudança seja considerada, em grande parte, devido ao atrito das marés oceânicas. Assim, ele estima a potência dissipada pelas marés e a compara com a potência produzida pelas usinas elétricas comerciais. Outro problema que pode ser aproveitando em uma sala de ensino superior.

- Tides, Eclipses, and the Densities of the Sun and the Moon (1987)

Hodges (1987) descreve uma relação entre as amplitudes e densidades do Sol e da Lua. Mais especificamente:

$$\frac{\text{Amplitude das marés terrestres devido à Lua}}{\text{Amplitude das marés terrestres devido ao Sol}} = \frac{\text{Densidade da Lua}}{\text{Densidade do Sol}}$$

Hodges lembra que os tamanhos angulares do Sol e da Lua são aproximadamente iguais, como demonstrado pelo fato de que os eclipses solares são

curtos quando totais e às vezes anulares. Isso significa que  $\frac{r}{d}$  e, portanto,  $\left(\frac{r}{d}\right)^3$  são aproximadamente os mesmos para o Sol e a Lua, em que  $r$  é o valor do raio do corpo (Terra, no caso) e  $d$  sua distância da Lua (ou do Sol). Daí, ele conclui que se  $\frac{r}{d}$  for o mesmo para a Lua e o Sol, a razão entre as amplitudes das marés lunares e solares simplifica para apenas a razão entre a densidade lunar e a densidade solar. As marés lunares são, portanto, maiores que as marés solares porque a Lua é mais densa que o Sol. Ele calcula a razão das amplitudes médias das marés como sendo de 2,2. O autor finaliza alegando que por mais que esses resultados não sejam novos, não são comumente conhecidos.

- Galileo e a Rotação da Terra (1994)

Martins (1994), analisa dois argumentos de Galileo Galilei relativos à rotação da Terra, os quais se fazem presente em sua obra "Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo". Em um deles, Galileu defende a rotação da Terra contra o argumento de extrusão dos corpos por rotação. No segundo, Galileu procura evidenciar a rotação e a translação da Terra pela existência das marés. Mostra-se que nenhum dos dois argumentos era satisfatório, para a física da época. Por exemplo, sua "prova" para o movimento da Terra levando em consideração as marés, introduz uma incoerência na própria mecânica de Galileu, além de não estar de acordo com os fatos observados mais gerais, relativos às marés. Conclui-se que Galileu nem conseguiu defender adequadamente a teoria copernicana contra os ataques da época, nem apresentar evidências positivas convincentes a seu favor. O artigo comenta também a relação entre esses pontos e dificuldades educacionais atuais, pois, sob o ponto de vista didático, esses dois exemplos mostram a existência de grandes dificuldades conceituais por trás de um assunto "elementar" da mecânica: o estudo do *movimento circular uniforme*. O autor alerta para o conhecimento dessas dificuldades a fim de auxiliar o professor, que deve ser capaz de compreender as dúvidas dos estudantes e de discutir de forma aprofundada os conceitos envolvidos nesse tema.

- Efeitos das Marés sobre o Sistema Terra-Lua (1996)

Lopes (1996), elabora alguns cálculos a nível superior para mostrar que uma potência de  $3,38 \times 10^{12}$  W é dissipada através das forças de marés, no sistema Terra-Lua. Isso ocasiona um afastamento da Lua em relação à Terra com uma velocidade de 4,07 cm por ano e um aumento no período de rotação da Terra em cerca de 2,24 ms por século. Um trabalho que pode complementar algumas aulas de ensino superior.

- Is the Moon Falling Upside Down? (1997)

Sawicki (1997) mostra como o mecanismo das marés afeta a Lua no que concerne ao fato de apenas olharmos, da Terra, a mesma face da Lua (acoplamento de maré).<sup>17</sup> Antes de tudo, ele dá uma breve explicação sobre forças de marés, usando referencial acelerado da Terra, usando clássicas imagens de “halteres” para representar um sistema de duas partículas e seu centro de massa ligados gravitacionalmente a um corpo atrator. Para ilustrar o acoplamento de maré, toma um sistema de referência genérico para o “haltere”, que quando visto a partir de um referencial em queda, cada massa do “haltere” estará sujeita a um torque gravitacional (torques de marés). Chega-se à surpreendente conclusão de que o lado “próximo” da Lua pode muito bem ser o menos massivo.

- On the Tidal Time Delay of the Earth (1998)

Afonso e Sant’Anna (1998) apresentam uma expressão para o atraso de resposta das marés da Terra, a qual leva em consideração observações paleontológicas. Um modelo semiempírico para a dinâmica do sistema Terra-Lua é obtido, considerando que a dissipação de energia e o atraso de resposta não são constantes em relação ao tempo. Em um trabalho anterior, estabeleceram um modelo similar considerando apenas a dinâmica do raio de uma órbita circular da Lua. Nesse estudo, três equações diferenciais descrevem a dinâmica de três variáveis, a saber, o raio médio da órbita lunar, a excentricidade da órbita e a inclinação do plano orbital da Lua em relação ao plano

---

<sup>17</sup> Sawicki, adiciona vários exemplos de acoplamento de maré no nosso sistema solar: O satélite de Plutão, Caronte, orbita Plutão a cada 6,4 dias, e gira em seu próprio eixo com um período de 6,4 dias, mostrando assim o mesmo lado de Plutão. Ambas as luas de Marte (Phobos e Deimos), cinco das 16 luas de Júpiter (incluindo todas as quatro luas galileanas), nove das 15 luas de Saturno, uma das 5 luas de Urano e uma das 2 luas de Netuno (Tritão) todos têm períodos de rotação iguais aos seus períodos orbitais.

inercial ortogonal ao momento angular total do sistema Terra-Lua. Neste sentido, considerou-se o sistema Terra-Lua isolado. Comparou-se essa descrição com aquela que considera o atraso de resposta de maré constante em relação ao tempo e mostrou-se que o modelo é consistente com as modernas teorias sobre a formação do sistema Terra-Lua.

- Previsão Astronômica através das Observações das Marés (1998)

Kulesza (1998) já naquela época critica o currículo das escolas de 1º a 3º graus<sup>18</sup> que apenas faziam uma breve alusão ao fenômeno das marés<sup>19</sup>. O autor afirma que é importante dar atenção ao fenômeno quando se percebe que as populações litorâneas leigas fazem uso de um saber prático para poder preverem seus eventos principais, relacionados principalmente à pesca e à navegação, recorrendo aos movimentos do Sol e da Lua. O pesquisador lembra que o fenômeno permite o estudo de funções periódicas e análise de gráficos, o cotejo com efemérides astronômicas<sup>20</sup>, resgata um acontecimento histórico (uma das primeiras estimativas da massa da Lua foi usando a diferença de altura das marés)<sup>21</sup> e reforça que é um momento oportuno para trabalhar o *fazer ciência*, confrontando as linguagens dos pescadores com as dos cientistas.

- Galileu e a Teoria das Marés (1999)

Mariconda (1999) resgata a importância do valor histórico da Quarta Jornada no conjunto do Diálogos, ressaltando o aspecto positivo da contribuição de Galileu ao fenômeno das marés, embora seu fracasso em entender a atração gravitacional o tenha conduzido a ideias incorretas sobre as forças de maré e seus períodos. A situação é resumida ao alegar que Galileu erra na determinação da causa primária das marés, enquanto Newton a determina adequadamente. Por outro lado, Newton erra, ao negligenciar os efeitos do movimento de rotação da Terra, enquanto Galileu os intui

---

<sup>18</sup> No sistema educacional brasileiro, a nomenclatura atual para os termos "1º grau", "2º grau" e "3º grau" das escolas de 1998 corresponde, atualmente, ao Ensino Fundamental, Ensino Médio e Ensino Superior, respectivamente.

<sup>19</sup> Da mesma forma que essa dissertação analisa os livros didáticos.

<sup>20</sup> Vale ressaltar que essa concordância é apenas fortuita dada a complexidade do fenômeno.

<sup>21</sup> Citado por Kibble, T. W. B., *Mecânica Clássica*, São Paulo, Polígono, 1970, p.123.

adequadamente no conjunto de “causas secundárias”<sup>22</sup> das marés. Em segundo plano, a teoria de marés galileana é comparada às teorias de marés baconiana, cartesiana e newtoniana, todas estas pertencentes ao conjunto das teorias mecanicistas do século XVII.

- Myths about Gravity and Tides (1999)

Sawicki (1999), de forma semelhante à da Silveira (2003), lê uma notícia no jornal dizendo que a Lua afeta os oceanos, seres humanos e outros corpos menores de água (Jornal: *Miami Herald*, July 2, 1996)<sup>23</sup>. A partir disso, constrói uma explicação elementar do mecanismo das marés, derrubando alguns mitos sobre gravidade e marés. Já começa lembrando que o Sol também contribui nas marés oceânicas aqui na Terra, embora o faça em menor intensidade que a Lua. Em seguida, reforça o fato de que para entender a explicação da causa das marés, não importa apenas a força gravitacional, mas sim a diferença dessa força em distintos pontos da Terra. Ainda que sintético, suas contas são semelhantes ao que da Silveira (2003) apresenta. Por fim, ainda mostra que um efeito de maré sobre um ser humano seria praticamente imensurável.<sup>24</sup>

- High Tides? (1999)

Olson e Lytle (1999) corrigiram algumas imprecisões no trabalho de Sawicki (1999). De acordo com aqueles, este subestimou a quantidade pela qual as forças de maré são aumentadas perto da data do perigeu da Lua e do periélio da Terra. Os autores começam lembrando que a excentricidade média da órbita lunar é de 0,0549, e a distância típica do perigeu (363 300 km) é, portanto, 5,49% menor que a distância média da Lua (384 400 km). Como as forças de elevação da maré variam com inverso

---

<sup>22</sup> “[...] Descartes e Newton supõem tacitamente o movimento de rotação da Terra na explicação do atraso diário de aproximadamente 50’ nas marés. Evidentemente, essa suposição não tem o mesmo caráter que a de Galileu: para este, trata-se de mostrar que as marés são uma prova do movimento da Terra, por meio de uma argumentação que vai do efeito para a causa; para aqueles, o movimento de rotação da Terra é apenas uma causa secundária, assumida hipoteticamente para explicar um efeito particular das marés.” (Mariconda, 1999, p.66-67 e Mariconda, 2011, p.860).

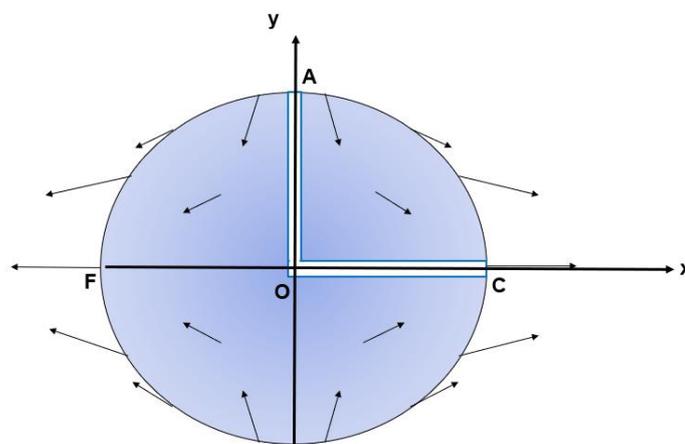
<sup>23</sup> Há uma outra peripécia semelhante em: “Ask Marilyn” *Parade Magazine*, Dec. 8, 1996. Inacreditavelmente, até mesmo um astrônomo disse que “as forças de marés atuam em todos os corpos d’água, não apenas nos oceanos”, conforme em “The Sky This Week”, *Southern Illinoisan*, March 27, 1998.

<sup>24</sup> Em suas palavras: “The expected change in person’s height is a million times smaller than a size of atom!” (Sawicki, 1999, p.440).

da distância ao cubo, as forças de maré da Lua no perigeu são aumentadas por um fator de cerca de  $\frac{1}{(1-0,0549)^3} \cong 1,18$ , para uma variação de cerca de 18% acima das marés lunares médias (Sawicki havia relatado um aumento de 6% em sua nota). Olson e Lytle adicionam que, na verdade, por causa de três efeitos de corpo no sistema Sol-Terra-Lua, a distância do perigeu lunar pode ser tão pequena quanto 356 400 km, e os efeitos de maré da Lua podem ser até 25% mais fortes do que aqueles na distância média. Da mesma forma, quando a Terra passa pelo periélio, os efeitos de maré do Sol aumentam por um fator de cerca de  $\frac{1}{(1-0,017)^3} \cong 1,05$ , um aumento de 5% (Sawicki havia relatado um aumento de 2% em sua nota).

- Another Important Component of Tides (2000)

Millet (2000), alerta que Sawicki (1999) esquece de uma parte muito importante da força de maré: a força de compressão descendente em direção ao centro da Terra que ocorre no ponto A, que é o ponto na superfície da Terra na metade de sua circunferência a meio caminho entre o ponto mais próximo do Sol, C, e o ponto mais distante do Sol, F, conforme representado na figura 6 a seguir:<sup>25</sup>



**Figura 6:** mecanismo das marés (setas representam as forças de marés fora de escala).

Fonte autor, 2023, baseada na explicação de Sawicki (Sawicki, 1999, p.438; Sawicki, 2005, p.440.).

<sup>25</sup> Como esse artigo não possui imagem, segue a descrição na íntegra: “To see how tides come about, we need to remember that Earth is in free fall about the Sun. Suppose the whole Earth is covered with ocean of equal depth everywhere; there is no dry land. Consider a point C on the side of Earth closest to the Sun, a point F on the far side of Earth, and a point A halfway from C towards F along Earth’s surface (i.e., one-quarter of Earth’s circumference away from both C and F). [...]” (Sawicki, 1999, p.438).

De acordo com o autor, essa força faz a diferença entre as marés alta e baixa no equador da Terra 50% maior do que implícita na nota de Sawicki. Millet ainda afirma que se uma pessoa estivesse caindo com os pés em um buraco negro, essa pessoa não sentiria a força da gravidade por causa de sua própria aceleração, mas sentiria uma força de estiramento de maré puxando para cima em sua cabeça e para baixo em seus pés, e uma força de maré de compressão empurrando sua cintura para dentro.

- Marés, Fases Principais da Lua e Bebês (2003)

Como motivação e para guiar a discussão no artigo, o autor utiliza um argumento interessante, mas falacioso, de uma astróloga a favor da suposta influência da Lua sobre o nascimento de bebês e outras tantas crenças<sup>26</sup>. Utilizando-se de uma matemática relativamente<sup>27</sup> acessível a alunos de EM, da Silveira (2003) discute os mecanismos responsáveis pelas marés. O autor embasa a discussão explicando, através de um sistema de três partículas em um campo gravitacional não uniforme (primeiramente separados entre si e depois ligados por hastes finas e leves), que as marés ocorrem porque a Lua e o Sol exercem um campo gravitacional variável em intensidade e orientação sobre pontos diferentes da Terra. Acrescenta ainda que isso ocorre porque o raio da Terra não é insignificante em comparação com as distâncias aos dois astros. Assim, percebe-se que as águas oceânicas, que cobrem grandes áreas da Terra, são atraídas em intensidades diferentes pela Lua e pelo Sol, resultando em marés. No entanto, não há efeito de maré em pequenas regiões, como bacias, piscinas ou açudes, pois diferentes pontos dessas regiões estão praticamente equidistantes do astro atrator e, portanto, sofrem um campo gravitacional constante em todo o volume de líquido, incapaz de deformá-lo. Após toda a explicação teórica, o autor retoma a pergunta motivadora, esclarecendo que o líquido no útero da mãe ou no bulbo capilar não sofre deformação de maré, apenas uma variação insignificante no peso aparente, que não é superior a uma parte em seis milhões. Em suma, demonstra-se que tanto a

---

<sup>26</sup> "Se a Lua é capaz de agir nas enormes massas de água dos oceanos, como ela não teria efeito sobre os líquidos no útero da mãe ou sobre outros fluidos corporais, influenciando no crescimento dos nossos cabelos?" (da Silveira, 2003, p.11).

<sup>27</sup> Consideramos relativamente acessível, pois na prática, há outros fatores envolvidos, em especial a falta de tempo para trabalhar com calma as equações matemáticas apresentadas pelo autor, e a ausência da habilidade de matemática básica por parte dos alunos do EM, atualmente. Dessa forma, acreditamos que seja mais acessível para alunos que treinam para vestibulares militares, que tendem a ter uma habilidade e treinamento maior com a matemática.

Lua, quanto o Sol são responsáveis pelos efeitos de marés nos oceanos. O autor utiliza-se da noção de referencial não inercial para construir a proposta. Aproveita-se a concepção espontânea amplamente difundida na literatura da compreensão de que a elevação dos oceanos não se dá apenas no lado da Terra voltado para o astro (concepção errada do ponto de vista científico), mas também no lado diametralmente oposto. Por fim, apresenta-se um estudo com 104 616 datas de nascimento, contradizendo a crença popular que nos dias das quatro fases principais da Lua aumenta o número de nascimentos<sup>28</sup>.

- The Importance of Weightlessness and Tides in Teaching Gravitation (2003)

Galili e Lehavi (2003) focam no ensino universitário. Examinaram o conteúdo da força gravitacional e das marés em livros de física de nível universitário. De acordo com os autores, os livros didáticos introdutórios geralmente não discutem as forças das marés, embora seu entendimento seja útil para entender a ausência de peso. Eles reforçam que as explicações das marés frequentemente deixam de fora o movimento gravitacional livre de ambos os objetos interagindo, o que é essencial para a simetria da deformação das marés. As deficiências nas explicações de ausência de peso e marés fornecidas por estudantes e professores são comparadas às discussões em livros didáticos. Os autores sugerem que uma discussão explícita das diferentes definições de peso e uma apresentação sinérgica de ausência de peso e marés possam levar a uma melhor compreensão da gravitação. A abordagem deles é ilustrada por exemplos de efeitos de maré apropriados para cursos introdutórios. O estudo sugere que a apresentação tradicional da gravitação seja revisada de forma a abordar o peso, a falta de peso e os efeitos de maré em uma unidade integrada para enfatizar os aspectos comuns e contrastantes dos efeitos da gravitação. Como exemplo, os autores relatam que a dicotomia de duas definições de peso, a gravitacional, introduzida por Newton, e o operacional seguindo Einstein, apresenta um possível tema de discussão com os alunos. Tal discussão que aborde as vantagens e desvantagens de cada definição pode ser benéfica para o entendimento genuíno da natureza do conhecimento físico.

---

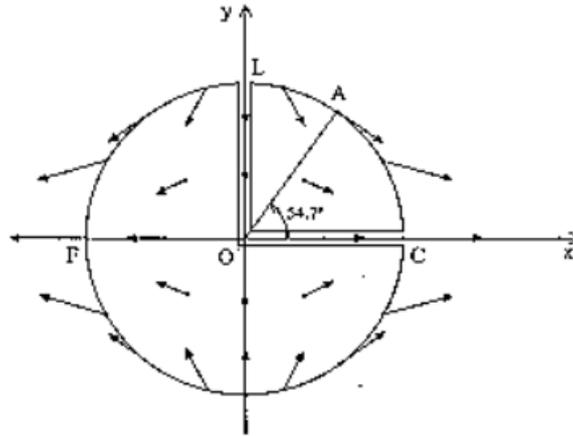
<sup>28</sup> Em da Silveira (2001a) encontra-se um estudo semelhante, com 93 124 datas de nascimento.

- Tidal Analysis on a Spreadsheet (2004)

De Levie (2004), utilizando uma planilha Excel, realiza uma análise harmônica das marés combinando dados astronômicos, transformação de Fourier e análise não linear de mínimos quadrados. A transformação de Fourier é usada para exibir o espectro de potência dos dados iniciais e, durante os estágios subsequentes de refinamento da análise, dos resíduos restantes. Como apenas uma amostra relativamente pequena é usada, a resolução de frequência da transformação de Fourier é insuficiente para determinar as frequências precisas envolvidas, que são retiradas de dados astronômicos. O ajuste real de termos sucessivos, em ordem de importância decrescente, é realizado com mínimos quadrados não lineares. Como a transformação de Fourier e o ajuste de mínimos quadrados não lineares são prontamente automatizados em uma planilha, a quantidade de esforço computacional necessária para essa análise é mínima. No apêndice do artigo, o autor deixa as instruções para quem deseje usar as macros do Excel. Por mais que o artigo não deixe claro, julga-se que os dados observados e a prática realizada pelo autor poderiam ser aproveitados em alguma aula de física ou astronomia no nível superior.

- Myth about Gravity and Tides (2005)

Sawicki (2005), estende e revisa seu trabalho anterior. Insere algumas imagens mais ilustrativas, insere alguns cálculos mais complexos envolvendo potencial das marés, insere mais exemplos consequentes dos efeitos de marés (O que acontece quando a Lua está no perigeu, ou seja, no ponto mais próximo da Terra?; Duração de um dia; Futuro da Terra - Sistema Lunar; Por que o esferoide de água não está alinhado com a Lua?; Cair em um buraco negro) e acrescenta a força de compressão alertada por Millet (2000), conforme a ilustração da figura 7 a seguir.



**Figura 7:** O mecanismo das marés: o eixo x aponta para o Sol. A Terra está em queda livre em direção ao Sol. A força de maré resultante causa marés altas no ponto C mais próximo do Sol e no ponto F mais distante do Sol, e uma maré baixa no ponto L. Observe que no ponto A a força de maré é tangente à superfície da Terra (Sawicki, 2005, p.440).

Sawicki explica que a força de maré se manifesta como uma força de compressão descendente em direção ao centro da Terra no ponto L e uma força de alongamento puxando para cima, afastando-se do centro da Terra nos pontos C e F. Isso resulta em um achatamento permanente dos polos da Terra devido à força compressional de maré da Lua e do Sol, que sempre se adicionam nos polos da Terra. Esse achatamento dos polos ocorre independentemente da rotação da Terra. Da mesma forma, as forças de maré geradas por todos os planetas contribuem para o achatamento dos polos do Sol. A maioria das estrelas em nossa galáxia contribui para a força de maré que ajuda a achatar a galáxia. Por fim, o autor indaga: qual seria o destino de uma pessoa que caísse com os pés primeiro em um buraco negro? Ele esclarece, utilizando o próprio Millet como referência, que essa pessoa não sentiria a força da gravidade, por estar em queda livre (semelhante a uma pessoa em um elevador em queda livre ou um astronauta em uma nave orbitando não sentindo seu próprio peso), mas sentiria uma força de maré devastadora puxando para cima em sua cabeça e para baixo em seus pés, e espremendo sua cintura para dentro (Millet, 2000).

- Tides (2006)

Hewitt (2006), em um simples artigo de duas páginas, demonstra através de um exercício simples e qualitativo, o princípio das marés. Um exercício muito parecido

com o de Loxsom (1977), visto anteriormente. O artigo explica como um corpo massivo no espaço exterior exerce força gravitacional em pequenas gotas de água de igual massa, sendo que a gota mais próxima tem maior aceleração. Caso as gotas estejam dentro de um saco plástico, o observador verá o saco se esticar devido à queda mais rápida de uma das gotas. Essa situação é análoga às marés oceânicas, onde a Lua exerce atração gravitacional na Terra e seus oceanos, fazendo com que eles "caiam" em torno da Lua em vez de diretamente em direção a ela.

- On Compressive Radial Tidal Forces (2007)

Masi (2007), destaca as forças de maré radiais compressivas, que de acordo com o autor, é frequentemente negligenciada em cursos de física de alto nível. Masi trabalha em cima da compressão radial das marés que surgem em sistemas estelares estendidos contendo um aglomerado estelar menor. O autor consegue derivar esse aspecto interessante da gravidade por meio das relações padrão dadas em muitos livros didáticos e cursos introdutórios de astronomia e pode servir como uma oportunidade para examinar mais de perto alguns aspectos da física gravitacional, dinâmica estelar e geometria diferencial. Por fim, Masi afirma que a existência de marés compressivas no centro de grandes sistemas estelares pode sugerir novos cenários evolutivos para a formação de estrelas e processos primordiais de formação galáctica.

- Francis Bacon e as marés: a concepção da natureza e o mecanicismo (2007)

Mariconda (2007) discute a concepção da natureza e o mecanicismo de Francis Bacon. Ele argumenta que Bacon viu a natureza como uma máquina e buscou explicá-la usando princípios mecânicos, como as leis da física. O artigo também destaca a importância das marés para a compreensão de Bacon sobre a natureza, e como ele as usou para desenvolver sua teoria mecanicista. Em geral, o artigo apresenta uma visão da filosofia natural de Bacon e seu impacto na ciência e na sociedade moderna. Bacon acreditava que as marés eram causadas pela ação dos ventos e das correntes oceânicas, e que poderiam ser entendidas através do estudo desses fenômenos. Assim, ele usou a observação das marés para validar sua teoria mecanicista da natureza e mostrar como a física poderia ser aplicada para explicar diversos fenômenos naturais. O artigo destaca a influência dessa abordagem de Bacon nas ciências naturais e como ela ajudou a formular uma visão mecanicista da natureza que prevaleceu por vários séculos. Vale

destacar que o artigo menciona que as ideias de Bacon sobre as marés e a concepção mecanicista da natureza foram influenciadas por Francesco Patrizi, o qual também viu a natureza como uma máquina e acreditava que poderia ser explicada através da aplicação da filosofia e da matemática. Ele argumentou que as marés eram causadas pela combinação de diversos fatores, incluindo a posição da Lua, a rotação da Terra e as correntes oceânicas. De acordo com o artigo, Bacon foi influenciado pelas ideias de Patrizi e as incorporou em sua própria teoria mecanicista da natureza. Assim, é sugerido que a concepção de Bacon sobre as marés e a natureza em geral não deve ser vista como uma inovação isolada, mas sim como resultado da evolução das ideias sobre a natureza no período renascentista. Por fim, destaca-se a importância desses pensadores na formação da visão mecanicista da natureza que influenciou a ciência e a sociedade por vários séculos.

- Tides, as Explained by Newton (2008)

Griffin (2008), já começa dando um relato interessante<sup>29</sup> e, em seguida, lista vários sites que fornecem explicações completamente incorretas para as marés. O site Angelfire diz: “*Gravitational force can account for only one of the two daily high tides. A non-gravitational force is also at work producing tides. Centrifugal forces give rise to the second daily high tide*” (“*A força gravitacional pode explicar apenas uma das duas marés altas diárias. Uma força não gravitacional também está em ação produzindo marés. As forças centrífugas dão origem à segunda maré alta diária.*”)<sup>30</sup>. O site do Salem State College diz: “*Two tidal bulges are produced on opposite sides of the Earth. The bulge facing the Moon is produced largely by the gravitational effect of the Moon. The bulge on the opposite side is produced by centripetal acceleration.*” (“*Dois protuberâncias das marés são produzidas em lados opostos da Terra. A protuberância voltada para a Lua é produzida em grande parte pelo efeito gravitacional da Lua. A protuberância no lado oposto é produzida pela aceleração centrípeta.*”)<sup>31</sup> O site do

---

<sup>29</sup> Transcrição: “*This analysis was the result of a question in class from a fifth-former, who said that he did not understand how water could bulge out from the Earth on the side opposite to the Moon. When I started to explain, I decided that I did not understand either.*” (Griffin, 2008, p.129).

<sup>30</sup> A página referenciada não se apresenta mais disponível. Última tentativa de acesso em 22/04/2023.

<sup>31</sup> A página referenciada não se apresenta mais disponível. Última tentativa de acesso em 22/04/2023.

NOAA<sup>32</sup> e o ExploreLearning ([www.explorelearning.com/index.cfm?method=cResource.dspExpguide&ResourceID=368](http://www.explorelearning.com/index.cfm?method=cResource.dspExpguide&ResourceID=368)) afirmam que as forças centrífugas nos lados opostos da Terra são as mesmas, apesar do fato de estarem a distâncias diferentes do centro de rotação. Em seguida, o autor do artigo demonstra, usando cálculo diferencial e um pouco de trigonometria básica, a teoria newtoniana de marés, evidenciando que as marés são inteiramente devidas à sua lei da gravidade do inverso do quadrado, que prevê que o campo gravitacional da Lua ou do Sol será maior de um lado da Terra do que o campo do outro (campo gravitacional não uniforme), evidenciando que as marés não têm nada a ver com a rotação do sistema ou com forças centrípetas ou centrífugas.

- How Tidal Forces Cause Ocean Tides in the Equilibrium Theory (2015)

NG (2015) analisa por quais razões é errado pensar que uma protuberância de maré é formada puxando a superfície da água diretamente para cima por uma força de maré vertical local. O autor argumenta que, de fato, as marés oceânicas são causadas pelo efeito global das componentes horizontais das forças das marés. Explicando em outras palavras, com relação à causa de uma protuberância de maré, pode-se pensar intuitivamente que a superfície do oceano é puxada diretamente para cima por uma força de maré vertical local. Alguns autores apontam que isso não é o caso e que, na verdade, as marés oceânicas são causadas principalmente pelos componentes horizontais das forças de maré. Assim, o autor reexamina essa questão apresentando argumentos em nível universitário dentro do *framework* da teoria de equilíbrio. A análise das marés pode ser feita pelo método da força ou pelo método do potencial. Ele adota o primeiro método, pois ele é mais comum no nível introdutório e mais vantajoso para entender o mecanismo da causa.

- On the Tidal Force of the Moon on the Earth (2015)

Razmi (2015), revisa o modelo estático de forças de maré com simetria completamente esférica (um método baseado em cálculo diferencial é adicionalmente introduzido para leitores com mais familiaridade ou interesse em ferramentas matemáticas). Em seguida, o resultado é generalizado para a força de maré da Lua

---

<sup>32</sup> A página referenciada não se apresenta mais disponível. Última tentativa de acesso em 22/04/2023.

atuando na Terra, considerando a dinâmica rotacional e a forma esferoidal (real) achatada da Terra. O autor calcula a expressão para o termo de primeira ordem da força de maré da Lua agindo sobre um elemento de massa unitário da Terra com forma oblata partindo da equação estática com simetria esférica completa, a qual é uma equação “generalizada” da equação da força de maré até seu termo de primeira ordem, geralmente é calculada por métodos geométricos.

- Weight, gravitation, inertia, and tides (2015)

Pujol e Lagoute (2015) tratam dos fatores que influenciam o peso de um objeto próximo à superfície da Terra: a força gravitacional da Terra, a força centrífuga devido à rotação diurna da Terra, e forças de maré devido ao campo gravitacional da Lua e do Sol, e outros corpos do sistema solar em menor extensão. Cada uma dessas três contribuições é discutida e as expressões são derivadas. De acordo com os autores, a relação entre peso e gravitação é estabelecida de forma direta e pedagógica, facilmente compreensível por alunos de graduação. A análise aplica-se ao limite newtoniano da gravitação. A derivação é baseada em uma definição experimental da força peso, e mostra que ele coincide com a força gravitacional da Terra modificada pela rotação diurna em torno de um eixo polar e não uniformidade dos corpos gravitacionais externos (termo de maré). Dois exemplos ilustram e quantificam essas modificações: o efeito Eötvös<sup>33</sup> e as marés oceânicas; forças de maré devido à gravitação diferencial em uma espaçonave e um asteroide também são propostas como exemplos. Considerações sobre a inércia também são feitas e uma breve crítica sobre uma explicação difundida, mas confusa, das marés baseada em uma força centrífuga. Aqui, os autores citam a obra *The Feynman Lectures on Physics Mechanics*, 1969, p.77, que de fato, apresenta uma explicação amplamente difundida das marés oceânicas, em que consiste em considerar o sistema (Terra-Lua) e introduzir uma força centrífuga oportuna (*ad hoc*) que “compensa” a atração gravitacional da Lua. O movimento é assim estudado no referencial rotativo cuja origem é o centro da Lua e onde o centro da Terra está em repouso. Isso leva ao mesmo resultado apresentado no trabalho dos autores. No entanto, essa explicação discorda da definição de maré aceita pela comunidade científica (GLOSSARY, Geodetic. National Geodetic Survey. Rockville, MD, 1986, p.238). Além

---

<sup>33</sup> O efeito Eötvös é a modificação de peso que ocorre quando um corpo tem um movimento latitudinal (latitude constante) (Pujol e Lagoute, 2015, p.6).

disso, do ponto de vista pedagógico, aborda as marés oceânicas de forma bastante complicada. Finalmente, a expressão da energia potencial da força geradora da maré é estabelecida rigorosamente no apêndice.

- Tidal Misconceptions (2016)

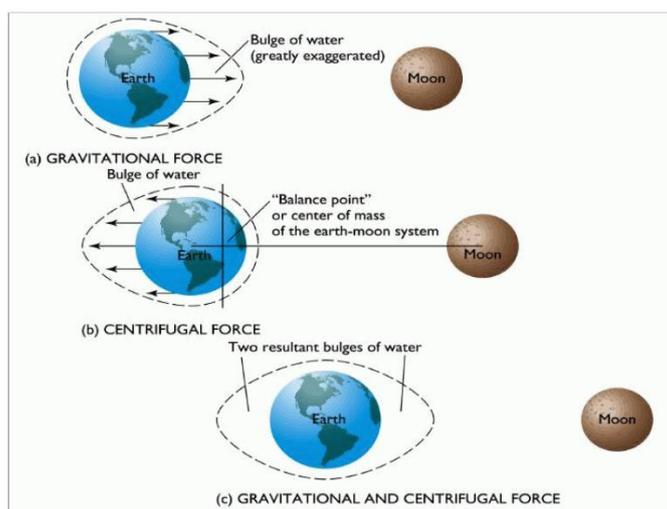
Simanek (2016) trata sobre equívocos comuns relacionados às marés, os quais podem ser encontrados em alguns livros analisados pelo autor. Alguns dos mitos e concepções erradas sobre as marés abordados no artigo incluem: (a) marés causadas pelo movimento da água: o autor refuta a ideia de que as marés são causadas pelo movimento da água e afirma que a verdadeira causa é a atração gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra, (b) marés maiores durante a Lua Cheia: embora muitas pessoas acreditem que as marés são maiores durante essa fase lunar, o autor explica que isso é falso. As marés são afetadas pela posição relativa da Lua, do Sol e da Terra, e não somente pela presença da Lua Cheia, (c) ventos como causas das marés: o autor destaca que, embora os ventos possam influenciar a forma como as marés se manifestam em uma região, eles não são responsáveis pela existência das marés<sup>34</sup>, (d) marés influenciadas pelas formas do fundo do mar: o autor refuta a ideia de que a forma do fundo do mar influencia as marés e explica que a verdadeira causa é a atração gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra e (e) atribuir à força centrífuga o papel de causadora da formação do bojo de maré no lado oposto da Terra em relação à Lua<sup>35</sup>: nas páginas 2 e 3 desse artigo, o autor apresenta um diagrama capcioso, o qual induziria os estudantes a concluir que a protuberância de maré mais próxima da Lua é inteiramente devida à gravidade, enquanto a protuberância oposta à Lua é devida a "efeitos inerciais". A figura criticada por Simanek sugere que as setas representem forças centrífugas. Esta, é um conceito aplicável apenas à solução de problemas em sistemas de coordenadas rotativas (não inerciais). O texto que acompanha não diz se a Terra está girando em relação à Lua. Não diz se a análise é feita em um sistema de coordenadas rotativas. Independentemente disso, mesmo quando um sistema de coordenadas rotativas é considerado para fins de análise, o tamanho da força centrífuga é o mesmo

---

<sup>34</sup> Para mais informações sobre a influência dos ventos nas marés: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=diversas-influencias-sobre-as-mares>. Acesso em 03/02/2023.

<sup>35</sup> Há uma pergunta semelhante no seguinte *site*: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=duvida-sobre-a-forca-de-mare#:~:text=As%20for%C3%A7as%20inerciais%20centr%C3%ADfugas%20devidas,com%20os%20efeitos%20de%20mar%C3%A9>. Acesso em 01/02/2023.

em qualquer lugar da Terra ou dentro dela. A figura mostra claramente as setas de tamanhos diferentes, maiores nos pontos mais distantes do baricentro. Então, o que eles podem significar? Agora, pode ser que as setas sejam apenas para sugerir os deslocamentos da água. Se assim for, a legenda deveria ter dito isso. O diagrama é apresentado a seguir (figura 8) e tem muitos elementos que podem levar a interpretações errôneas e sugere fortemente que o autor ou artista também teve tais equívocos.



**Figura 8:** formação das protuberâncias de marés. Fonte: SIMANEK, Donald E. Tidal Misconceptions, p.3, 2015.

As forças de maré são forças gravitacionais diferenciais em relação a um ponto de referência que, em princípio, pode ser escolhido arbitrariamente, mas na prática é identificado com o centro de massa da Terra. Essas forças nada têm a ver com as forças centrífugas que atuam na Terra em sua órbita (Brosche, 1979; Brosche, 1998). Ou ainda, as forças inerciais centrífugas devidas à rotação da Terra em torno de seu eixo são diretamente proporcionais à distância ao eixo de rotação da Terra. Existem diversos efeitos centrífugos mensuráveis sobre corpos na superfície da Terra, mas estes nada tem a ver com os efeitos de maré (<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=duvida-sobre-a-forca-de-mare>).

Em suma, o artigo busca desafiar esses mitos e concepções erradas e apresentar a verdadeira ciência por trás das marés. Ao compreender corretamente as marés, pode-se ter uma melhor compreensão de outros fenômenos relacionados, como as correntes oceânicas e a dinâmica costeira.

- Just How Much do the Planets Affect the Tides? (2017)

Cregg (2017) mostra a influência dos planetas e o alinhamento planetário nas marés da Terra.<sup>36</sup> Usando a lei da gravitação de Newton, a influência das marés de qualquer corpo celeste é expressa em termos de seu tamanho aparente e sua densidade. A partir disso, o alinhamento planetário pode ser visto como contribuindo no máximo décimos de milímetro para uma maré e, portanto, é improvável que seja um contribuinte significativo para eventos de maré excepcionais. O autor descreve as possíveis razões que levam aos eventos de marés extremas, sendo elas: a proximidade do Sol e da Lua com a Terra, o equinócio e as condições climáticas, especialmente a pressão atmosférica, a precipitação e o vento. Finaliza o trabalho com a influência de longo prazo dos planetas na órbita da Terra e, portanto, no efeito de maré do Sol (com escalas de tempo da ordem de 100 000 anos), e influência planetária na órbita da Lua.

→ *Novos recursos didáticos*

- Science in School (2013)

Na *Science in School*<sup>37</sup>, há um artigo que serve como uma proposta de aula, em que Tranfield (2013), mostra uma espécie de sequência de aula, tomando como ponto de partida o seguinte título motivador: “*Life without the Moon: a scientific speculation*” (“*Vida sem Lua: uma especulação científica*”). A discussão pode ser realizada em pequenos grupos onde todos os membros têm a oportunidade de expressar suas opiniões. O artigo fornece informações sobre o papel da Lua na origem e evolução da vida. O artigo também fornece um contexto para o ensino de conceitos físicos, particularmente o estudo de campos gravitacionais, contribuindo assim para aumentar o

---

<sup>36</sup> Na página do Centro de Referência para o Ensino de Física (CREF), encontramos a pergunta: “Efeitos de maré na Terra dos demais planetas do sistema solar?” (<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=efeitos-de-mare-na-terra-dos-demais-planetras-do-sistema-solar>). Na tabela 2, apresenta-se a razão entre a máxima força de maré solar pela máxima força de maré de outros planetas do sistema solar. Fica evidente que os efeitos de maré na Terra decorrem essencialmente do Sol e da Lua. Mesmo Júpiter, o maior planeta do sistema solar, apresenta em máxima aproximação do nosso planeta uma força de maré 34 000 vezes menor do que a do Sol.

<sup>37</sup> O Science in School visa apoiar os professores na entrega de seus currículos STEM (Science, Technology, Engineering e Mathematics), a fim de promover atitudes positivas em relação à ciência que molda nossas vidas e atrair alunos para carreiras nesses campos. O programa apoia o ensino de ciências em toda a Europa e em todas as disciplinas: destacando melhor em ensino de pesquisa de ponta. Abrange não apenas biologia, física e química, mas também ciências da terra, engenharia e saúde, com foco no trabalho interdisciplinar. O conteúdo inclui experimentos em sala de aula e materiais didáticos. Para mais informações, acesse: <https://www.scienceinschool.org/>

interesse dos alunos pelo tema. O artigo pode ser usado como um exercício de compreensão, incluindo questões como: Qual é a origem da Lua? Qual é o efeito da Lua na Terra? Qual foi o papel da Lua na origem e evolução da vida na Terra? O que aconteceria se a Lua desaparecesse de repente?

- No Céu, na Terra e na Tela (2013)

Da Silva (2013), apresenta no XX Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF 2013 – São Paulo, SP, seu trabalho sobre o projeto CARONTE (Conteúdos de Astronomia paRa O eNsino apoiado em TEcnologias). Os temas abordados e que estão disponíveis são fases da Lua e marés. A proposta didática que permeia todo o material apoia-se em estratégias diferenciadas com o uso de recursos digitais distintos. A ideia é apresentar diferentes representações, trocas de referenciais, uso de analogias e de simplificações que permitem a compreensão em pequena escala do que é um modelo científico e de como podemos usá-lo na compreensão dos fenômenos observados. O material está disponível em página aberta na *internet*, para uso livre, com versões em português, inglês e francês.<sup>38</sup> Concernente às estratégias didáticas e aos recursos utilizados no material, há um personagem que acompanha o aluno ao longo de toda a “viagem”. A discussão sobre marés oceânicas é separada em partes analisando-se as contribuições dadas pela Lua e pelo Sol individualmente e a composição das duas contribuições é feita no final. Opta-se por uma discussão tanto geométrica quanto matemática já que se trata de um tema de difícil explicação e compreensão (da Silva, 1998; da Silveira, 2003). Não obstante, trata-se de um objeto de aprendizagem tendo em sua concepção a intenção de viabilizar sua exploração em diferentes níveis de ensino.<sup>39</sup>

---

<sup>38</sup> Pode tentar ser acessado no seguinte endereço: [www.fsc.ufsc.br/~tati/caronte](http://www.fsc.ufsc.br/~tati/caronte). (só conseguimos acessar usando o navegador Internet Explorer em 15/04/2021; outras tentativas posteriores não obtiveram sucesso, pois o plug-in não tinha suporte).

<sup>39</sup> Esse trabalho tem aplicação em sala de aula com resultados apresentados no artigo “Aprendizagem mediada por uma hipermídia educacional”. Como não houve uma aplicação específica para o assunto marés, apenas para fases da Lua, optamos por não o descrever na presente dissertação.

→ *Novas propostas e estratégias didáticas*

- Basic Physics of the Semidiurnal Lunar Tide (1979)

Arons (1979) descreve os efeitos que produzem as protuberâncias de maré semidiurnas, usando métodos elementares, sem referência a forças fictícias e sem recurso a um potencial. Uma análise apresenta um análogo aproximado, mas simples, dos efeitos das marés em termos de experimentos de *gedanken* (experimentos mentais) em um laboratório espacial muito grande, em queda livre. Outra análise contrasta explicitamente os efeitos que seriam observados na Terra em um sistema de "um corpo" (ou seja, a Terra mantida fixa em um referencial inercial; a Lua girando em torno dela) com efeitos em um sistema de "dois corpos" (sistema Terra-Lua girando no referencial inercial).

- Las Mareas (2000)

Iparraguirre (2000), usando elementos de dinâmica típicos de um curso básico de física universitária, apresenta e resolve um problema que ajuda a compreender o mecanismo das marés. O problema propõe o cálculo da perturbação gravitacional lunar na superfície terrestre em três diferentes situações simples. Alguns aspectos são discutidos com argumentos e abordagens consideradas úteis para os professores de física.

- Maré, mangue ou manguezal: uma análise de concepções de estudantes no Ensino Fundamental (2012)

Da Silva et al. (2012) apresenta um estudo realizado sobre a compreensão do termo "maré" por estudantes do Ensino Fundamental. As autoras constataram que o termo pode estar associado à ideia de mangues ou manguezais, e desenvolveram uma sequência didática para enriquecer o vocabulário dos estudantes em relação à linguagem científica. Foram identificadas diferentes fases de formação de conceitos nos estudantes, e a pesquisa apresenta inter-relações verificadas entre complexos conceituais e conceitos verdadeiros e entre complexos associativos e os complexos conceituais. O objetivo da pesquisa foi problematizar a realidade no sentido de buscar a construção de

conceitos cujos significados devem estar suportados pela contextualização, possibilitando um letramento científico e uma reflexão sobre ações de cidadania.

- Tidal Locking and the Gravitational Fold Catastrophe (2020)

Ferrogli e Fiolhais (2020) estudam o fenômeno do acoplamento das marés em uma estrutura pedagógica, analisando o potencial gravitacional efetivo de um sistema de dois corpos com dois objetos giratórios. É mostrado que o potencial efetivo de tal sistema é um exemplo de uma “catástrofe dobrada” (*fold catastrophe*)<sup>40</sup>. Os autores demonstram que a existência de um mínimo local e ponto de sela, correspondendo a órbitas circulares bloqueadas por maré, é regulada por um único parâmetro de controle adimensional que depende das propriedades dos dois corpos e do momento angular total do sistema. O método descrito nesse trabalho resulta em expressões compactas para o raio da órbita circular e o spin/frequência orbital bloqueado por maré. O caso limite em que um dos dois objetos em órbita é pontual é estudado em detalhes. Uma análise do potencial efetivo, que neste limite depende de apenas dois parâmetros, permite visualizar claramente as propriedades do sistema. O notório caso da Lua Fobos de Marte é apresentado como um exemplo de um satélite que passou do ponto sem retorno e, portanto, não alcança uma órbita estável ou instável devido à maré. Os pesquisadores propõem como possível atividade em sala de aula, os alunos serem desafiados a analisarem o potencial efetivo da outra Lua de Marte, Deimos. Os alunos resolveriam a Eq. (33) desse artigo, numericamente, para este sistema, a fim de identificar as soluções reais para as órbitas estáveis e instáveis de Deimos. Adicionalmente, os autores lembram que outros sistemas em que o tamanho do satélite não é completamente desprezível, como a Terra e a Lua ou Plutão e Caronte, poderiam ser usados para testar as limitações dessa aproximação. Vão mais além e sugerem que uma outra possibilidade seria pedir aos alunos que plotassem o potencial efetivo na Eq. (10) desse artigo para vários valores da variável  $k$ , semelhante à Fig. 3 desse artigo. O gráfico pode ser transformado em uma animação onde o valor de  $k$  está mudando no tempo usando a função *Manipulate* do *Mathematica* (<https://reference.wolfram.com/language/ref/Manipulate.html>). O método descrito neste

---

<sup>40</sup> Tradução nossa. A “dobra” é uma catástrofe que pode ocorrer dada uma variável de controle ou parâmetro e uma única variável de resposta. Para mais informações sobre esse conceito, indica-se a seguinte referência: Fiolhais; Golli; Nogueira. Mechanical apparatus for the fold catastrophe demonstration. **European Journal of Physics**, v.42, n.4, p.045001, 2021.

trabalho baseia-se exclusivamente no uso do potencial efetivo para o problema de dois corpos e em conceitos básicos em dinâmica rotacional e análise matemática de funções multivariadas. Embora o método não possa descrever a dinâmica do sistema, ele fornece um teste simples para ver se um sistema de dois corpos pode evoluir para uma configuração estável onde há sincronismo entre rotação e revolução e uma maneira de obter a velocidade angular e o raio da configuração estável. Portanto, para os autores, o método pode então ter um uso didático em uma aula introdutória de mecânica.

- A Dynamical Picture of the Oceanic Tides (2022)

Butikov (2002), realizou um tratamento detalhado das forças geradoras de maré, seguido de uma teoria dinâmica simplificada de ondas de maré. Para esclarecer a física subjacente, usou-se um modelo simples do oceano que consiste em uma concha de água de profundidade uniforme cobrindo completamente o globo. O tratamento é apropriado para estudantes de graduação de faculdades e universidades que estudam geofísica, astronomia introdutória ou física geral. Uma simulação de computador é desenvolvida para auxiliar na compreensão das propriedades das forças geradoras de maré induzidas pelo Sol ou pela Lua e das ondas estacionárias criadas por essas forças no oceano aberto.

#### → *Divulgação científica*

- “Theorica Verdadeira das Marés” (1737): O Primeiro Texto Newtoniano em Português (1987)

Moreira, Nascimento e Oliveira (1987), para comemorarem, à época, os 300 anos da publicação dos Principia de Newton, escreveram esse artigo com o objetivo de analisar em que medida a obra citada influenciou a formação da mentalidade cultural do Brasil do século XVIII a fim de se entender um pouco melhor os fatores que determinaram o atraso científico ou mesmo algumas das dificuldades que são encontradas cotidianamente no ensino, como a resistência à experimentação e concepções livrescas e elitistas do conhecimento. Dessa forma, escolheram o primeiro texto newtoniano em português como ponto de reflexão singular nesta história complexa do embate entre as ideias da ciência moderna e as escolástica-aristotélicas no século XVIII. Vale ressaltar que o texto foi escrito pelo médico português Jacob de

Castro Sarmiento, refugiado em Londres, e publicado em 1737 com o título: “*Theorica Verdadeira das Marés, conforme a philosophia do incomparável cavalheiro Isaac Newton*”, marcando, de certa forma, o início da disseminação da física newtoniana na América portuguesa, incluindo o Brasil. O texto é considerado uma das primeiras contribuições de divulgação científica e tem sido estudada por historiadores da ciência como evidência da presença de uma comunidade científica ativa no Brasil colonial.

- Galileu e a Natureza dos Tupinambás (2009)

Afonso (2009), mostra que os conhecimentos astronômicos empíricos dos indígenas, relativos aos movimentos do Sol, da Lua, da Via-Láctea e de suas constelações, associados à biodiversidade local, suficientes para a sobrevivência em sociedade, são desconhecidos por muitos historiadores da ciência. Escreveu para a *Scientific American Brasil*, apresentando uma parte desses conhecimentos, que conseguiram resgatar, utilizando documentos históricos, que relatam a importância da astronomia no cotidiano das famílias indígenas; vestígios arqueológicos, tais como a arte rupestre e os monumentos rochosos, que possuem conotação astronômica; diálogos informais e observações do céu com pajés de todas as regiões brasileiras; o trabalho serviu para a construção de cursos de Etnociência, que ministraram para professores indígenas.

- New Research Reveals Tidal Forces that Shaped the Moon (2014)

Wendel (2014), escreve sobre pesquisas que revelaram que as forças de marés moldaram a forma da Lua.<sup>41</sup> Uma teoria que explica a forma da Lua é aquela em que aborda a crosta flutuando no topo do manto derretido da jovem Lua, engrossando à medida que a Lua girava. Esta forma foi travada no lugar quando a Lua esfriou. Ao investigar os sinais de gravidade das vastas bacias e crateras da Lua, os pesquisadores descobriram que essa explicação por si só não poderia explicar a forma da Lua. Outro processo - *aquecimento de maré*<sup>42</sup> - também ajudou a moldar a Lua, descobriu a equipe. Uma jovem Lua derretida teria sido esticada pela gravidade da Terra, levando à sua

---

<sup>41</sup> A pesquisa foi publicada na revista *Nature* (doi:10.1038/nature13639).

<sup>42</sup> O aquecimento de maré ocorre através dos processos de fricção das marés: a energia orbital e rotacional é dissipada como calor na superfície do oceano ou o interior de um planeta ou satélite. Vide mais em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_heating)

topografia de grande escala. A pesquisa pode ajudar os cientistas a entender a história evolutiva da Lua, como quando ela esfriou ou quando seu oceano de magma cristalizou.

### Conclusões

A revisão da literatura de educação em ciências revelou que há muitos trabalhos voltados para professores e que não houve muitos estudos que se concentraram na compreensão dos alunos sobre as marés. A tabela 3 seguinte ilustra a quantidade de trabalhos encontrados em cada categoria, no que segue:

Descrição dos trabalhos				
Propostas didáticas testadas em sala de aula		Levantamento de concepções espontâneas dos estudantes	Bibliografias de consulta para professores	
<i>Estratégias para abordar marés no ensino básico</i>	3	9	<i>Textos didáticos</i>	27
<i>Uso de tecnologias de informação e comunicação</i>	3		<i>Novos recursos didáticos</i>	2
<i>Ensino investigativo com enfoque ciência, tecnologia e sociedade</i>	3		<i>Novas propostas e estratégias didáticas</i>	5
			<i>Divulgação científica</i>	3

**Tabela 3:** Quantidade de trabalhos em cada categoria estudada. Fonte: autor, 2023.

No domínio da educação em ciências, alguns pesquisadores investigaram a compreensão dos alunos sobre as marés (Bisard, Arons, Francek & Nelson, 1994; Galili e Lehavi, 2003; Skamp, 1994; Viiri, 2000a, 2004). Entre esses pesquisadores, Viiri (2004) desenvolveu uma unidade de ensino baseada em pesquisas sobre as marés, enquanto os outros estudos principalmente relataram as concepções alternativas de diferentes conceitos de astronomia, incluindo as marés. De acordo com o levantamento bibliográfico realizado na presente dissertação, segue uma lista das principais concepções espontâneas dos estudantes sobre o assunto de marés:

- Outras causas principais apontadas para as marés: força das placas tectônicas, mudanças de temperatura entre dia e noite, rotação da Terra, fenômenos climáticos (chuvas, ventos, ondulações, degelo), magnetismo terrestre, entre

outros (Corrochano et al., 2017; Viiri, 1999, 2000, 2004; Simanek, 2016; de Jesus, 2018) e fatores meteorológicos (ventos, chuvas, nuvens, etc.), fatores geográficos (areia, pedras, etc.), fatores geológicos/planetários (placas tectônicas, rotação da Terra, etc.), ação humana (queimadas, lixo no mar, etc.), agentes teológicos ou religiosos (Poseidon) (Dantas, 2020);

- Maré, nas falas das crianças (EF), podem estar associadas à ideia de mangues ou manguezais (da Silva et al., 2012);
- “Marés” poderiam ocorrer nos líquidos corporais do ser humano (Sawicki 1999; da Silveira, 2003);
- As marés ocorrem duas ou três vezes por dia ou as marés ocorrem em horários fixos ao longo de um dia (de Jesus, 2018);
- Só há uma protuberância de maré alta no lado da Terra mais próximo da Lua (Viiri, 1999, 2000, 2004; da Silveira, 2003; Oh, 2013; Corrochano et al., 2017);
- As maiores marés acontecem na Lua Cheia (Simanek, 2016);
- A luminosidade crescente da Lua deixa o mar mais agitado (Dantas, 2020);
- Algumas pessoas não se consideram o Sol como um agente influenciador nas marés e algumas consideram Sol como um agente que contribui com mais intensidade do que a Lua nas marés (Sawicki, 1999);
- Força centrífuga como causadora parcial das marés (Sawicki, 1999; Griffin, 2008; Simanek, 2016).

É válido ainda acrescentar que sempre que se pedia aos estudantes para representarem um tipo de maré (alta ou baixa) com base no sistema Terra-Lua-Sol, dificilmente se esquematizava adequadamente.

#### 3.4.4 Livros Didáticos dentro do Programa Nacional do Livro Didático

O levantamento dos livros didáticos do PNLD, do EM, dos anos de 2012, 2015, 2018 e 2021 forneceu importantes discussões pedagógicas a respeito de como o assunto marés é abordado por eles.<sup>43</sup> De 2012 a 2018, os livros de física e de geografia foram analisados. De 2021, os livros de Ciências da Natureza e suas Tecnologias (CN) e Ciências Humanas e suas Tecnologias (CH) foram analisados. A base de dados utilizada foi composta pelo *site* do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) (<https://www.fnde.gov.br/index.php/programas/programas-do-livro/pnld/guia-do-pnld>), no Ministério da Educação e o *site* Edocente (<https://www.edocente.com.br/>). Adicionalmente, usou-se alguns livros paradidáticos para pequenas comparações concernentes ao modo de apresentação do assunto marés. Assim, iniciou-se a análise em ordem cronológica. Em cada livro digital, procurou-se pelas seguintes palavras-chave: *marés e forças de maré*. Analisou-se os livros didáticos de física e alguns de geografia do EM. Nos livros de física separados por volumes, examinou-se apenas os de mecânica (geralmente, volume 1), pois, obviamente, marés é um assunto puramente gravitacional. Nos livros de geografia separados por volumes, examinou-se apenas os de geografia física, pois, obviamente, marés é um assunto relacionado à formação de relevos. Muitas obras ficaram de fora dessa análise, pois não foram encontradas facilmente.<sup>44</sup> A tabela 4 a seguir apresenta a quantidade de livros didáticos analisados em cada ano específico, informando a quantidade de livros que citam as marés:

---

<sup>43</sup> Apenas esses anos são referentes aos livros didáticos do EM. Outros anos são referentes a outros programas.

<sup>44</sup> Tentamos encontrá-las disponíveis digitalmente na *internet* e consultar algumas bibliotecas públicas do RJ, mas sem sucesso em ambas as tentativas.

<b>PNLD</b>	<b>Física</b>	<b>Geografia</b>
2012	0	2 analisados ( 2 citam as marés)
2015	6 (2 citam as marés)	1 (não cita as marés)
2018	12 (6 citam as marés)	8 (3 citam as marés)
2021	CN – 42 (10 citam as marés)	CH - 72 (12 citam as marés)

**Tabela 4:** Quantidade de livros didáticos analisados em cada ano. Fonte: autor, 2023.

Portanto, um total de 143 livros didáticos foram estudados. Vale ressaltar que em 2021 os novos livros didáticos já estavam de acordo com a reforma do EM. Por isso, as novas nomenclaturas inseridas na tabela anterior. Optou-se por analisar todos os volumes que compreendiam as obras de CN (para física) e CH (para geografia). Ainda que alguns livros mais antigos (2012 e 2015) não tenham sido analisados pelo motivo supracitado, muitos desses mesmos livros foram facilmente encontrados em edições seguintes (2018) e, muitos autores que participaram de obras em anos anteriores também reaparecerem nas obras mais recentes depois da reforma do EM (2021), portanto, acredita-se genuinamente que isso não afete consideravelmente a qualidade da pesquisa, em termos quantitativos. De um total de 143 livros analisados, apenas 38 citam o fenômeno das marés, mas apenas 4 (aproximadamente 2,8% do espaço amostral) conseguem abarcar as explicações cientificamente relevantes desse fenômeno. Os livros que não citam as marés não serão apresentados aqui nessa dissertação. A seguir, apresenta-se apenas as descrições dos livros que ao menos citam as marés.

## PNLD 2012 EM

### → Geografia

- De Sena; Moreira. Geografia geral e do brasil – espaço geográfico e globalização. **2ª Edição. Editora Scipione**, v.1, 2012, 2013, 2014 (código: 27552COL05)



Há algumas menções ao fenômeno das marés, mas sem explorá-la de forma mais específica. Ainda assim, são correlações relativamente interessantes. Na página 91, há um trecho que discute a crença dos céticos de que a deriva continental era fisicamente impossível, apesar da evidência geológica. Eles contestavam a ideia de que os continentes pudessem se separar e não havia uma força motora plausível proposta. Wegener, que defendia a teoria, acreditava que os continentes flutuavam como barcos sobre a crosta oceânica sólida, impulsionados pelas forças das marés, do Sol e da Lua. A ruptura veio quando os cientistas se deram conta de que a convecção do manto da Terra poderia empurrar e puxar os continentes à parte, formando uma nova crosta oceânica, por meio do processo de expansão do assoalho oceânico. [...] (Press et al, 2006, p.49). Na página 100, há fotografia de um costão rochoso no Guarujá (SP, 2006), sofrendo a ação do intemperismo físico e químico, em que há uma citação às marés na contribuição da contração térmica para o intemperismo físico. A exposição solar aquece as rochas, que se expandem, mas a queda de temperatura causada pela chuva e marés provoca a contração e desagregação mecânica das partículas. Por fim, na página 109, explica-se que as marés contribuem na morfologia litorânea. No litoral, o movimento constante da água do mar age construtiva e destrutivamente nas formas do relevo, atuando no intemperismo, transporte e sedimentação de partículas orgânicas e minerais. Conseqüentemente, a dinâmica das correntes marinhas, das ondas e das marés é responsável pela formação de praias, mangues e restingas (cordões arenosos).

- Vesentini. Geografia: o mundo em transição. 2ª edição. São Paulo: Ática, v.1, 2012, 2013, 2014 (código: 25082COL05)

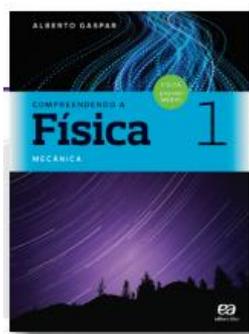


Na página 86 há uma breve citação às marés na geração de energia elétricas. Aprofunda-se essa discussão a partir da página 97. Na página 187, o autor cita o fenômeno como um evento constituinte dinâmico da Terra.

## PNLD 2015 EM

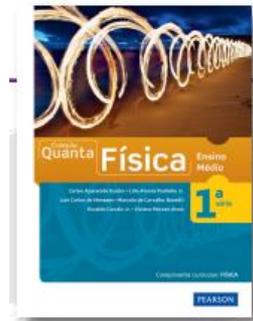
→ Física

- Gaspar. Compreendendo a física. 2ª Edição. São Paulo: Ática, v.1, 2013. (código: 27516COL22)



Só há quatro menções ao fenômeno, duas no contexto da importância da lei da gravitação universal e as outras duas no contexto da geração de energia em usinas maremotriz. No entanto, não uma exploração maior sobre as marés no capítulo de gravitação universal.

- Kantor; Paoliello Jr.; De Menezes; Bonetti; Canato Jr.; Alves. Quanta Física. 2ª edição. Editora Pearson, v.1, 2013. (código: 27617COL22)



Esse livro organiza os capítulos dentro de unidades com nomenclaturas abrangentes. Por exemplo, a Unidade 2 chama-se “Transportes, esportes e outros movimentos”, constituída por três capítulos, no que segue: capítulo 1 – Abrindo o jogo (apresentação de diversos exemplos com movimentos, velocidade e forças), capítulo 2 – As regras do Jogo (explora as leis do movimento translacional e rotacional; quantidade de movimento e sua conservação) e capítulo 3 – Usando as regras nos esportes e transportes (trabalha os conceitos de forças de atrito, máquinas simples, hidrostática e energia). Encontra-se uma breve menção às marés no capítulo 12, página 211:

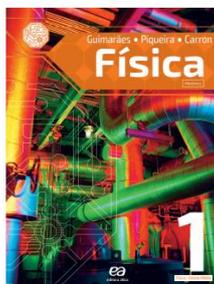
“A causa das marés está principalmente relacionada à posição da Lua em relação à superfície da Terra e da gravitação lunar que promove um acúmulo regional de água nos mares. Mudando, periodicamente, a posição da Lua em relação à da Terra, muda a configuração e a ação da gravidade terrestre, o que faz ‘escorrer’ a água acumulada, na forma de ondas, cujas bordas espumantes percebemos nas praias.” (Ibid., p.211).

Encontra-se apenas essa explicação, sem ilustrações, sem referências, sem menções ao campo gravitacional não uniforme, sem menção ao sistema Terra-Lua-Sol.

## PNLD 2018 EM

### → Física

- Guimarães; Piqueira; Carron. Física – Mecânica. **2ª Edição. São Paulo: Ática,** v.1, 2016 (código: 0021P18133)



A única alusão às marés é encontrada na página 367, onde se apresenta uma tabela que faz a correspondência entre as fontes de energia com sua origem e transformações de energia envolvidas. É posto que as fontes de energia através das marés têm origem principalmente ao efeito gravitacional lunar.

- Gaspar. Compreendendo a Física – Mecânica. **3ª Edição. São Paulo: Ática,** v.1, 2016 (código: 0021P18133)

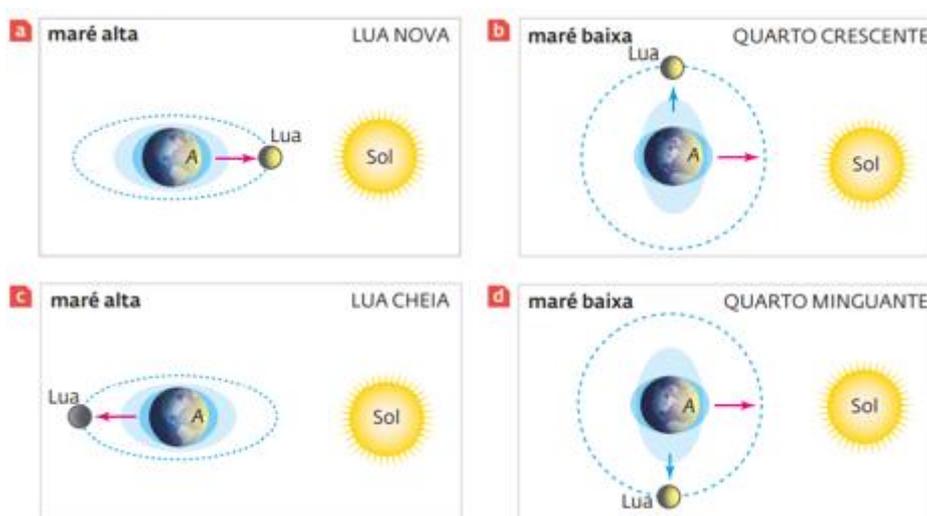


Breves citações sobre o fenômeno sem muita explicação, tampouco aprofundamento. Na página 17, o autor menciona o fenômeno que pode ser explicado pela gravitação, mas não desenvolve o assunto. Na página 18, há uma pequena citação sobre marés nas usinas de energia. Na página 226, é cobrado um exercício de vestibular sobre o assunto.

- Máximo; Alvarenga; Guimarães. Física – Contexto e Aplicações. 2ª Edição. São Paulo: Editora Scipione, v.1, 2016 (código: 0045P1813)



Na página 165, encontramos uma breve apresentação sobre a ocorrência das marés. Não cita diretamente o campo gravitacional não uniforme como causa do fenômeno. Já apresenta o fenômeno diretamente com as composições solares e lunares de maré, ilustrando a clássica figura (figura 9) do alinhamento dos astros.



**Figura 9.** Influência das forças de atração gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra, responsáveis pelo fenômeno das marés. Fonte: Máximo; Alvarenga; Guimarães. Física – Contexto e Aplicações. 2ª Edição. São Paulo: Editora Scipione, v.1, 2016, p.165.

Aborda a periodicidade das marés e exemplifica com a subida das águas na areia da praia. Apesar de os autores não destacarem a causa pelo campo gravitacional não uniforme, eles atraem a atenção do leitor com informações extras e interessantes sobre as marés atmosféricas e terrestres na página 166. Por exemplo, cita o acoplamento de maré na Lua e o limite de Roche. Mas poderia ter relacionado o gradiente gravitacional como causador principal das marés, ainda mais quando, na página 168, encontra-se o seguinte questionamento:

“Algumas pessoas argumentam que a Lua influencia diversos aspectos de nossa vida, como o ritmo de crescimento do cabelo. Elas argumentam que, como a Lua influencia o movimento das marés, e como o corpo humano é constituído principalmente por água, seria natural que a Lua também influenciasse nosso corpo. Discuta se os mesmos efeitos que influenciam o movimento das marés poderiam influenciar o ritmo de crescimento do cabelo.” (ibid., p.168).

E cuja resposta dada pelo manual do professor é:

“Não influenciariam porque o raio do corpo humano é muito pequeno para se observar uma influência significativa por parte da Lua.” (ibid., p.168).

Como visto, mais uma vez, nenhuma menção honrosa ao campo gravitacional não uniforme. No entanto, na página 349, os autores sugerem como leitura justamente o artigo que soube aproveitar essa motivação da crença mítica citada para apresentar o conceito de gradiente. O artigo *Marés, fases principais da Lua e bebês* (da Silveira, 2003). Uma boa postura, ainda que pudesse apresentar qualitativamente um pouco a questão do gradiente, reservando a parte quantitativa para esse artigo.

Por fim, encontramos na página 346, o seguinte trecho:

“Demos especial atenção ao estudo dos fenômenos das marés oceânicas, pois acreditamos se tratar de um efeito conhecido dos brasileiros, mesmo daqueles que não vivem nos litorais. Analisamos outros exemplos em que atuam forças de maré, explicando inclusive por que a face da lua voltada para a Terra, é sempre a mesma, e por que os dias aqui na Terra estão ficando ligeiramente mais longos no decorrer dos séculos. Como o aluno não conhece a extensão da ideia da quantidade de movimento na rotação, chamada de momento angular, não foi possível comentar que o aumento da duração dos dias é acompanhado pelo afastamento da Lua.” (ibid., p.346).

De fato, não devemos desmerecer o que foi descrito de maneira rigorosa. Só ressaltamos que dentre os principais pré-requisitos listados no presente trabalho, o campo gravitacional não uniforme não explorado.

- Marques Válio et. al. Ser protagonista – Física. 3ª Edição. Editora SM, v.1, 2016 (código: 0071P18133)



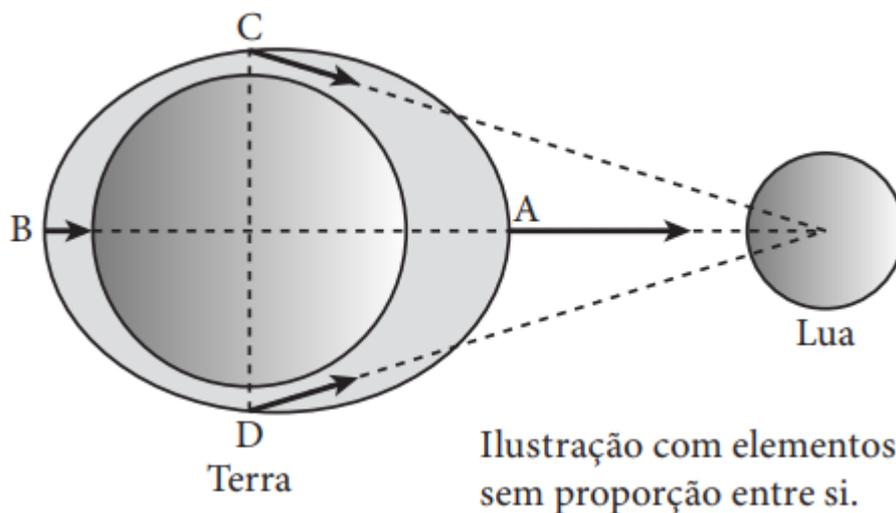
Menciona brevemente as marés, em apenas um parágrafo, na página 210, quando se dedica um espaço para explorar a ideia da existência da Lua e sua influência sobre a Terra.

“[...] Sem a Lua, o ciclo das marés também seria diferente. Ainda existiria a alternância entre marés alta e baixa (as marés também são provocadas pela ação gravitacional do Sol), só que em menor intensidade – 70% menor. Com menores forças de maré, também seria menor a faixa de areia que é periodicamente coberta pela água do mar, durante a maré alta, e depois exposta ao Sol durante a maré baixa. Acontece que essa faixa de areia é habitada por uma grande diversidade de seres, importantes não somente para a vida marinha, mas também para diversas espécies de aves migratórias, que deles se alimentam.” (Ibid., p.210).

- Helou; Gualter; Newton. Física – Mecânica. 3ª Edição. São Paulo: Editora Saraiva, v.1, 2016 (código: 0101P18133)



Na página 148 há uma pequena citação sobre marés sem desenvolver o assunto. Na página 163, o autor pede para que o aluno explique o fenômeno das marés mediante a presença dos astros celestes. Na página 353, encontra-se uma explicação mais aprofundada para a formação das marés acompanhada de uma figura (figura 10), no que segue:



**Figura 10.** Formação das marés. Fonte: HELOU; GUALTER; NEWTON. Física – Mecânica. 3ª Edição. São Paulo: Editora Saraiva, v.1, 2016, p.354

O autor descreve o seguinte nessa parte:

“É importante destacar que, embora a atração gravitacional exercida pela Lua colabore para “esvaziar a maré” na região do ponto B, nessa região também se verifica maré alta”. (Ibid., p.353).

Chamamos atenção apenas para o fato de que é importante ter em mente que essa imagem estática não representa a realidade do fenômeno em si. É como se os autores estivessem explicando em partes a formação das marés. Se interpretar literalmente o termo “esvaziamento de maré” no ponto B, pode induzir ao erro de que a maré no lado diametralmente oposto à Lua será de menor intensidade, dificultando ainda mais a desmistificação de que há dois bojos de maré.

Por outro lado, em uma passagem logo a frente, o autor descreve de forma satisfatória sobre o gradiente de aceleração da gravidade solar, comparando-a com o lunar.

“A intensidade da influência gravitacional do Sol é muito menor que a da Lua. A diferença entre os módulos das forças gravitacionais solares exercidas nas regiões dos pontos A e B, porém, é cerca de 2,5 vezes menor que a diferença entre os módulos das forças gravitacionais lunares exercidas nessas mesmas regiões. Por isso, a relevância do Sol no fenômeno das marés é bem menor que a da Lua. A justificativa para esse fato é que a distância entre o Sol e a Terra – cerca de 150 milhões de quilômetros – é muito maior que o

diâmetro terrestre – aproximadamente 12 800 km –, o que torna o gradiente de aceleração da gravidade solar muito pequeno através do planeta.” (Ibid., p.354 – **grifo nosso**).

No entanto, os autores atribuem à força “centrífuga” a causa parcial das marés:

“É comum dizer que a Lua gira em torno da Terra. O que ocorre, na verdade, é que os dois astros descrevem movimentos circulares em torno do centro de massa do sistema, sendo mantidos em suas respectivas órbitas pelas forças de atração gravitacional. Devido a esse movimento, a água sobre a Terra fica sujeita a um esforço centrífugo no sentido de arremessar a massa líquida para fora da trajetória. Esse fato também colabora para a ocorrência das marés.” (Ibid., p.354 - **grifo nosso**).

Não há contribuição alguma de uma força inercial centrífuga para a causa das marés, como já relatado pela literatura. O que acontece é que cada ponto da Terra, tomada como um referencial não inercial, está submetido a uma força gravitacional e uma força inercial, cuja resultante vetorial dá a força de maré (da Silveira, 2003, p.8-9). Contudo, eles continuam:

“Na figura fora de escala a seguir, estão representadas a Terra e a Lua em seu movimento de translação em torno do centro de massa (CM) do sistema. Estão indicadas também as setas correspondentes às forças centrífugas que solicitam a água. É importante notar que essas forças são de inércia e definidas apenas em relação a referenciais acelerados ligados à Terra.” (Ibid., p.354 - **grifo nosso**).

A imagem (figura 11) que acompanha a descrição anterior é a seguinte:

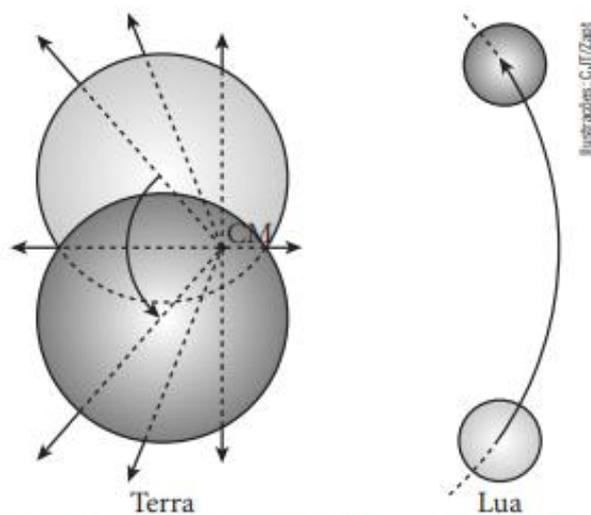


Ilustração com elementos sem proporção entre si.

**Figura 11.** Forças relacionadas à formação das marés. Fonte: HELOU; GUALTER; NEWTON. Física – Mecânica. 3ª Edição. São Paulo: Editora Saraiva, v.1, 2016, p.354

Os autores, por fim, complementam:

“Depreende-se facilmente do texto que as marés mais altas ocorrem na fase de lua nova, quando a Lua e o Sol colocam-se de um mesmo lado em relação à Terra. Com essa configuração, exerce-se sobre o planeta a máxima influência gravitacional conjunta desses astros.” (Ibid., p.354 - **grifo nosso**).

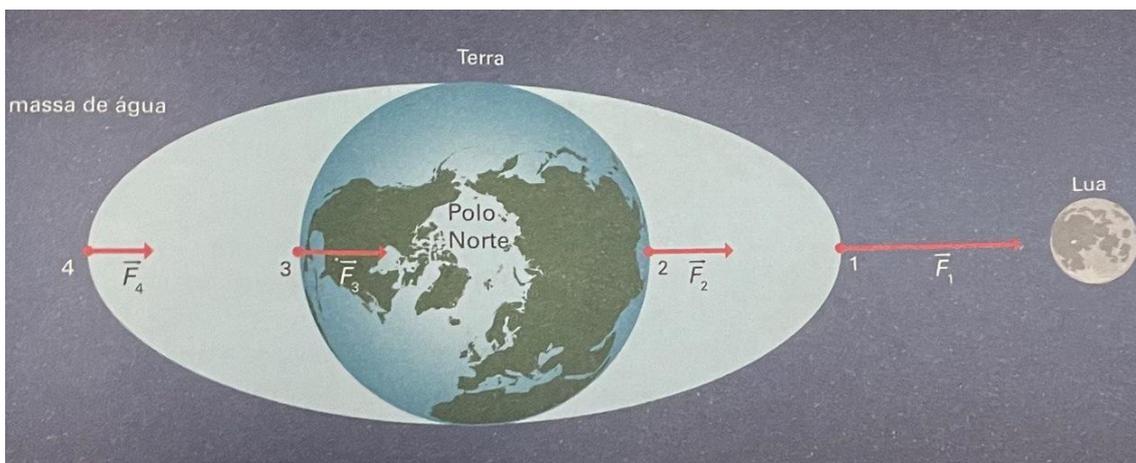
Os autores não apresentam o esquema clássico do alinhamento Terra-Lua-Sol, evidenciando as marés de sizígia e as marés de quadratura. Na página 181, há uma citação do fenômeno no contexto de usinas geradoras de energia. Na página 348, o autor evidencia no gabarito da questão 3 da página 142 que as marés são responsáveis, em parte, pela deformação da Terra, tornando esta geodésica.<sup>45</sup> Curiosamente, nas páginas 143 e 144 encontra-se uma leitura sobre a vivência de astronautas em ambiente de microgravidade. Só que não há menção aos efeitos de maré nessa situação. Poderiam ter se utilizado nas informações disponíveis no CREF.

<sup>45</sup> De fato, a parte sólida da Terra sofre deformações por forças de maré (marés terrestres). As marés terrestres são um fenômeno bastante sutil e, por isso, passam despercebidas para a maioria das pessoas. No entanto, elas têm um papel importante na dinâmica do nosso planeta. As variações na forma da Terra causadas pelas marés terrestres podem afetar a atividade sísmica e vulcânica e o movimento das placas tectônicas.

- Pietrocola; Pogibin; de Andrade; Romero. Física em Contextos. **1ª Edição. Editora do Brasil**, v.1, 2016 (código: 0167P18133)



O capítulo 9 é inteiramente dedicado à história da astronomia, sendo um dos livros com maiores aprofundamentos histórico e filosófico dentre os selecionados e analisados nessa dissertação. Já no capítulo 10, nas páginas 266 e 267 há uma leitura sobre marés, resumida, mas bem explicada. Há imagens consideravelmente satisfatórias (figura 12) para explicar as marés em uma abordagem simples e qualitativa.



**Figura 12.** Formação de marés. Pietrocola; Pogibin; de Andrade; Romero. Física em Contextos. **1ª Edição. Editora do Brasil**, v.1, 2016, p.267.

Acompanhado dessa imagem vem a seguinte explanação:

“A atração da Lua faz com que a massa de água sobre a Terra se alongue em sua direção. Isso, apesar de não intuitivo, gera duas marés altas em porções opostas do globo. Como a atração gravitacional é proporcional ao inverso do quadrado da distância, os pontos da Terra mais próximos da Lua sofrem maior atração do que os mais distantes. Assim, a força sobre a superfície da água no ponto 1 é mais forte que a força atrativa sobre a superfície do planeta no ponto 2. Essa diferença de forças e o fato de a água ser um fluido justificam a existência dessa protuberância na face voltada para a Lua. Do outro lado, temos que a força atrativa sobre o ponto 3 é maior do que

no ponto 4. Sendo a superfície da água menos atraída do que a superfície terrestre, também ocorre a formação de uma protuberância desse lado.” (Ibid., p.267).

Por fim, há ainda uma imagem esquematizando a composição das marés lunares e solares, explicando as marés de sizígia e marés de quadratura.

→ *Geografia*

- Marina; Tércio. Fronteiras da Globalização – o mundo natural e o espaço humanizado. 3ª Edição. São Paulo: Ática, v.1, 2016 (código: 0026P18053)



Não há uma exploração significativa do fenômeno das marés, ou seja, não há um tratamento detalhado sobre a causa, a periodicidade, as composições solares e lunares, etc. Há apenas breves citações, no que segue:

“Na maioria das vezes, na maré baixa, formam “piscinas naturais” muito apreciadas por turistas brasileiros e de outras partes do mundo. Veja a foto abaixo.” (Ibid., p.102).

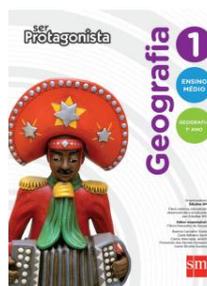
Essa passagem se encontra na página 102, no contexto de erosão marinha. Uma pequena descrição sobre as marés foi desperdiçada, pois o capítulo 8 desta obra trata dos agentes formadores e modeladores do relevo terrestre. E aqui, tem-se uma ótima oportunidade de abordagem geográfica do fenômeno que poderia complementar sua abordagem física. O estudante provavelmente se beneficiaria dessa interdisciplinaridade.

- Moreira; de Sene. Geografia Geral e do Brasil – espaço geográfico e globalização. **3ª Edição. São Paulo: Editora Scipione**, v.1, 2016 (código: 0046P18053)



Assim como na sua versão anterior, na página 114, apresenta um fato histórico interessante sobre Wegener ter cogitado que as forças de marés eram os fatores causadoras da movimentação das placas continentais. Na página 139, há mais uma descrição da importância das marés na formação de restingas.

- Baldraia; Vieira; Santi; Jardim; Sampaio; de Souza; Sucena. Ser protagonista – Geografia. **3ª Edição. SM**, v.1, 2016 (código: 0075P18053)



Não há uma exploração significativa do fenômeno das marés, ou seja, não há um tratamento detalhado sobre a causa, a periodicidade, as composições solares e lunares, etc. Contudo, na página 113, o fenômeno é mencionado no contexto de hidrografias brasileiras. Na página 122, descreve-o de forma simples (movimento oscilatório das águas) e relaciona o fenômeno com a latitude.

## PNLD 2021 EM

O levantamento bibliográfico desses livros, em especial, foi baseado nos livros aprovados pelo PNLD 2021 EM ([https://pnld.nees.ufal.br/pnld\\_2021\\_formacao\\_continuada/inicio](https://pnld.nees.ufal.br/pnld_2021_formacao_continuada/inicio)). No Guia desse documento de 2021 (Ministério da Educação, Guia Digital PNLD 2021: obras didáticas por área de conhecimento e específicas [Ministério da Educação, Brasília, 2021]) estão as resenhas com a visão geral da obra, descrição da obra, análise e aspectos alusivos ou que pode acontecer em sala de aula, e a avaliação do Manual do Professor. Decidiu-se analisar todos os volumes devido ao fator de interdisciplinaridade, isto é, considerou-se que possivelmente haveria menções ao fenômeno das marés em diversos contextos. Essa intuição se mostrou correta, pois mesmo que tenham sido encontradas poucas menções, pelo menos elas existem.

### → *Ciências da natureza*

- Lopes; Rosso. Ciências da Natureza. **Editora Moderna**. 2020

### Evolução e universo



Há apenas uma menção ao fenômeno, na página 42, descrevendo o limite de Roche (sem citar tal nomenclatura), no que segue:

“No caso da lua Europa, o satélite todo é recoberto por uma espessa camada de gelo. Água líquida em grandes quantidades, formando um enorme oceano sob o gelo, foi detectada. Nesse caso, a água se mantém líquida, mesmo com a luz solar escassa nessa região do Sistema Solar, graças à interação gravitacional entre Júpiter e Europa. Essa interação causa um efeito semelhante à interação entre Terra e Lua, que dá origem às marés na Terra. Só que, no caso daqueles, a interação promove forças de maré muito maiores e intensas, deformando as próprias rochas e o núcleo, com liberação de calor no interior do satélite Europa.” (Ibid., p.42).

## Água, Agricultura e Uso da terra



Na página LXIX há uma sugestão de atividade em sala de aula. Na página LXXV há uma sugestão de vídeo com modelo de representação da ação das forças gravitacionais da Lua e do Sol na formação das marés.<sup>46</sup> O problema é que há um erro conceitual em aproximadamente 0:58, quando o narrador alega que a força centrípeta é a causadora da formação do bojo de maré alta do lado da Terra oposto à Lua.

Na página 25 há uma explicação resumida do fenômeno:

“As marés expressam-se pelas alterações cíclicas no nível da água, que são resultantes da influência conjunta da rotação da Terra e da atração gravitacional do Sol e da Lua.” (Ibid., p.25 - **grifo nosso**).

Há de se ter cuidado na leitura desse trecho, pois a causa primária das marés é o gradiente gravitacional. A rotação da Terra dita o ritmo das marés, não influenciando no surgimento das marés como o trecho transcrito dá a entender.

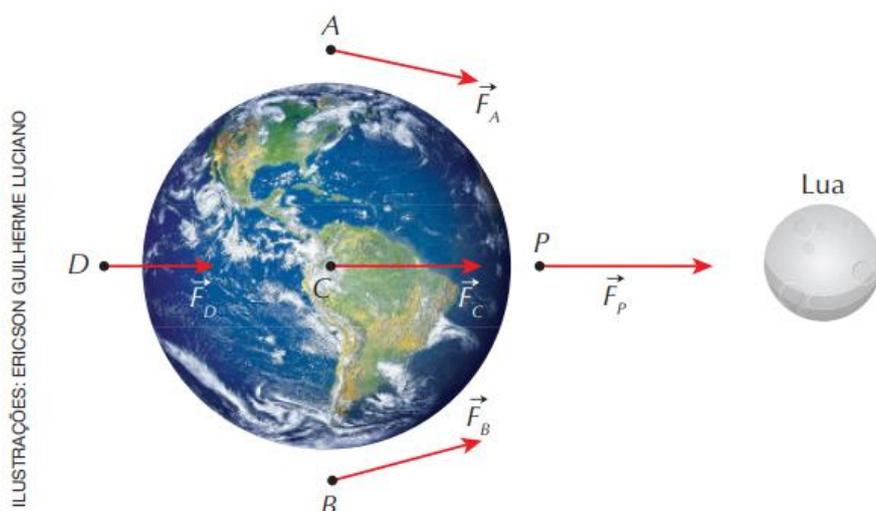
Em seguida, comenta sobre a periodicidade das marés oceânicas e sobre as composições solares e lunares. Nas páginas 141 e 142, dedica-se um pouco mais de explicações para as marés. No entanto, a explicação da causa das marés não foi adequadamente explorada, como se percebe a seguir:

“Observando a Figura 6.16, notamos que a intensidade da força gravitacional lunar é maior no ponto P, já que esse ponto está mais próximo da Lua, seguido pela força no ponto C, que é o centro da Terra, e pela força no ponto D. Isso faz com que a água, considerada um “corpo flexível”, deforme-se e ocorram marés altas nos pontos P e D e marés baixas nos pontos A e B (Ibid., p. 141-142, Fig. 6.17).”

---

<sup>46</sup> Quadros; Monteiro; Almeida. Como funciona a influência da Lua nas marés, 2017. (2 min). Nexojornal. Disponível em: <https://www.nexojornal.com.br/video/video/Como-funciona-a-influ%C3%A2ncia-da-Lua-nas-mar%C3%AAs>. Acesso em: 30 abr. 2020.

As figuras mencionadas no trecho relatado são as seguintes (figuras 13 e 14):



**Figura 13.** Formação das marés. Fonte: Lopes; Rosso. Ciências da Natureza. Editora Moderna. 2020, p.141.

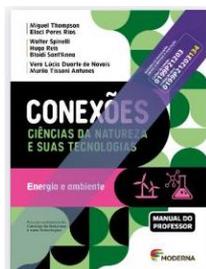


**Figura 14.** Marés. Fonte: Lopes; Rosso. Ciências da Natureza. Editora Moderna. 2020, p.142.

“Não é fácil notar” que há uma maré alta sendo formada no ponto D apenas com essa simples explicação e figura. Em rigor, pode gerar mais dúvida do que certeza.

- Antunes et al. Conexões – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **Editora Moderna**, 2020

### Energia e ambiente



Há pequenas menções ao fenômeno dentro do contexto de usinas maremotriz e no contexto de manguezais. Este último caso, como se pode ver a seguir:

“O solo lodoso dos manguezais é composto de material mineral e grande quantidade de matéria orgânica trazida pelas marés e pelos rios. São ambientes com enorme diversidade biológica e servem de berçário para muitas espécies. A fauna é constituída principalmente de peixes, moluscos, crustáceos e aves.

Os manguezais também são fonte de subsistência para populações litorâneas que têm na pesca artesanal sua fonte de renda e de alimento. Protegem a região costeira contra a erosão de ventos e marés.” (Ibid., p.78).

Na página 99 há uma explicação sobre o aproveitamento das marés para geração de energia elétrica em usinas maremotrizes.

### Terra e equilíbrios

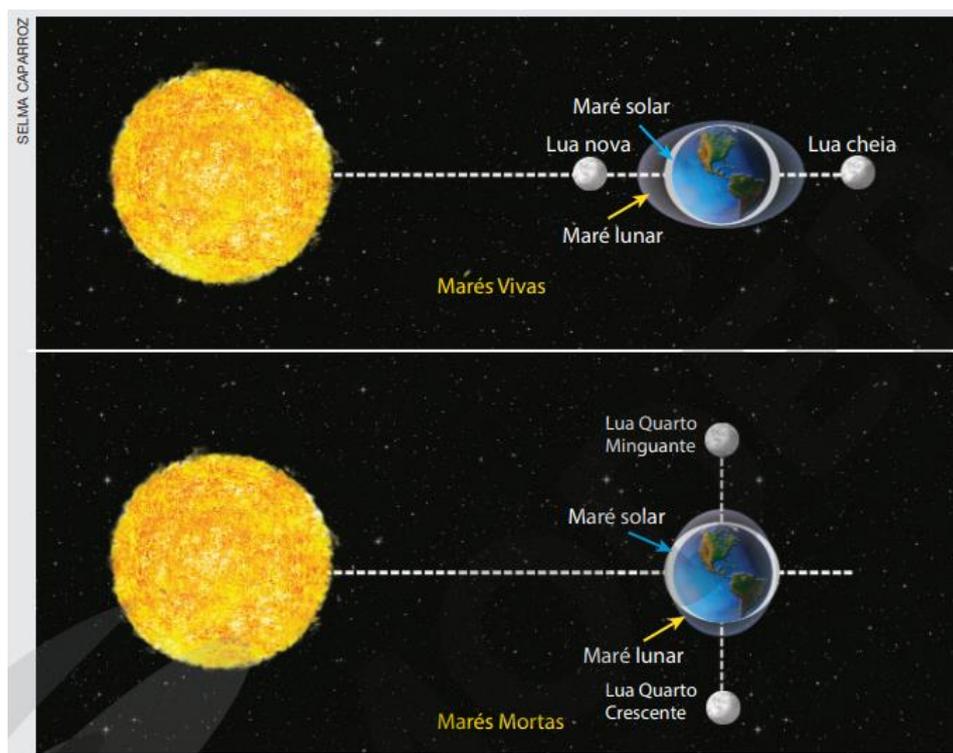


Nas páginas LV, LVI, LIX, há uma justificativa para auxiliar o professor a lecionar o conteúdo de movimento circular e gravitação universal disposto nesse livro. Ainda na página LX recomenda-se como bibliografia complementar a gradíssima obra Diálogos. O interessante desse livro é que, no capítulo 3, um de seus subtítulos

(Interligações – A Lua e as marés) já faz uma conexão direta com o fenômeno das marés (coisa difícil de se encontrar nos livros). É nesse subtítulo que se encontra uma passagem interessante sobre o porquê de o Sol exercer menor influência nas marés oceânicas do que a Lua:

“[...] De fato, apesar de a massa do Sol ser quase 30 milhões de vezes maior do que a da Lua, o satélite está 250 mil vezes mais perto da Terra do que está o Sol. Como a força de atração depende do quadrado da distância, 250 mil ao quadrado bate na casa dos trilhões. Logo, a responsabilidade pelas marés é muito mais da Lua do que do Sol.” (Ibid., p.83).

Os números estimados na descrição supracitada ajuda fortemente na compreensão desse fenômeno. Em seguida, são fornecidas imagens (figuras 15 e 16) bem ilustrativas sobre as marés de sizígia e de quadratura:



**Figura 15.** Marés de sizígia e quadratura. Fonte: Antunes et al. Conexões – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Editora Moderna, 2020, p.83.

Para reforçar a teoria de que o período entre uma maré alta e outra consecutiva não é igual ao período de rotação da Terra, apresenta-se uma evidência empírica, as tábuas de maré:

Quarta – 17/6			Quinta – 18/6			Sexta – 19/6		
Hora		Altura	Hora		Altura	Hora		Altura
02:20	↑	1,78 m	03:00	↑	1,86 m	03:37	↑	1,93 m
08:27	↓	0,45 m	09:06	↓	0,36 m	09:44	↓	0,29 m
14:47	↑	1,98 m	15:25	↑	2,06 m	16:02	↑	2,13 m
21:00	↓	1,49 m	21:37	↓	0,41 m	22:15	↓	0,35 m

**Figura 16.** Tábuas de marés. Fonte: Antunes et al. Conexões – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **Editora Moderna**, 2020, p.83.

Conforme indicado por essa tabela (<https://www.climatempo.com.br/tabua-de-mares>) e como a Lua gira em torno da Terra com um período aproximado de 28 dias, a diferença entre duas marés altas consecutivas é um pouco maior.

- Dos Santos Ferraro et al. Diálogo – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **Editora Moderna**, 2020

#### O universo da ciência e a ciência do universo



Na página LXXXI há uma sugestão de se aproveitar o tema em uma aula de gravitação. Na página 112, há um exercício “provocativo” sobre a questão de a Lua exercer maior influência nas marés do que o Sol.

- Munford et al. Matéria, Energia e Vida: Uma Abordagem Interdisciplinar. **Editora Scipione**, 2020

Em nenhum dos livros desses autores foi encontrado uma citação às marés.

- Amabis et al. Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **Editora Moderna**, 2020

### Universo e evolução



Na página LIII, há uma recomendação de leitura adicional e um lembrete ao professor para reforçar com os estudantes que a força de atração que a Lua exerce sobre a Terra é responsável pelas marés. Não há explicação do fenômeno das marés ou alguma correlação deste com outro fenômeno natural.

- De Melo et al. Multiversos – Ciências da Natureza. **FTD**, 2020 (código: 0221P21203)

### Eletricidade na sociedade e na vida



Na página 32, há uma breve citação ao fenômeno para falar da geração de energia oceânica. Não há explicação do fenômeno das marés ou alguma correlação deste com outro fenômeno natural.

### Origens



No capítulo da lei da gravitação universal, há um subtítulo denominado “*Efeito da gravidade na formação das marés*”. A página 68 dedica-se, pois, a tratar,

resumidamente, dos seguintes temas: causa das marés, periodicidade das marés e influência do Sol e da Lua nas marés. Na página 209, há algumas sugestões de atividades para os professores, uma delas envolvendo a pesquisa das tábuas de marés.

- Aoki et al. Ser Protagonista - Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **SM**, 2020

### Energia e transformações



Na página 79, há uma breve citação ao fenômeno para abordar a geração de energia elétrica em usinas. Não há explicação do fenômeno das marés ou alguma correlação deste com outro fenômeno natural.

### Evolução, tempo e espaço



Na página 54, há uma leitura adicional bem interessante sobre a influência da Lua sobre a Terra (<https://www.zenite.nu/a-terra-sem-a-lua/>). Na página 90, há o seguinte relato interessante sobre registros de que os Tupinambás conheciam os efeitos lunares sobre as marés antes dos europeus:

“Existem registros de que os Tupinambá já conheciam os efeitos das fases da lua sobre as marés muito antes dos europeus, que só descobriram esse fato com as contribuições do físico Isaac Newton em 1687. Povos indígenas sabem que tipo de peixe é mais abundante, seja no rio, seja no mar, em determinada fase da lua de certa época do ano.” (Ibid., p.90).

Por fim, o livro traz alguns exercícios de fixação sobre o fenômeno para arrematar as discussões supracitadas.

### Ambiente e ser humano



Na página 126, há uma explicação da influência das marés nos estuários, no que segue:

“Nos estuários, a salinidade está sujeita às marés: a água do mar avança rio acima na maré alta, e o rio avança mar adentro na maré baixa. A produtividade é elevada: a água rasa, relativamente quente e com nutrientes carregados das regiões mais altas, favorece a atividade fotossintetizante. Os organismos estuarinos são adaptados para sobreviver às variações de salinidade e de alternância de períodos de exposição à atmosfera com períodos de submersão.” (Ibid., p.126).

Adicionalmente, na página 243, encontra-se outra leitura interessante sobre os estuários e caranguejos:

“As informações levantadas pelos pesquisadores com catadores do estuário do rio Mamanguape, 70 quilômetros ao norte da capital da Paraíba, revelaram um conhecimento sobre a influência das marés e da Lua na ecologia do caranguejo que até então não fora publicado na literatura científica. Essa sabedoria é passada de uma geração para outra, portanto patrimônio dos catadores tradicionais. [...]” (Ibid., p.243).

Por fim, o livro traz alguns exercícios de fixação sobre o fenômeno para arrematar as discussões supracitadas.

→ *Ciências Humanas e suas Tecnologias*

- Cotrim et al. *Conexões – Ciências humanas e sociais aplicadas*. **1ª Edição**. Editora Moderna, 2020

### Sociedade e meio ambiente



Na página XLIV, há uma breve citação do fenômeno como amplificador da elevação do nível dos oceanos (Diamond, 2019). Outra breve citação ao fenômeno na página 52 como fator disseminador de óleo derramado sobre os oceanos por navios petroleiros.

- Amorim; Machado. *Contexto e ação*. **1ª Edição**. Editora Scipione, 2020

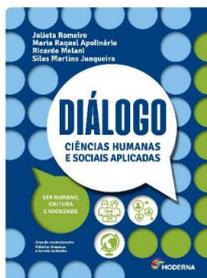
### Sociedade e natureza



Na página 100, há uma breve citação às marés como evento que afeta a embocadura larga de um rio (estuário). Na página 149, há um gráfico em “rosca” com as porcentagens da produção mundial de eletricidade por fonte de 2017, em que maremotriz aparece com 6,6%, juntamente com solar, eólica e geotérmica.

- Romeiro et al. *Diálogo – Ciências humanas e sociais aplicadas*. 1ª Edição. Editora Moderna, 2020.

### Ser humano, cultura e sociedade



Na página LVI, apresenta o fato histórico sobre Wegener ter cogitado que as forças de marés eram os fatores causadoras da movimentação das placas continentais. Esse episódio histórico é complementado por outro texto na página 23 (Lavina. Alfred Wegener e a revolução copernicana da geologia. *Revista Brasileira de Geociências*, v.40 (2), 2010. Disponível em <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7757/7184>>. Acesso em 2 abr. 2020.). Na página 18, descreve que as marés, assim como as chuvas, os ventos e os rios, são agentes externos que atuam nas formas de relevo do nosso planeta.

### Trabalho, tecnologia e natureza



Na página 75, o fenômeno é citado no contexto de novas fontes energéticas que foram descobertas e incorporadas ao processo produtivo, como a das marés e a fotovoltaica. Na página 98, um breve texto sobre o motivo pelo qual se explica porque quanto menos os povos dependem da tecnologia para levar adiante suas atividades produtivas, mais o tempo social é regulado pelos fenômenos da natureza – as estações, as marés, a noite e dia, o clima (Quintaneiro et al. *Um toque de clássicos*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017. p.12).

- Vincentino et al. Diálogos em ciências humanas. **1ª Edição. Editora Ática, 2020.**

Em nenhum dos livros desses autores foi encontrado uma citação às marés.

- Vainfas et al. Humanitas.doc. **1ª Edição. Editora Saraiva, 2020.**

### Indivíduo, sociedade e natureza



Na página 99, há uma imagem de um equipamento de geração de energia elétrica a partir do movimento das marés.

### Política e mundo do trabalho



Na página 80, há um pequeno parágrafo relatando que movimentos em defesa do meio ambiente lutam para que as sociedades abandonem o uso de combustíveis fósseis e governos e empresas invistam em fontes de energia renovável: solar, eólica, geotérmica e das marés.

### Territórios, territorialidades e fronteiras



Na página 106, aparece um texto muito semelhante ao do volume Política e mundo do trabalho, em que os movimentos de defesa do meio ambiente, em escala transnacional, procuram convencer governos a abandonar o petróleo, o carvão e o gás, e a adotar fontes renováveis de energia, entre elas a solar, a geotérmica, a eólica e a das marés.

- Karnal et al. Identidade em ação – Ciências humanas e sociais aplicadas. 1ª Edição. Editora Moderna, 2020.

### Trabalho e tecnologia



Na página 42, há uma breve citação às marés para definir Camboa, que seria uma vala ou pequeno lago artificial construído à beira-mar, que se enche na maré-cheia facilitando a coleta de peixes. Na página 51, cita o evento novamente, mas para lembrar que antes da Revolução Industrial, o tempo era medido em razão dos ritmos da natureza, como a alternância entre dia e noite, as estações do ano, os fluxos das marés e as fases da Lua.

### Transformações da natureza e impactos socioambientais



Na página 91, o fenômeno é citado no contexto das fontes de energia renováveis, solar, eólica, hidrelétrica, maremotriz, de biomassa (biocombustíveis) e geotérmica, as quais se tornaram alternativas viáveis cada vez mais incentivadas em um cenário de crise ambiental e metas internacionais de redução de emissões de dióxido de carbono.

- Braick et al. Ciências humanas e sociais aplicadas. 1ª Edição. Editora Moderna, 2020.

### Natureza em transformação



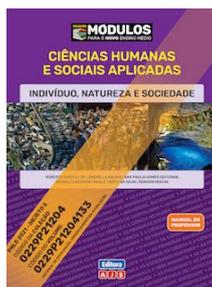
Na página 112, apresenta-se um gráfico com a oferta de energia por fonte entre 1971 e 2017, onde maremotriz aparece crescendo ao longo do tempo, juntamente com geotérmica, solar e eólica. Na página 117 explica-se um pouco mais sobre energias renováveis.

- Júnior Boulos et al. Multiversos – Ciências humanas. 1ª Edição. FTD, 2020.

Em nenhum dos livros desses autores foi encontrado uma citação às marés.

- Junior Catelli et al. Módulos para o Ensino médio – Ciências humanas e sociais aplicadas. 1ª Edição. Editora AJS, 2020.

### Indivíduo, natureza e sociedade



Na página 136, há um texto que trata da importância de considerar o planeta Terra como um sistema interdependente para entendermos os impactos ambientais causados pela ação humana. Para compreender uma paisagem, é necessário levar em conta as conexões entre a natureza, a ação das sociedades humanas e a esfera cósmica. As conexões variam de acordo com as diferentes interações desses elementos. Exemplos de fenômenos naturais que afetam o planeta incluem terremotos, erupções vulcânicas, erosão e oscilação das marés. O texto finaliza explicando que a oscilação das marés é a

consequência da interação entre elementos da esfera cósmica, especialmente as forças gravitacionais exercidas pela Lua e pelo Sol.

- Goettems, et al. Palavras de ciências humanas e sociais aplicadas. **1ª Edição. Editora Palavras, 2020.**

Em nenhum dos livros desses autores foi encontrado uma citação às marés.

- Rama, et al. Prisma – Ciências humanas. **1ª Edição. FTD, 2020.**

Em nenhum dos livros desses autores foi encontrado uma citação às marés.

- De Souza; Vaz. Ser protagonista – Ciências humanas e sociais aplicadas. **1ª Edição. SM, 2020.**

### Economia e trabalho



Na página 129, as marés são citadas no contexto de fontes de energias renováveis. Na página 246, há uma sugestão de leitura para o professor de um livro (Walisiewicz. *Energia alternativa: solar, eólica, hidrelétrica e de biocombustíveis*. São Paulo: Publifolha, 2008), que apresenta informações de pesquisas sobre o uso de biocombustíveis, além de produção de energia por meio das marés, do vento, do Sol e de outras fontes renováveis.

### 3.4.5 Livros Didáticos fora do Programa Nacional do Livro Didático

Decidiu-se analisar alguns livros didáticos de física, fora do PNLD, amiúde usados por professores do EM para comparar o nível de dedicação desses livros com os livros didáticos do PNLD. Não foram consultados livros de geografia, pois só se queria ter uma noção básica de como os de física abordavam o fenômeno das marés. Como se verá adiante, a maioria deles se dedica muito mais, em todos os aspectos, do que os do PNLD. Isso sugere que se o professor quiser consultar livros pré-universitários para entender como o fenômeno das marés pode ser mais bem abordado em sala de aula, deverá complementar seus estudos consultando os livros fora do PNLD também.

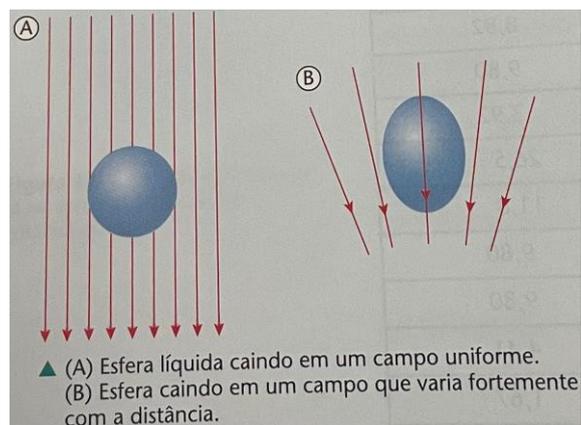
- Carron; Guimarães. As Faces da Física. 3ª Edição. Editora Moderna, volume único, 2006



A página 208 é inteiramente dedicada à explicação das marés e o efeito *spaghetti*<sup>47</sup>. Contém ilustrações didáticas, relacionando bem as distâncias entre os astros, a composição das marés lunares e solares e uma breve, mas simples e qualitativa explicação sobre as marés oceânicas, sem a necessidade do uso do referencial acelerado. À guisa de exemplo, a figura 17 a seguir mostra uma das imagens retiradas desse livro, esquematizando o campo gravitacional não uniforme sobre um corpo extenso:

---

<sup>47</sup> O "efeito *spaghetti*" é um termo coloquial usado para descrever a distorção ou o estiramento de um objeto em forma de espaguete em direção a um corpo muito massivo (por exemplo, um buraco negro), causado pelas forças de maré extremamente intensas. As forças de maré são geradas pelo forte campo gravitacional desse corpo massivo e se tornam mais intensas à medida que um objeto se aproxima dele. Para exemplificar, quando um objeto, como uma estrela, se aproxima de um buraco negro, as forças de maré começam a puxar com força diferente em direções opostas, esticando o objeto em uma forma alongada, como um espaguete. Esse processo é conhecido como "espaguetificação", e pode resultar na destruição completa do objeto, com seus restos sendo eventualmente consumidos pelo buraco negro.



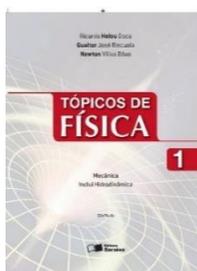
**Figura 17.** Diferença entre o campo uniforme e o campo não uniforme sobre um corpo. Fonte: Carron; Guimarães. *As Faces da Física*. 3ª Edição. Editora Moderna, volume único, 2006, p.208.

A respeito dessa imagem, a descrição é a seguinte:

“[...] De qualquer maneira, vamos considerar uma situação em que alguns pontos de um corpo sejam atraídos com mais intensidade do que outros. Ora, nesse caso eles não teriam a mesma aceleração e haveria uma tendência de separação entre as partículas do corpo, acabando com a simetria esférica. Em relação ao centro de massa, a parte menos atraída ficaria atrasada, e a parte mais atraída, adiantada. Essa é a causa do fenômeno das marés, e por isso ela ocorre simultaneamente em duas regiões diametralmente opostas.” (Ibid., p.208).

Completa a discussão dissertando sobre por quais razões o Sol não “arranca” a Terra de sua órbita, relaciona as marés com o efeito *spaghetti*, bem divulgado no *Uma breve história do tempo*, de Stephen Hawking, enriquecendo a abordagem do tema, deixando os alunos mais engajados. Arremata o tema com a periodicidade do fenômeno.

- Helou; Gualter; Newton. *Tópicos de Física 1 – Mecânica*. 21ª Edição. Editora Saraiva, São Paulo, 2012.



Na página 234, há a seguinte exemplificação para consequências do movimento da Terra em torno do Sol:

“Além disso, na passagem da Terra pela região do periélio, sentiríamos um calor imenso, ficando sujeitos a marés devastadoras. Na passagem da Terra pela região do afélio, porém, nos submeteríamos a fenômenos opostos: sentiríamos um frio glacial e as marés seriam amenas, provocadas quase que exclusivamente pela influência da Lua.” (Ibid., p.234 – **grifo nosso**).

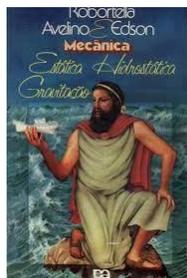
Na página 255, há um exercício que, de forma simplificada, pede para que o leitor explique a causa das marés oceânicas com base na ação dos campos gravitacionais do Sol e da Lua sobre a Terra. No entanto, não há explicação direta do fenômeno das marés ou alguma correlação deste com outro fenômeno natural.

- Lucie, P.. **Física básica**. Ed. Campus, 1980.

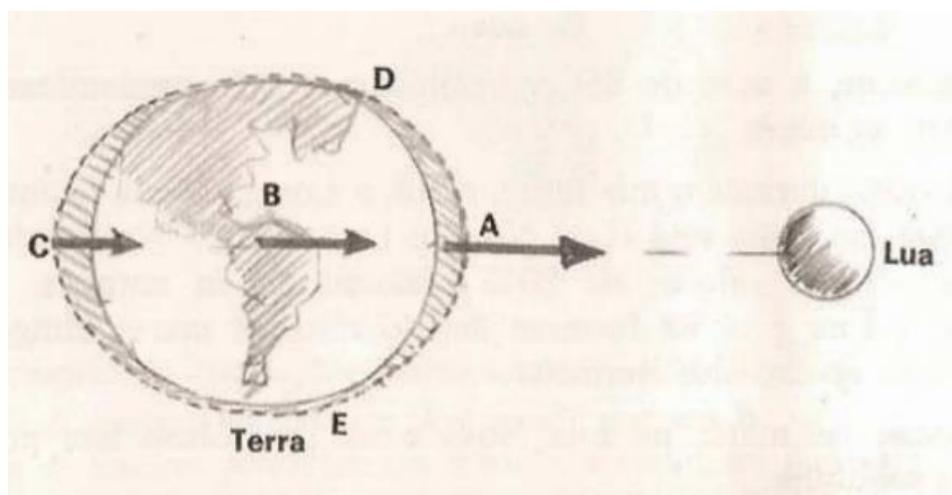


No capítulo 12, há uma seção exclusiva (seção 12.14) para tratar das marés. Baseando-se na lei da gravitação universal, inicia-se a explicação pela causa das marés, descrevendo o modelo físico newtoniano que o sustenta. O autor lança mão da Terra como referencial acelerado para explicar qualitativamente e quantitativamente o fenômeno. A discussão é rica, porém com intenso rigor matemático. Agora, é prestigioso comentar que seis páginas são dedicadas à explicação das marés (coisa difícil de se encontrar nos livros didáticos do PNLD).

- Robortella; Alves; de Oliveira. Mecânica: Estática, Hidrostática e Gravitação. Editora Ática, 1982



No capítulo 7, nas páginas 281 e 282, há um exercício sobre as marés altas nas fases de Lua Cheia e Lua Nova. Aproveita-se a ocasião para explicar em uma página e meia o fenômeno por meio de uma abordagem simples e qualitativa, sem o recurso do referencial acelerado, conforme a figura 18, no que segue:



**Figura 18.** Formação das marés. Fonte: Robortella; Alves; de Oliveira. Mecânica: Estática, Hidrostática e Gravitação. Editora Ática, 1982, p.281.

Conforme consta nas páginas citadas:

“A água dos oceanos no lado mais próximo da Lua sofre uma atração mais intensa do que a água no lado oposto. Assim, as intensidades das forças de atração sobre uma massa unitária de água em A e C são diferentes. A intensidade de atração em A é maior que em C. A Terra como um todo, imaginada concentrada em B, sofre uma força de atração de intensidade intermediária por massa unitária. Portanto, em A a superfície da água se afasta da Terra na direção da Lua. Esta é a região da **maré alta**. Mas, devido à rigidez da Terra como um todo, ela experimenta uma força atrativa de intensidade maior que a água, em C. Assim, a Terra se afasta da água em C, propiciando o surgimento de uma **maré alta** em C, do mesmo modo que em A. Como o volume da água dos oceanos é praticamente constante, o surgimento de **marés**

**altas** em **A** e **C** faz o nível das águas baixar em **D** e **E**: são as **marés baixas**.”  
(Ibid., p.281 – **sublinhado nosso**).

Acrescenta ao raciocínio o fator crucial para explicar adequadamente as forças de marés – o gradiente gravitacional:

“A força gravitacional exercida pelo Sol sobre a Terra é mais intensa que aquela exercida pela Lua. Por que, então, a Lua tem maior influência no fenômeno das marés? A razão é simples: as marés são devidas basicamente à **diferença relativa** nas intensidades das forças gravitacionais nos lados opostos A e C, e não às forças em si. Pelo fato do Sol estar muito distante da Terra, a **diferença relativa** entre as intensidades das forças que ele faz surgir em um lado da Terra e no lado oposto é muito pequena. A Lua, entretanto, está muito próxima da Terra e a **diferença relativa** das forças que ela cria é suficiente para dominar a formação das marés” (Ibid., p.281).

Por fim, apresenta uma imagem para tratar das componentes lunares e solares de maré, explicando as marés de sizígia e de quadratura, sem citar tais nomenclaturas.

### *Conclusões*

No âmbito geral, o assunto é negligenciado no EM. Em geral, nos livros didáticos, poucas páginas são dedicadas ao assunto. Em média, uma página, no máximo, duas. Claro que não é condição necessária ter mais de duas páginas para explicar adequadamente o fenômeno, vide os exemplos dos livros paradidáticos. Contudo, poucos são os didáticos que conseguem explicar satisfatoriamente, do ponto de vista científico, o fenômeno das marés. De um total de 143 livros analisados, apenas 38 citam o fenômeno das marés, mas apenas 4 (aproximadamente 2,8% do espaço amostral) conseguem abarcar as explicações cientificamente relevantes desse fenômeno: apresentar uma motivação instigante, diferenciar partícula de corpo extenso, apresentar a ideia do gradiente (campo gravitacional não uniforme), estender esse conceito para o sistema Terra-Lua, relacionar com as marés vistas localmente em praias para gerar identificação no estudante, saber explicar que ventos, pressão atmosférica, etc., são fatores secundários quanto ao surgimento das marés, saber considerar e apresentar para os alunos as hipóteses para o modelo estático das marés, acrescentar a contribuição solar nas marés, esquematizar conjuntamente as marés lunares e solares (sizígia e

quadratura), e correlacionar o fenômeno das marés com outros efeitos como marés terrestres, buracos negros, limite de Roche, etc. para causar o “espanto” no estudante, como diria Rubem Alves. Os livros de geografia, em geral, preocupam-se apenas em citar o fenômeno no contexto de energias renováveis e, em segundo plano, citá-lo no contexto da formação de relevos litorâneos. Apenas em um livro encontrou-se uma frase referenciando a causa para as marés. Para facilitar a busca de algum professor quanto aos melhores livros didáticos para se estudar o fenômeno das marés, segue a lista:

- Máximo; Alvarenga; Guimarães. Física – Contexto e Aplicações. **2ª Edição. São Paulo: Editora Scipione**, v.1, 2016 (código: 0045P1813)



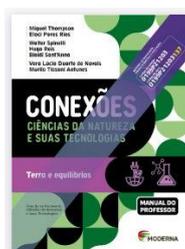
- Pietrocola; Pogibin; de Andrade; Romero. Física em Contextos. **1ª Edição. Editora do Brasil**, v.1, 2016 (código: 0167P18133)



- Lopes; Rosso. Ciências da Natureza. **Editora Moderna**. 2020 (Água, Agricultura e Uso da terra)



- Antunes et al. Conexões – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **Editora Moderna**, 2020 (Terra e equilíbrios)



### 3.4.6 Sites Populares

Com a facilidade de acesso à informação na *internet*, é importante ser cauteloso e filtrar os *sites* que não explicam de forma satisfatória as informações sobre marés. Utilizamos o Google, usando as palavras-chaves “marés, “forças de maré”, “*tides*” e “*tidal forces*” para realizar tal filtração, no que segue:

- <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/mares.htm>

"Como a Terra realiza o movimento de rotação – gira em torno do seu próprio eixo –, fica sempre com metade de sua superfície voltada para a Lua. Nessas regiões, o poder de atração gravitacional é maior, e as marés são altas. Nas áreas opostas do globo, as marés estão baixas, ou seja, as marés dependem da localização da Lua em relação ao planeta Terra." (Ribeiro. "Marés"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/mares.htm>. Acesso em 21 de abril de 2023 – **grifo nosso**).

Como se sabe, no lado diametralmente oposto à Lua, haverá maré alta na Terra também. Esse é o famoso erro de se considerar apenas a força gravitacional, quando, na verdade, o que importa é o gradiente gravitacional. Este é o conceito-chave para se entender a maré alta do outro lado.

- <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/mares.htm>



**Figura 19.** As marés ocorrem nas regiões próximas ao Sol ou à Lua. Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/mares.htm>. Acesso em 02/04/2023.

“As marés altas ocorrem nas regiões que estão mais próximas ao Sol e à Lua, enquanto nas demais regiões ocorrem as marés baixas.” (Teixeira.

“Marés”; *Mundo Educação*. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/mares.htm>. Acesso em 21 de abril de 2023 – **grifo nosso**).

Tem que se ter cuidado ao relacionar a imagem com a descrição apresentada. A imagem dá a entender que a Lua atrai a água de um lado e o Sol atrai do outro, podendo induzir ao erro de se pensar que as marés altas só ocorrerão nessa configuração do sistema Terra-Lua-Sol. A mesma página ainda afirma:

“Cada uma das marés acontece duas vezes em todos os pontos do planeta.” (Teixeira. “Marés”; *Mundo Educação*. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/mares.htm>. Acesso em 21 de abril de 2023 – **grifo nosso**).

Como se sabe, à luz da teoria dinâmica das marés, está longe de ser assim. No mínimo, o que se deveria ter escrito é que “de maneira simples” ou “em uma explicação mais simples” ou “considerando apenas a teoria estática das marés” ou ter apresentado as hipóteses desse modelo estático das marés.

- <https://escolakids.uol.com.br/geografia/mares.htm>

“A Lua está diretamente ligada à existência das marés. Sem ela, os oceanos ficariam sempre no mesmo nível. Quando gira em torno da Terra, o nosso satélite natural atrai o nosso planeta para si e essa atração provoca mudanças nos níveis das águas. O Sol também influencia as marés, mas com uma intensidade muito menor.” (Ribeiro. “Marés”. *Escola Kids*. Disponível em: <https://escolakids.uol.com.br/geografia/mares.htm>. Acesso em 21 de abril de 2023 – **grifo nosso**).

A frase anterior não se justifica embora o público-alvo sejam crianças. Como o Sol contribui também para as marés, os oceanos não ficariam no mesmo nível. O que aconteceria é as marés teriam menor intensidade, isto é, a variação de altura da superfície da água seria menor. Curioso que ao final da frase, há a consideração do Sol nas marés. Que contradição!

“De um lado do planeta (o que está direcionado para a lua), as marés sobem e, do outro lado, as marés descem.” (Ribeiro. “Marés”. *Escola Kids*. Disponível em: <https://escolakids.uol.com.br/geografia/mares.htm>. Acesso em 21 de abril de 2023 – **grifo nosso**).

O mesmo equívoco do primeiro site listado.

- <https://www.infoescola.com/oceanografia/mares/>

“Além da Lua e do Sol, a rotação da Terra sobre o seu eixo também colabora para a formação das marés. Uma “metade” de nosso planeta está sempre voltada para a Lua, que exerce seu poder de atração sobre as águas. Nesta face, teremos maré alta. Na face oposta à Lua teremos maré baixa. Ou seja, é como se a lua “puxasse” as águas da metade para a qual ela está voltada no momento.” (Ribeiro. “Marés”. *Infoescola*. Disponível em: <https://www.infoescola.com/oceanografia/mares/>. Acesso em 21 de abril de 2023 – **grifo nosso**).

Tem que se ter muito cuidado em atribuir à rotação da Terra a causa das marés. A rotação dita o ritmo das marés. A causa é o gradiente gravitacional. Adicionalmente, encontra-se o mesmo erro de afirmar que no lado da Terra mais afastado da Lua haverá maré baixa.

- <http://200.144.244.96/cda/aprendendo-basico/forcas-de-mares/forcas-de-mares.htm>

“Portanto, para quem está na Terra existe uma força centrífuga (devido a inércia) agindo no ponto (4).” (Centro de Divulgação da Astronomia. “As forças de marés”. Disponível em: <http://200.144.244.96/cda/aprendendo-basico/forcas-de-mares/forcas-de-mares.htm>. Acesso em 21 de abril 2023.

- <https://educacaoespacial.files.wordpress.com/2010/10/forc3a7as-de-marc3a9s.pdf>

“Portanto, em relação ao centro da Terra, um lado está sendo puxado em direção à Lua, e o outro lado submetido a ação da força centrífuga, está sendo puxado na direção contrária.” (Barão. “Forças de marés”. Disponível em: <https://educacaoespacial.files.wordpress.com/2010/10/forc3a7as-de-marc3a9s.pdf>. Acesso em 21 de abril de 2023).

Como já explicado, a força centrífuga em nada contribui para a formação das marés.

Para um entendimento adequado do fenômeno das marés, recomendam-se os seguintes *links*:

- <https://www.youtube.com/watch?v=7xGDM45XOyo>
- <https://www.youtube.com/watch?v=6-5476xxdw4&t=1s>

Com um tratamento rigorosamente matemático e voltado para o ensino universitário, o professor Jorge Sá Martins, da Universidade Federal Fluminense (UFF), em seu curso online de Mecânica, no YouTube, nessas aulas demonstra a física das marés e o cálculo para suas alturas, desenvolvendo a clássica abordagem da Terra como referencial acelerado, à guisa das várias explicações encontrados em livros-textos famosos e recorrentes no ensino superior.

- <https://www.youtube.com/watch?v=K-z-H7uV2x0&t=1072s>

Eis aqui um vídeo que talvez poucos tenham conhecimento, mas que o professor Elio Crapun, consegue desmistificar alguns conceitos envolvidos na explicação das marés (como por exemplo, a força centrífuga), e explicar em uma abordagem simples e qualitativa o fenômeno das marés. Sua analogia apresentada a partir de 9 min 45 s desse vídeo, foi utilizado como referência em nossa instrução. Ele também contextualiza o fenômeno das marés com os buracos negros, explica o atraso das marés de um dia para o outro, a energia aproveitada nas usinas, o acoplamento de maré e, finalmente, o efeito de fricção das marés.

- <https://www.youtube.com/watch?v=pwChk4S99i4&t=533s>

Esse vídeo, com recurso de legenda relativamente bom, também apresenta alguns equívocos com relação às marés. Trata de uma explicação com uma abordagem tradicional, usando-se do referencial acelerado, mas contém boas animações, auxiliando na compreensão da mecânica do fenômeno.

- <https://m.youtube.com/watch?v=PSJRymZ5bJs>

A animação ilustra a dinâmica das marés oceânicas, um sistema complexo de ondas rotativas com diferentes amplitudes ao longo das costas da Europa e Grã-Bretanha. A animação exagera o nível das marés para mostrar como elas variam globalmente.

## Capítulo 4

### Teoria das marés de Newton

A seguir, apresenta-se com maior detalhamento a Teoria do Equilíbrio, a qual faz parte de um conjunto de teorias que tratam das marés como um fenômeno astronômico relacionado aos efeitos gravitacionais causados pelo Sol e pela Lua em nosso planeta. Cumpre-nos sublinhar que a razão pela qual elegemos essa abordagem é em virtude da causa que ela aponta para o fenômeno ainda ser aceita nos estudos relativos às marés, além de se sustentar em conceitos físicos que já foram ministrados no currículo da Educação Básica. Ademais, essa teoria lança mão de conceitos e visões fundamentais para o currículo, a exemplo da concepção de gravitação universal, a qual, historicamente, tornou possível uma visão mais unificada dos mundos tanto da Terra como dos céus (Dantas, 2020). Cabe mencionar, ainda, que essa teoria é a que mais desponta dentre a maioria dos artigos destinados ao ensino de ciências e de física que foram previamente apresentados no capítulo 3. Por fim, toda a análise doravante está baseada em da Silveira (2003), Oliveira e Saraiva (2004), Dantas (2020) e (Machado; Tort e Zarro, 2020).

São inúmeras as crendices e mitos que permeiam a influência da Lua sobre nossas vidas e sobre a Terra, muitas delas sem nenhum respaldo científico. Há quem acredite piamente que a Lua tem o poder de determinar o momento ideal para o corte de cabelo, que influencia diretamente no nascimento de bebês e partos (vide da Silveira, 2001a e da Silveira, 2003, para uma refutação dessa crença), bem como no crescimento de unhas e cabelos, visto que a Lua é capaz de agir sobre os fluidos corporais. Se ela tem tal capacidade de atuar nas imensas massas de água dos oceanos, como não teria efeito sobre os líquidos presentes no útero da mãe ou sobre outros fluidos corporais, influenciando no crescimento dos cabelos? Tal questionamento pode ser bastante persuasivo, especialmente quando dirigido a pessoas que desconhecem como ocorrem as marés, fato que é comum (da Silveira, 2003, p.1). Será que o fato de o corpo humano ser composto, em sua maioria, de água, faz com que a Lua exerça alguma influência sobre nossos corpos? Este tipo de questionamento é frequentemente levantado quando se discute a possibilidade de influências lunares, e merece uma resposta bem fundamentada. A resposta curta, "Muito pouco mesmo", é bastante difícil de ser

justificada em poucas palavras, o que pode levar a desconsiderações que obscurecem as questões reais. Ademais, além do pecado de obscurecer a verdade, é lamentável perder a oportunidade de explicar um pedaço da ciência de interesse geral (Quincey, 1995, p.509). De maneira geral, as pessoas sabem que as marés existem, tendo em vista que, às vezes, as observam no mar, mas nunca viram uma maré ocorrer em uma bacia ou em um açude (da Silveira, 2003, p.1).

O ponto chave para entender o fenômeno das marés é o campo gravitacional não uniforme (ou força gravitacional diferencial ou gradiente gravitacional). Na Terra, as marés são causadas, em especial, pelo campo gravitacional não uniforme da Lua e do Sol, em menor intensidade. Assim, a ação desses astros sobre a Terra são diferentes em diferentes pontos da própria Terra.

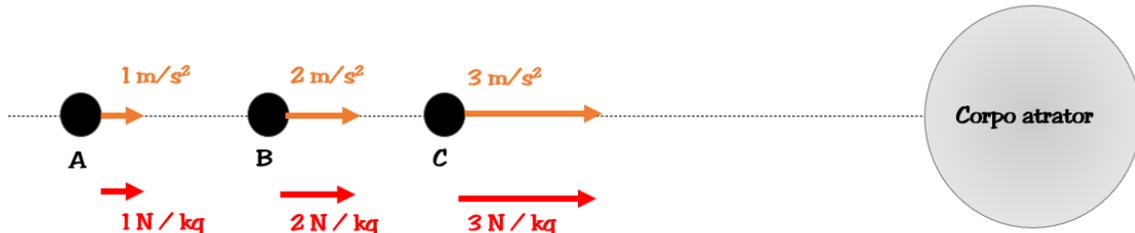
O modelo de Newton parte de algumas simplificações, tais como: assume a superfície do planeta coberta apenas por água, sem porções continentais intercaladas no meio desse oceano único; e desconsidera efeitos da rotação sobre os movimentos das águas.

Newton demonstra matematicamente que a ação gravitacional de um corpo esférico (não pontual) na região externa à sua borda é equivalente à ação de uma partícula com a mesma massa que estivesse localizada no centro do corpo. Essa aproximação é comumente utilizada para analisar a força gravitacional exercida por astros quase esféricos, como a Terra ou a Lua, sobre corpos pontuais em sua vizinhança. No entanto, ao analisar os efeitos gravitacionais de um astro massivo, como a Lua, sobre outro corpo extenso em sua proximidade, como a Terra, as partículas que compõem esse corpo estarão a diferentes distâncias do centro da Lua, sujeitas a acelerações de diferentes intensidades e direções. Isso pode gerar deformações ou acúmulo de massas de água nessas regiões específicas do corpo (marés).

À guisa de entendimento, exploremos esse conceito básico da deformação a partir de algumas figuras exemplares retiradas e adaptadas de da Silveira (2003) e Oliveira e Saraiva (2004), e (Machado; Tort e Zarro, 2020).

### Referencial inercial

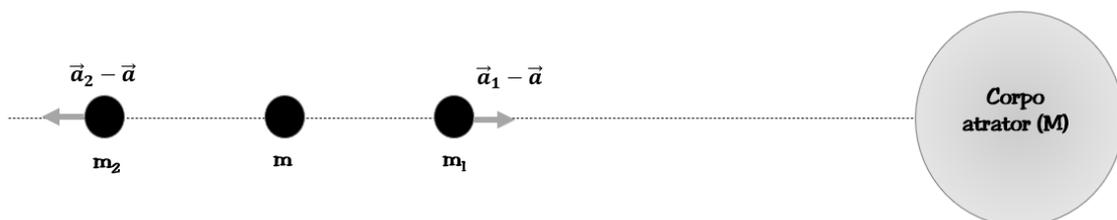
Considere um sistema de três partículas iguais, A, B e C, com massa de 1 kg cada, submetidos a um campo gravitacional não uniforme que tem a mesma orientação sobre cada uma dessas partículas, variando apenas em intensidade. O corpo atrator à direita é suposto ser simétrico esfericamente.



**Figura 20.** Sistema de três partículas de mesma massa submetido a um campo gravitacional não uniforme. Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

Nessa situação da figura 20, pode-se calcular a aceleração de cada uma delas, pela 2ª lei de Newton. A partícula A terá uma aceleração de  $1 \text{ m/s}^2$  ( $1 \text{ N} / 1 \text{ kg} = 1 \text{ m/s}^2$ ), a partícula B terá uma aceleração de  $2 \text{ m/s}^2$  ( $2 \text{ N} / 1 \text{ kg} = 2 \text{ m/s}^2$ ) e a partícula C terá uma aceleração de  $3 \text{ m/s}^2$  ( $3 \text{ N} / 1 \text{ kg} = 3 \text{ m/s}^2$ ). Admitindo-se, em primeira instância, que a cada uma das três partículas subjacentes à análise repousem em relação às outras, conclui-se com facilidade que o espaçamento que as aparta tende a crescer (distância entre elas aumentará), uma vez que não tardará até que deixem de estar em repouso, passando a se movimentar a diferentes velocidades: a partícula C exibirá uma velocidade superior à da partícula B e esta, por sua vez, ultrapassará em magnitude a da partícula A (da Silveira, 2003).

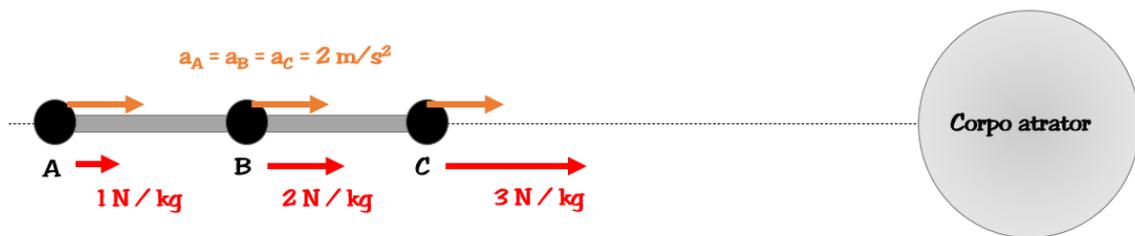
Podemos refletir sobre a situação anterior por uma análise semelhante, conforme a figura 21, que representa as três partículas em um referencial onde são válidas as leis de Newton.



**Figura 21.** Aceleração média resultante de cada partícula. Fonte: adaptada de Oliveira e Saraiva (2004).

Cada massa sofre uma aceleração diferente devido às variações de distância entre elas e M. No referencial da massa m, situada entre  $m_1$  e  $m_2$ , a aceleração é nula e as acelerações relativas de  $m_1$  e  $m_2$  são obtidas subtraindo a aceleração de m em relação ao referencial de m.

Imaginemos, agora, que as três partículas em questão se encontrem unidas por meio de hastes finas e leves, em conformidade com o que se observa na figura 22. Desse modo, as distâncias relativas entre elas não podem ser modificadas, implicando, por conseguinte, que a mesma aceleração deva ser experimentada pelas três partículas. O cálculo desse valor é simplesmente factível, bastando dividir a força gravitacional resultante atuante sobre o sistema ( $1\text{ N} + 2\text{ N} + 3\text{ N} = 6\text{ N}$ ) pela massa total do sistema ( $3\text{ kg}$ ), de modo a obter, assim, a aceleração equivalente de  $2\text{ m/s}^2$  do centro de massa do sistema de três partículas.<sup>48</sup>



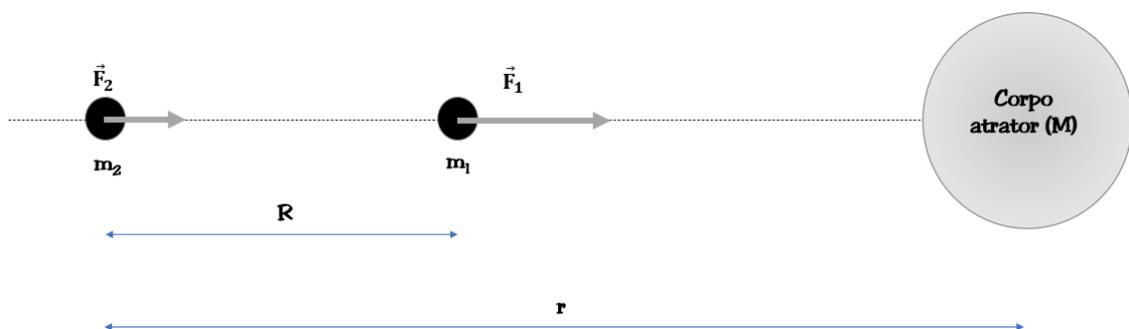
**Figura 22.** Sistema de três partículas de mesma massa ligadas por uma haste fina e leve, submetido a um campo gravitacional não uniforme. Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

A fim de que as três partículas experimentem uma aceleração uniforme, as hastes que as mantêm interligadas devem estar sujeitas a uma tensão. A despeito de a força exercida pelo campo gravitacional sobre a partícula C corresponder a  $3\text{ N}$ , tal partícula seria alvo de uma aceleração de  $3\text{ m/s}^2$ ; no entanto, sua aceleração real é menor ( $2\text{ m/s}^2$ ), o que implica que uma força deve ser aplicada pela haste sobre a partícula C, em sentido contrário, isto é, à esquerda. A partícula A, por sua vez, que evidencia uma aceleração superior ( $2\text{ m/s}^2$ ) àquela imposta pelo campo gravitacional ( $1\text{ m/s}^2$ ), requer uma força, igualmente decorrente da haste, atuante à direita. Dito de outra maneira, como resultado, se a força líquida for a mesma em cada uma das massas, as hastes conectando as partículas A, B e C devem estar sujeitas a tensões de tal forma que a força líquida atuando em cada uma das partículas seja a mesma. Assim, o sistema simplificado apresentado na figura 22, quando colocado em um campo gravitacional

<sup>48</sup> Esse tipo de exercício envolvendo um simples vínculo geométrico (hastes) é bem comum no EM.

não uniforme, está sujeito a forças internas, ou seja, tensões nas hastes que conectam as massas A, B e C. Vamos supor agora que as hastes sejam flexíveis. Nesse caso, as forças internas causarão uma deformação no sistema durante a queda livre no campo gravitacional. Tal exemplo numérico explicita que um campo gravitacional não uniforme, quando aplicado sobre um sistema extenso, enseja o surgimento de forças internas ao sistema. Qualquer sistema genuíno, como a Terra, por exemplo, é flexível e, por conseguinte, a presença dessas forças internas, derivadas da falta de uniformidade do campo gravitacional externo, como decorrente do Sol ou da Lua, acarretará em deformações do sistema, a exemplo das marés (da Silveira, 2003, p.4).

O mesmo gênero de análise empreendido para identificar o efeito de maré proveniente da Lua sobre o nosso planeta pode ser igualmente empregado para investigar o efeito de maré do Sol sobre a Terra. Sob o prisma qualitativo, o astro denominado M pode ser concebido tanto como a Lua, quanto como o Sol. A fim de cotejarmos quantitativamente o impacto de cada astro sobre o nosso globo, precisaremos de uma expressão matemática que nos faculte estimar os efeitos de maré de um astro sobre o outro. A partir da figura 23, alteraremos a abordagem em comparação àquela desenvolvida nas figuras precedentes, nas quais nos detínhamos sobre as acelerações das partículas. Aqui, restabeleceremos o referencial inercial e nos serviremos da expressão da gravitação universal para deduzirmos o valor das forças  $F_1$  e  $F_2$  e, assim, alcançarmos a expressão que nos possibilite computar as forças diferenciais que originarão os efeitos de maré.



**Figura 23.** Diferença entre as forças  $F_1$  e  $F_2$ . Fonte: adaptada de Oliveira e Saraiva (2004).

Na figura 23, temos a representação da distância entre as duas partículas  $m_1$  e  $m_2$  como  $R$ , enquanto a distância da partícula  $m_2$  a  $M$  é representada por  $r$ . Essa disposição da figura segue a analogia previamente apresentada, onde as massas  $m_1$  e  $m_2$  podem ser

equiparadas às posições de dois pontos diametralmente opostos sobre a Terra, de tal modo que a distância  $R$  corresponde, por analogia, ao diâmetro terrestre, enquanto  $M$  simboliza a Lua. A partir dessa configuração, podemos obter uma estimativa das forças de maré provenientes do astro  $M$  sobre o nosso planeta, ao calcularmos o módulo da diferença vetorial  $\Delta F$  entre as forças nos extremos do planeta, resultando na seguinte equação escalar:

$$\Delta F = F_1 - F_2$$

A lei da gravitação universal diz que a força gravitacional varia proporcionalmente com o produto das massas dos corpos em atração e varia inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Assim:

$$\Delta F = G \frac{Mm_1}{(r-R)^2} - G \frac{Mm_2}{r^2}$$

$$\Delta F = GM \left[ \frac{m_1}{(r-R)^2} - \frac{m_2}{r^2} \right]$$

Como as massas são iguais, chamemos todas de  $m$ , para resultar em:

$$\Delta F = GMm \left[ \frac{r^2 - (r-R)^2}{r^2(r-R)^2} \right]$$

$$\Delta F = GMm \left[ \frac{2rR - R^2}{r^4 - 2Rr^3 + r^2R^2} \right]$$

$$\Delta F = GMm \left[ \frac{r \left( 2R - \frac{R^2}{r} \right)}{r^4 \left( 1 - \frac{2R}{r} + \frac{R^2}{r^2} \right)} \right]$$

Como  $r \gg R$ , podemos fazer a seguinte aproximação:  $2R - \frac{R^2}{r} \cong 2R$  e  $1 - \frac{2R}{r} + \frac{R^2}{r^2} \cong 1$ . Então, tem-se que:

$$\Delta F \cong 2GMm \frac{R}{r^3} \quad (1)$$

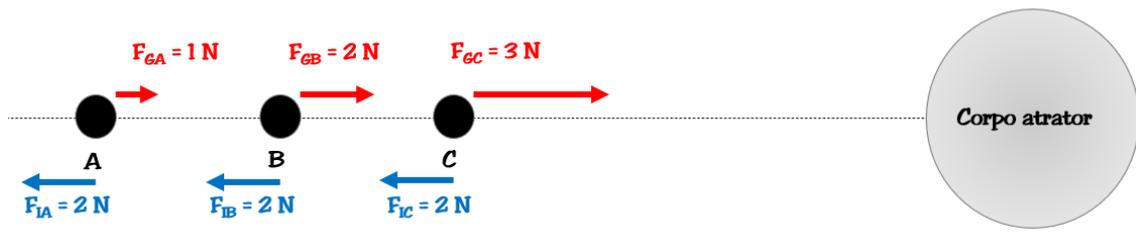
Logo, a equação (1) representa a força de maré que é nada mais nada menos que a diferença de forças gravitacionais entre pontos distintos de um corpo, e que varia proporcionalmente com o produto das massas dos corpos em atração e inversamente proporcional ao cubo da distância entre eles. Voltaremos a discutir em breve essa

equação do ponto de vista qualitativo, mas antes, vamos rever toda análise da força de maré sob um ponto de vista das leis de Newton em um referencial acelerado.

*Referencial não inercial (acelerado)*

Há uma outra via pela qual podemos abordar o sistema retratado na figura 20, qual seja, mediante a aplicação das leis de Newton em um referencial que se encontra acelerado. Nesse tipo de referencial, cada corpo sofre não apenas as forças reais<sup>49</sup>, mas também a força inercial. Essa força é exclusiva dos sistemas de referência em movimento acelerado e tem sentido oposto ao da aceleração do referencial. O seu valor é determinado pela multiplicação da massa do corpo pela aceleração do referencial.

A partir daqui, com ligeiras adaptações, segue-se o que da Silveira (2003, p.4-5) realiza em seu artigo. Se utilizarmos o próprio sistema como referencial, o que é muito conveniente, já que nesse caso todos as três partículas estão em repouso (situação estática), verificaremos que cada uma delas sofre uma força inercial de 2 N (1 kg x 2 m/s<sup>2</sup>) dirigida para a esquerda, que é o sentido oposto ao da aceleração do referencial. Na figura 24, podemos ver as forças que atuam sobre cada uma das três partículas, sendo uma delas a força gravitacional externa ao sistema  $\vec{F}_{Gj}$ , que recebe um índice j (j = 1 ou 2 ou 3) e a outra é a força inercial  $\vec{F}_{Ij}$  que surge no referencial em movimento acelerado. É importante destacar que a figura não apresenta as forças internas ao sistema, que são as forças tensoras que atuam nas hastes.



**Figura 24.** Sistema de três partículas de mesma massa submetido a um campo gravitacional não uniforme a partir de um referencial acelerado. Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

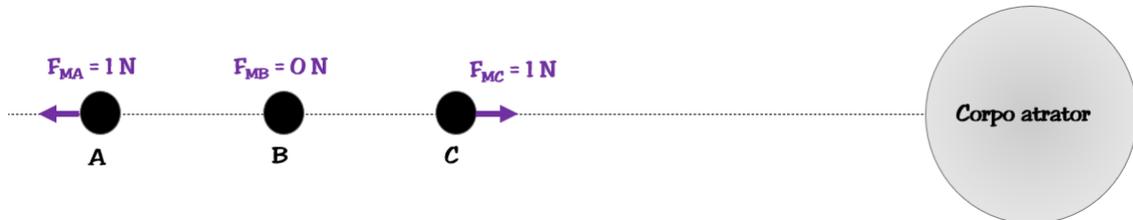
Conclui-se, pois, facilmente, que a definição vetorial de força de maré sobre qualquer partícula do sistema  $\vec{F}_{Mj}$  é a resultante da soma vetorial da força gravitacional,

<sup>49</sup> Que são aquelas geradas por outros corpos e que seguem a terceira lei de Newton.

devida ao campo gravitacional externo, com a força inercial, no referencial acelerado por tal campo externo, isto é, matematicamente:

$$\vec{F}_{Mj} = \vec{F}_{Gj} + \vec{F}_{Ij}$$

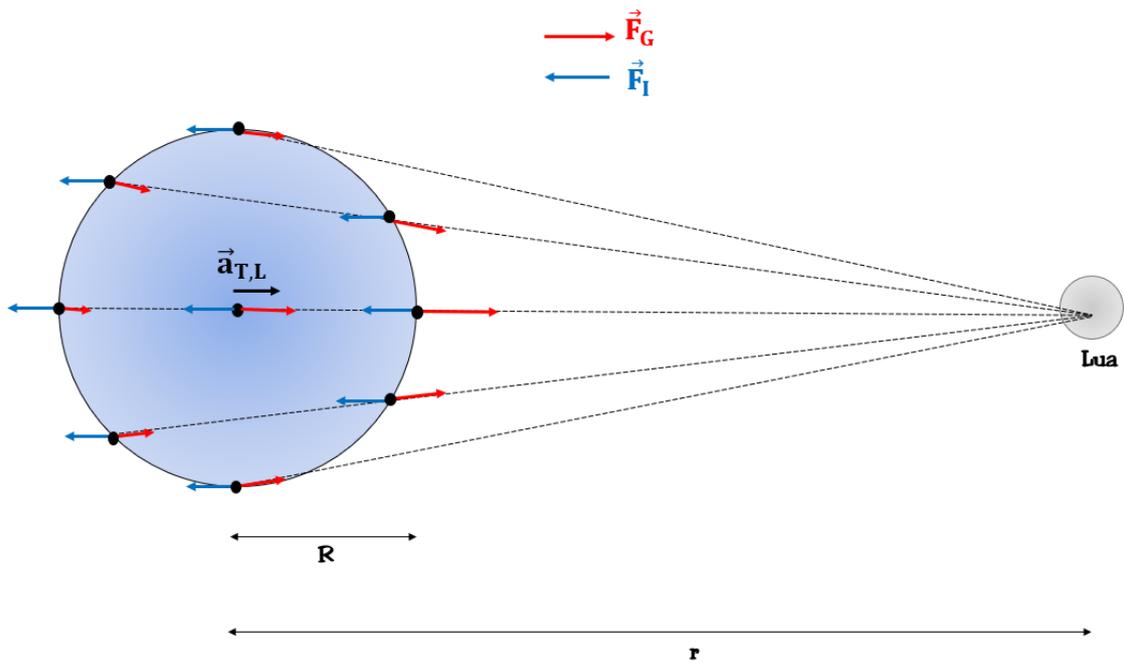
Aplicando esta definição a cada uma das três partículas do sistema, encontraremos o que está representado na figura 25.



**Figura 25.** Forças de maré sobre cada partícula. Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

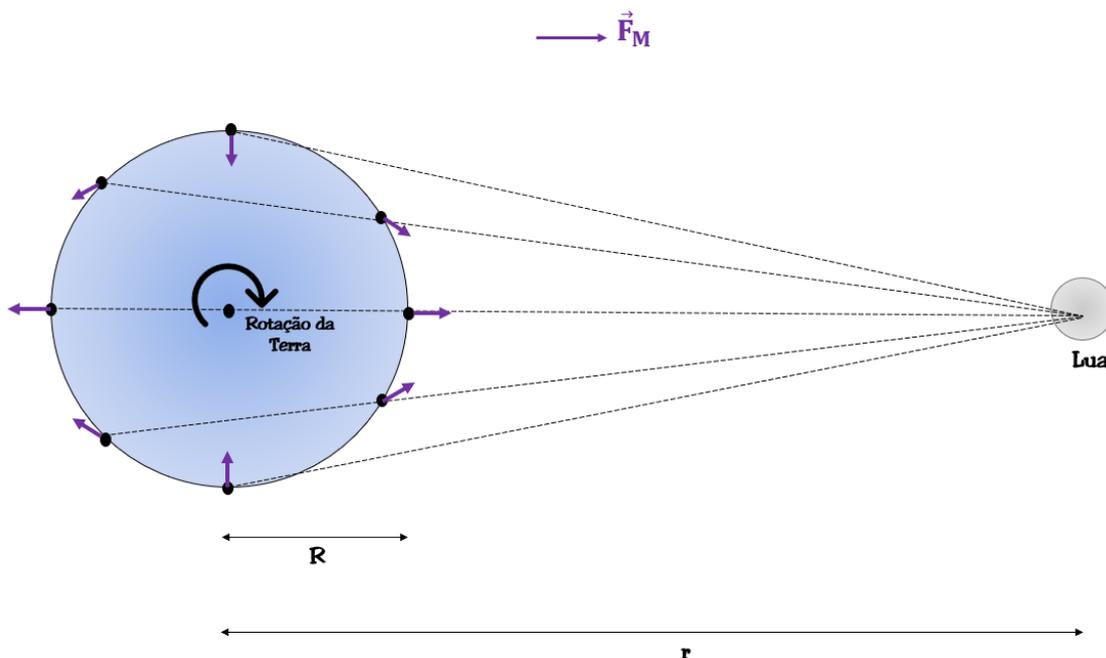
Neste momento, cumpre destacar que a representação da figura 25 é válida exclusivamente no referencial do sistema, no qual cada um dos corpos encontra-se em um estado de repouso. Tal situação é factível graças às forças internas ao sistema - no caso, forças tensoras nas hastes - que não se encontram explicitamente demonstradas na mencionada figura. O sistema encontra-se sob aceleração para a direita, em decorrência do campo gravitacional externo. Caso assumamos que as hastes não são dotadas de rigidez, é perfeitamente plausível concluir que ocorrerá uma deformação em virtude das forças de maré  $\vec{F}_{MA}$  e  $\vec{F}_{MC}$ .

Neste exato instante, com o desenvolvimento matemático preciso da força de maré, a compreensão acerca da figura 26 é consideravelmente facilitada. Na ilustração em questão, visualizam-se as duas forças atuantes sobre uma partícula de massa  $m$  em diferentes pontos da superfície terrestre - a força gravitacional e a força inercial. É notório destacar que a força inercial, presente em qualquer ponto da Terra, possui sempre a mesma orientação e magnitude, já que está intimamente ligada à massa do objeto em questão e à aceleração do referencial. Já a aceleração do referencial é relacionada ao centro de massa da Terra ( $\vec{a}_{T,L}$ ), gerada pela atração lunar, fazendo com que a força inercial, exercida no objeto de massa  $m$ , seja sempre igual (em magnitude e orientação), porém com sentido oposto ao da aceleração do referencial. O que realmente varia de um ponto a outro da superfície terrestre é a força gravitacional (em termos de magnitude e orientação) exercida pela Lua no objeto de massa  $m$  na Terra.



**Figura 26.** Forças gravitacional da Lua e inercial, sobre uma partícula de massa  $m$ , em vários pontos da Terra (fora de escala). Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

Faz-se necessário observar que, no centro do planeta, as duas forças em questão cancelam-se mutuamente; em qualquer outro local, todavia, haverá uma resultante que desencadeará a força de maré. Convém enfatizar que a força de maré de maior magnitude ocorre ao longo da reta que conecta os centros da Terra e do satélite, tendo sua direção orientada para fora do planeta. Na figura 27, é possível visualizar a representação da força de maré – i.e., a mera resultante das duas forças mencionadas – em diferentes pontos do globo terrestre.



**Figura 27.** Força de maré da Lua em vários pontos da Terra (fora de escala). Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

Na figura 27 pode-se observar que na direção ortogonal ao eixo que une o centro do planeta e de seu satélite, a força de maré está dirigida para o centro da Terra. É importante destacar que o eixo de rotação da Terra é quase perpendicular ao plano da figura 8; o sentido da rotação da Terra, indicado na figura, é aquele visto do hemisfério sul.

Uma observação importante a se considerar aqui é que a configuração vetorial apresentada na figura 27 só pode ser demonstrada pela análise do referencial não inercial (acelerado). Note que não mostramos esse perfil vetorial na análise do referencial inercial. No entanto, isso não se torna um impeditivo para se lecionar tal assunto no EM e é o que essa dissertação tenta defender de certa forma. Primeiramente, a ideia de referencial não inercial se demonstra de difícil compreensão por parte dos estudantes do EM. Adita-se a isso o fato de que a compreensão qualitativa, pela abordagem do referencial inercial, sugere um passo inicial nessa compreensão mais complexa do fenômeno para o público-alvo considerado. Por fim, nada impede que seja apresentado o perfil vetorial aos alunos, sem demonstrá-lo com o rigor matemático, o que pode ser feito com o uso de analogias, conforme foi feito com a proposta e poderá ser apreciado pelo leitor no capítulo 5 e nos apêndices A e B.

Prosseguindo com nossa análise, empreenderemos procedimentos análogos àqueles adotados para chegar à equação 1, entretanto agora sob a perspectiva do referencial acelerado. Dessa forma, conforme da Silveira (2003, p.9-10), determinaremos a seguir a magnitude da força de maré na superfície terrestre ao longo da linha que une o centro da Terra e a Lua, tanto no lado voltado para a Lua quanto no lado oposto. É válido salientar que, uma vez que a força gravitacional e a força inercial sobre uma partícula de massa  $m$  têm sentidos contrários, o valor da força de maré ( $F_M$ ) pode ser obtido por meio da subtração do valor da força gravitacional ( $F_G$ ) pelo valor da força inercial ( $F_I$ ), ou seja:  $F_M = F_G - F_I$ . O valor da força gravitacional pode ser obtido mediante a aplicação da lei da gravitação universal. Já o valor da força inercial pode ser obtido pela multiplicação da massa da partícula ( $m$ ) pela aceleração do referencial. Neste caso, a aceleração do referencial é equivalente à aceleração do centro de massa da Terra, que é provocada pela presença da Lua e que, por sua vez, ocasiona a aceleração inercial da partícula. Assim:

$$F_M = F_G - F_I$$

$$F_M = G \frac{Mm}{r^2} - ma_i, \quad a_i = G \frac{M}{r^2}$$

$$F_M = G \frac{Mm}{(r \pm R)^2} - m \frac{GM}{r^2},$$

sendo  $(r \pm R)$  a real separação entre o lado da Terra mais próximo (sinal negativo) ou mais afastado (sinal positivo) da Lua e o centro da Lua. Procurando o denominador comum, obtém-se:

$$F_M = GMm \left[ \frac{r^2 - (r \pm R)^2}{(r \pm R)^2 \times r^2} \right]$$

$$F_M = GMm \left[ \frac{r^2 - r^2 \pm 2rR - R^2}{(r \pm R)^2 \times r^2} \right]$$

$$F_M = GMm \left[ \frac{\pm 2rR - R^2}{(r \pm R)^2 \times r^2} \right]$$

$$\Delta F = GMm \left[ \frac{r \left( \pm 2R - \frac{R^2}{r} \right)}{r^4 \left( 1 \pm \frac{2R}{r} + \frac{R^2}{r^2} \right)} \right]$$

$$\Delta F = GMm \left[ \frac{\pm 2R - \frac{R^2}{r}}{\left(1 \pm \frac{R}{r}\right)^2} \right]$$

Se  $r \gg R$ , então  $R/r \ll 1$ , obtendo-se, portanto, por aproximação:

$$F_M \cong \pm 2GMm \left( \frac{R}{r^3} \right)$$

Segundo Da Silveira (2003), é possível afirmar que o sinal positivo presente na equação 2, a qual se refere ao lado da Terra mais próximo da Lua, denota que a força de maré atua em direção à Lua. Por outro lado, no lado oposto da Terra, temos o sinal negativo que indica que a força de maré age em direção contrária à Lua. Em ambos os lados do planeta, a força de maré atua para fora da Terra, enquanto em quaisquer outros pontos do planeta, ela é menos intensa, tendo componentes que seguem a direção perpendicular e paralela à superfície terrestre. Por conseguinte, é viável realizar o cálculo da intensidade da força de maré no local mínimo da Terra, onde essa força é direcionada para o centro do planeta:

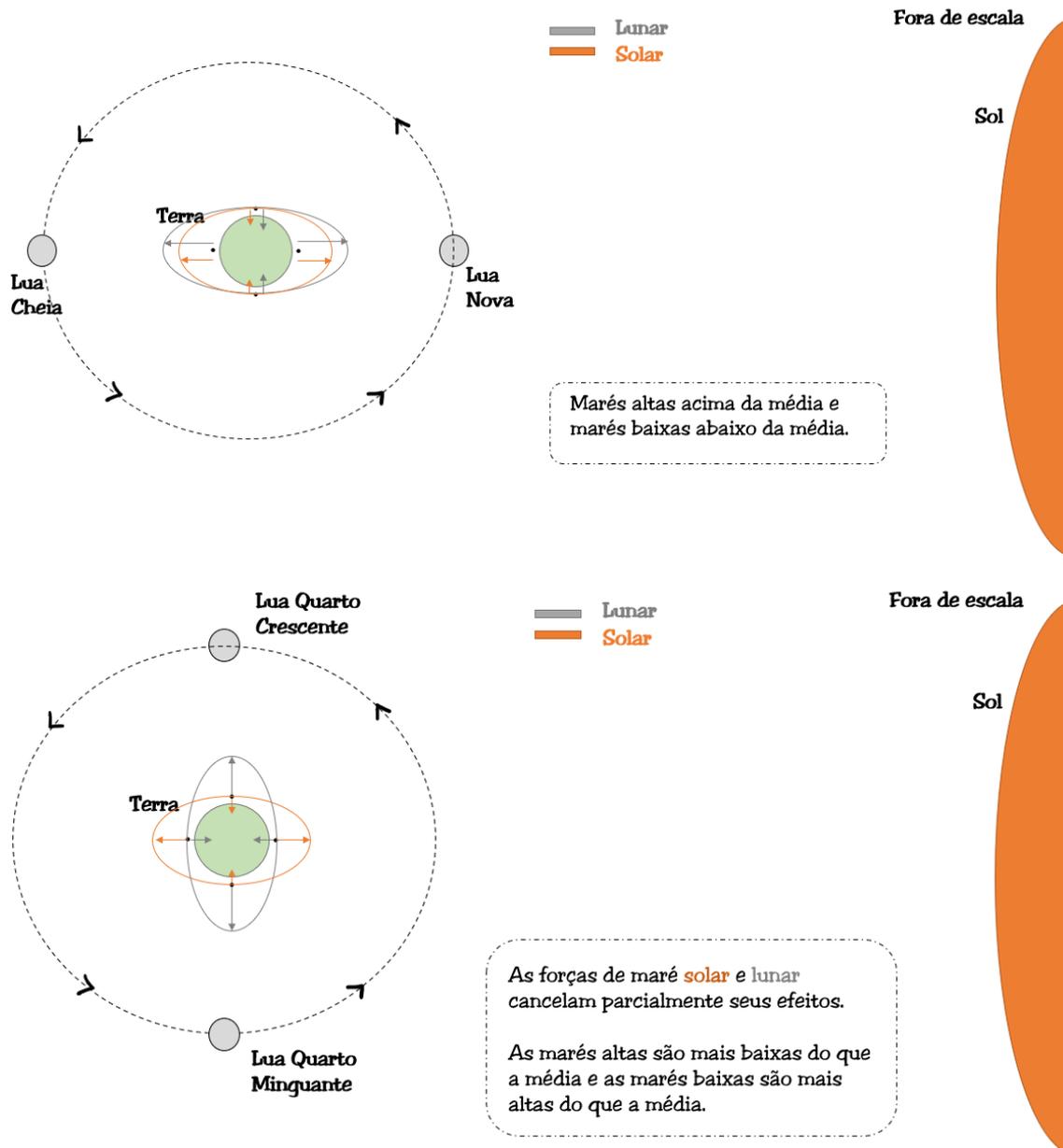
$$F_M \cong GMm \left( \frac{R}{r^3} \right), \quad (2)$$

fazendo com que a força de maré máxima tenha o dobro da intensidade da força de maré mínima.

As equações (1) e (2) são idênticas, obviamente, e suas análises permite-nos constatar que o efeito de maré se encontra diretamente relacionado à multiplicação das massas da partícula submetida ao efeito e do astro envolvido ( $m$  e  $M$ , respectivamente), assim como ao diâmetro do planeta, e inversamente relacionado ao cubo da distância entre ambos. A utilização dessa expressão possibilita a inferência acerca do astro que exerce maior influência sobre as marés na Terra, se a Lua ou o Sol. Enquanto ambos os astros exercem efeitos consideráveis de maré em nosso planeta, o efeito gerado pela Lua é mais intenso, devido à sua proximidade com a Terra. Apesar de a atração gravitacional do Sol ser cerca de 200 vezes maior do que a da Lua sobre a Terra, as diferenças de forças gravitacionais nos pontos extremos do planeta são maiores no caso da Lua. A aplicação das equações 1 e 2 conduz à conclusão de que o efeito de maré provocado pela Lua é cerca de 2,2 vezes superior ao efeito gerado pelo Sol, como atestam os cálculos realizados por Da Silveira (2003), nas páginas 6-10. Tal situação não deve causar surpresa, dado que ambas as forças se encontram diretamente proporcionais às massas dos astros em questão, mas a força de atração gravitacional é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a Terra e cada um deles, enquanto a força

de maré é inversamente proporcional ao cubo dessas distâncias. Ainda que a massa do Sol seja consideravelmente maior que a da Lua, o astro encontra-se mais distante da Terra que a Lua, de modo que as forças de maré geradas por ambos acabam por possuir ordens de grandeza similares, o que se trata de uma coincidência notável, sem precedentes no sistema solar (da Silveira, 2003, p.10-11). Em termos qualitativos, é possível afirmar que a força de maré não depende do valor da força de atração, mas sim de quão variável é a força de atração ao longo do planeta, ou seja, do gradiente da força de atração. O campo gravitacional da Lua sobre a Terra, ainda que menos intenso do que o do Sol, apresenta uma variação muito maior ao longo do planeta do que o do Sol (da Silveira, 2003; Oliveira e Saraiva, 2004; Dantas, 2020).

É possível, contudo, observar que a Lua e o Sol possuem efeitos consideráveis na intensidade das marés ao longo do mês, especialmente quando ficam aproximadamente alinhados com a Terra. Nas fases de Lua Cheia ou Lua Nova, em que ocorre o alinhamento Sol-Terra-Lua, temos a ocorrência de marés mais intensas, conhecidas como marés de sizígia ou marés vivas. Já nas fases crescentes e minguantes, quando a Lua e o Sol estão posicionados perpendicularmente em relação à Terra, as marés tendem a ser mais moderadas, conhecidas como marés de quadratura. No entanto, mesmo nessas fases, ainda há a ocorrência de marés altas e baixas. A figura 28 ilustra essas condições de maneira clara e concisa.

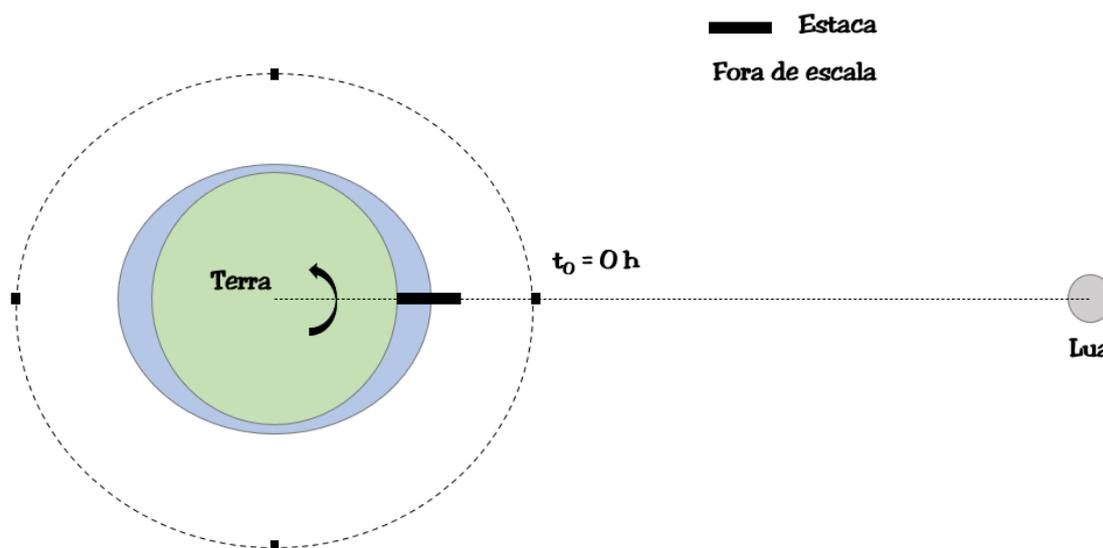


**Figura 28.** Composição das forças de maré solar e lunar durante o mês lunar (fora de escala). Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

Da Silveira (2003, p.12-13), explica que a força de maré, causada pela atração gravitacional entre a Terra e a Lua, é relativamente fraca e representa apenas uma pequena porcentagem da força gravitacional total exercida pela Terra sobre a Lua. Essa força de maré produz um desnível médio de cerca de 1 m entre as marés alta e baixa nos oceanos, em locais próximos à linha Equatorial.

Caminhando para o final da explicação, falta alinharmos o modelo estático newtoniano das marés à periodicidade das marés. Nesse sentido, a disposição de duas projeções de elevação da água (protuberâncias ou bojos de marés), orientadas na direção

da Lua, é capaz de explicar, de maneira qualitativa, não todos, mas diversos fenômenos observados acerca das amplitudes das marés. Essas protuberâncias surgem em pontos alinhados com a Lua e causam marés elevadas. Com essa configuração, é possível compreender a presença de duas marés altas e duas marés baixas ao longo do dia, uma vez que, à medida que a Terra gira, um observador passará por regiões alinhadas com a Lua aproximadamente a cada 12 h.



**Figura 29.** Deslocamento de uma estaca, fincada sobre a Terra, através das regiões de maré alta e baixa (fora de escala). Fonte: adaptada de da Silveira (2003).

Acerca da questão referente ao lapso de tempo entre dois picos ou vales de maré, convém ressaltar que ele não corresponde precisamente a 12 h, mas sim a algo em torno de 12 h 26 min (da Silveira, 2003, p.15). Esse fenômeno pode ser elucidado através da configuração astronômica envolvida, tendo em mente que a Lua altera sua posição devido a sua translação ao redor da Terra. Tal translação se dá no mesmo sentido da rotação terrestre, sendo que a Lua completa sua trajetória sobre um mesmo meridiano a cada 24 h 48 min, aproximadamente (Dantas, 2020). Em virtude disso, após um determinado ponto do globo estar em sintonia com a Lua durante sua passagem meridiana (resultando em maré alta, conforme o modelo newtoniano), esse mesmo ponto voltará a estar alinhado com a Lua após 12 h 26 min, mas em uma posição diametralmente oposta à anterior (da Silveira, 2003, p.15).

Finalmente, um último comentário a respeito do ciclo anual das marés. Ao longo do ano, como a posição da Terra em relação ao Sol varia devido a sua órbita elíptica, as marés também sofrem alterações. As marés mais intensas provocadas pelo Sol

acontecem quando a Terra está mais próxima desse astro, no periélio, assim como as marés lunares são mais intensas quando a Lua está mais próxima da Terra, no perigeu.

#### *Limitações do modelo estático newtoniano das marés*

O modelo newtoniano das marés consegue descrever as principais características das marés reais em muitos lugares. No entanto, possui suas limitações. Imagine uma das protuberâncias de água se movendo para oeste através do Oceano Atlântico. O que aconteceria quando ela encontrasse a América? Ela não viajaria por terra para retomar sua jornada no Pacífico; nem se viraria de lado, correndo ao longo da costa para encontrar um caminho através e manter sua programação para o oeste. Ela faria o que qualquer ondulação faria: *refletiria*. Então, de repente, temos nossa protuberância viajando na direção errada, pronta para *interferir* com a próxima que vem, e de fato, os ecos de muitas protuberâncias anteriores. Em resumo, os continentes atrapalham tanto que a imagem de duas protuberâncias é inviável (Quincey, 1995, p.512). Assim, algumas características observadas nas marés não são respondidas de acordo com a Teoria do Equilíbrio, por isso cabem algumas ressalvas importantes e observações a respeito.

Um exemplo, na prática, é de que as marés não estão sempre sincronizadas com a passagem da Lua. O relevo da costa está diretamente relacionado à compreensão das marés em cada local. A maré pode estar adiantada ou atrasada em relação à passagem meridiana ou antemeridiana da Lua, dependendo do local. Em Natal, por exemplo, segundo as tábuas de marés emitidas pela Marinha do Brasil, as alturas variam numa média de 2 m de altura, enquanto em alguns portos do Maranhão chegam a 8 m, e na Baía de Fundy, Canadá, em alta latitude, chega a variar aproximadamente 15 m. Demonstrando que outros fatores relevantes além da origem astronômica, mencionados anteriormente, estão associados a esse fenômeno (Dantas, 2020).

## *Alguns fenômenos naturais relacionados às marés*

- Acoplamento de maré

Não obstante as limitações apresentadas, um aspecto de elevado interesse que pode ser interpretado como aplicações da Teoria do Equilíbrio reside no fato de que a Terra, em sua própria dinâmica, gera efeitos de marés sobre a Lua. Tais efeitos são calculados em aproximadamente vinte vezes as forças de marés exercidas pela Lua sobre a Terra. Isto produz algumas previsões e hipóteses de significativa importância, tais como a explicação para o fato de que a rotação da Lua está sincronizada com sua translação, o que nos possibilita observar, do nosso planeta, somente um lado da Lua (acoplamento de maré), em razão de um processo semelhante ao que ocorre com a Terra, como será discutido a seguir. Considera-se que exista um fenômeno de fricção decorrente das marés, que é provocado pelos movimentos das águas na superfície terrestre. Tais águas tendem a acompanhar o movimento de rotação da Terra, mas, ao mesmo tempo, são puxadas em direções diversas pela influência gravitacional da Lua, gerando um arraste entre as águas e a superfície da Terra. Esse arraste resulta na diminuição gradual da rotação terrestre, o que, por sua vez, tende a alterar a duração do dia. Estima-se que o dia terrestre tende a aumentar em aproximadamente 0,002 segundos por século, o que equivale a 1 min cada 3 milhões de anos. Embora esse valor pareça irrisório, ele é de grande importância a ser abordado, especialmente porque a mídia muitas vezes apresenta informações sobre esse assunto sem o devido aprofundamento, o que pode gerar temores infundados nas pessoas (Dantas, 2020).

- Buracos negros

No caso dos buracos negros, as forças de maré são causadas pela forte atração gravitacional do buraco negro em objetos próximos, como estrelas ou planetas. Essas forças podem ser extremamente poderosas, esticando e distorcendo o objeto em questão até que ele se despedace. O efeito das forças de maré em buracos negros é mais evidente quando uma estrela ou planeta é puxado para dentro do horizonte de eventos, a região do buraco negro a partir da qual nem mesmo a luz pode escapar. Nesse caso, as forças de maré podem esticar o objeto até que ele se transforme em um fino fio de matéria, que é então engolido pelo buraco negro. Para um estudo bem detalhado e quantitativo, usando referenciais acelerados, sobre os efeitos de esmagamento e esticamento (ou espaguetificação), vale muito a pena a leitura dos artigos *Squashing and*

*spaghettification in Newtonian gravitation* (Machado; Tort; Zarro, 2020) e *O princípio da equivalência: Uma introdução à relatividade geral* (Machado, Tort; Zarro, 2021). No primeiro desses artigos, podemos concluir que para um corpo extenso submetido a um campo gravitacional que tem uma variação linear com a distância radial, observamos o efeito de esmagamento. Enquanto para um corpo extenso submetido a um campo gravitacional que varia com a lei do inverso do quadrado, observamos o efeito de espaguetificação.

- Limite de Roche

Em um outro contexto, as forças de maré surgem quando dois objetos, como uma estrela e um planeta, estão orbitando um ao redor do outro. Se um objeto estiver suficientemente próximo do outro, as forças de maré podem superar a gravidade do objeto mais fraco e fazê-lo se despedaçar. Esse limite é conhecido como Limite de Roche. Por exemplo, imagine um planeta que esteja orbitando uma estrela muito próxima a ela. Se o planeta estiver dentro do Limite de Roche da estrela, as forças de maré da estrela podem fazer com que o planeta se despedace e se torne um anel de detritos em torno da estrela. Isso é conhecido como "disrupção por maré" e é um processo importante na formação de sistemas planetários.

- Interferência nas medições de aceleradores de partículas

Rao, Brügggen e Liske (2020), mostram vários efeitos externos que podem afetar as medições de um acelerador de partículas. O artigo trata da possibilidade de transformar um acelerador de partículas em um observatório sensível a ondas gravitacionais astrofísicas de baixa frequência. Para isso, propõe o uso de um detector de marcação de tempo de feixe de prótons de alta precisão. O estudo de caso é feito no Grande Colisor de Hádrons do CERN e também comenta sobre fontes de ruído e a viabilidade tecnológica dos detectores necessários para essa tarefa. O texto explica que o ruído gradiente gravitacional (GG) é um efeito gravitacional de maré que imita o efeito de um fundo estocástico de ondas gravitacionais. Ele é dominante em baixas frequências e é atenuado pela alta frequência de circulação dos feixes de prótons no LHC. O texto apresenta fórmulas e cálculos para estimar o ruído GG causado por massas terrestres próximas e distantes do LHC, concluindo que o ruído GG de objetos terrestres próximos é negligenciável em comparação com o efeito de ondas gravitacionais em milihertz. O texto também menciona que as marés causadas pelo Sol

e pela Lua causam uma ligeira deformação do túnel do LHC ao longo do período de um dia, mais especificamente, em torno de 1 mm.

- Variações do nível do mar de longo termo devido ao "Aquecimento Global"

De Mesquita (1997), em seu trabalho chamado *Marés, circulação e nível do mar na Costa Sudeste do Brasil*, realizado no Laboratório de Marés e Processos Temporais Oceânicos (MAPTOLAB) do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (USP), relata a variação de longo prazo dos níveis do mar registrados por marégrafos na região sudeste do Brasil, indicando um aumento relativo do nível do mar de cerca de 4 mm por ano ou 50 cm por século (vide figura 21 desse trabalho). No entanto, o autor chama a atenção para o detalhe de que as variações do nível absoluto global do mar obtidas por altimetria por satélite não produzem valores condizentes com essa estimativa (Woodworth, 1997) bem como os valores obtidos por métodos geológicos (Martin et al., 1987), assim como avaliações de dados de nível do mar de portos em todos os continentes (de Mesquita, 1994) não produzem valores condizentes com essa estimativa. De Mesquita ainda acrescenta que há alguma coisa ainda a ser resolvida nessa questão. Entretanto, qualquer que seja a solução a ser encontrada, o fato é que há fortes evidências de que a costa brasileira está submergindo, incluída a região Sudeste, à níveis maiores que o que se supõe estar aumentando globalmente o nível relativo do mar (Mesquita, 1998). Para resolver essa questão, estão sendo programadas medições *Global Positioning System* (GPS) e gravimétricas de alta precisão na área dos marégrafos para determinar se o geoide está mudando e o valor do movimento vertical do terreno na região sudeste. O objetivo é encontrar a resposta procurada sobre os efeitos do aquecimento global na região sudeste do Brasil.

Pelo exposto até o momento, vemos que a Teoria do Equilíbrio para as marés, fazendo uso da gravitação universal de Newton e de aspectos dos movimentos da Terra e da Lua, permite a compreensão de vários aspectos observáveis das marés. Porém, é claro que há limites nessa teoria que foram superados de acordo com as teorias ondulatórias para as marés (vide mais no Apêndice **D**).

A seguir, oferecemos um resumo histórico das principais explicações das marés (quadro 2). Se o leitor desejar aprofundar-se nos pormenores históricos, convidamo-lo a consultar o apêndice **D**.

Nome	Resumo de sua contribuição
Aristóteles (384 – 322 a.C.)	Séc. III a.C.: propôs que o Sol movia os ventos, que por sua vez empurravam as águas do mar, e que os grandes rios que fluem para o oceano são vistos como a causa das marés.
Píteia de Massália (380 – 310 a.C.)	Séc. III a.C.: identificou que a amplitude dessas marés variava conforme as fases da Lua.
Seleuco de Selêucia (190 – 150 a.C.)	Séc. II a.C.: explicou que as duas fontes de perturbação – a translação da Lua e a rotação da Terra – atuavam juntas para criar as marés por meio de uma pressão do ar.
Posidônio (135 – 51 a.C.)	Séc. I a.C.: distinguiu os três períodos diário, mensal e anual das marés, atribuindo-lhe a influência dos astros e, particularmente, a Lua como causa.
Quintus Curcius (século I)	Séc. I d.C.: descreve o primeiro registro de um contato significativo com as marés, sendo fora do ambiente mediterrâneo.
Straborn (63 a.C. – 25 d.C)	23 d.C.: apresentou uma síntese das observações das marés feitas até aquele momento.
Plínio, O Velho (23 – 79 d.C.)	Séc. I d.C.: explica que a causa das marés consiste em uma certa simpatia entre o elemento da água e a Lua.
Cláudio Ptolomeu (90 – 168 d.C.)	Séc. II d.C.: ofereceu uma visão astrológica sobre a relação entre o movimento da Lua e as marés.
Sexto Empírico (160 - 210) e Plotino (205 – 270)	Por meio da “simpatia”, explicaram a influência da Lua nas marés.
Beda, O Venerável (673 – 735)	725 d.C.: Explicou que o vento poderia adiantar ou atrasar a maré, e foi o primeiro a se referir ao estabelecimento de um porto, ou seja, o atraso na ocorrência da maré pode ser diferente em portos da mesma costa.

Zakariya al Qazwini (1203 – 1283)	1235: afirma que o fluxo da maré é causado pelo Sol e pela Lua que aquecem as águas, fazendo com que elas se expandam.
Federico Chrisogono (1472 – 1538)	1528: observou que as marés são influenciadas pelos efeitos combinados do Sol e da Lua, sendo somados durante a Lua Cheia e a Lua Nova e subtraídos durante a quadratura. No entanto, ele considerou erroneamente que a influência das marés é cancelada durante a quadratura, o que difere da teoria moderna. Deduziu o ciclo anual das marés, mas deixou de considerar a diferença entre as duas marés diárias.
Federico Delfino (1477 - 1547), Ludovico Boccaferri (1482 - 1545), Girolamo Cardano (1501 - 1576), Annibale Raimondo (1505 - 1591), Claude Duret (1570 - 1611), Giovanni Paolo Galluccio (1538 - 1621) e Florido Ambrosio Patavani	Final do século XVI e início do século XVII: basearam-se explicitamente nas teorias de Chrisogono em suas próprias obras sobre marés. Todos esses autores explicaram os fenômenos das marés com base na posição do Sol e da Lua.
Júlio César Scaliger (1484-1558)	1557: sugeriu que não só a Lua, mas também a oscilação da água do mar entre as costas da América e Europa eram responsáveis pelo fluxo das marés.
Andreas Cesalpino (1519 – 1603)	1571: o fluxo e refluxo do mar seria um movimento libratório causado pela Terra, e não diretamente pelo fluido.
Girolamo Borro (1512 – 1592)	1577: fez relações das marés com a Lua, mas justifica a ação lunar a partir de sua luminosidade, que provocaria o aquecimento das águas causando o fluxo e o refluxo do mar.

Francesco Patrizi (1529 - 1597)	1591: forneceu uma história pormenorizada das teorias sobre as causas das marés; citou a investigação de Chrysogonos sobre a relação temporal entre as marés e o movimento da Lua; desenvolveu uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam.
Paolo Sarpi (1552 – 1623)	1592: baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra como sendo um círculo excêntrico onde o Sol não está em seu centro.
Johannes Kepler (1571 – 1630)	1609: as marés eram causadas por uma força de atração da Lua e do Sol. Kepler acreditava que esta força era algum tipo de magnetismo, influenciado pelas teorias de Gilbert. Veja Gilbert mais a frente.
Francis Bacon (1561 – 1626)	1611: propõe que o movimento do cosmos seja de oriente para ocidente, e que isso explica os fluxos e refluxos das águas oceânicas. Os refluxos ocorrem quando as águas são interrompidas pelos continentes e as marés são uma consequência disso.
Marco Antonio de Dominis (1560 - 1624)	1624: afirma que as marés são causadas pela interação do Sol e da Lua, e destaca características como a variação geográfica na altura e as correntes de maré horizontais. Ele também tenta conciliar teoria e observação, apresentando duas teorias de maré diferentes.
Galileu Galilei (1564 – 1642)	1632: baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra considerada como um círculo com o Sol em seu centro. Negou a ação da Lua e do Sol sobre as marés. Sua teoria das marés foi “criada” para tentar provar que a Terra se movia. Compare com a teoria de Paolo Sarpi.

Jeremiah Horrocks (1618 – 1641)	1640: realizou as primeiras observações sistemáticas das marés para fins científicos no Reino Unido.
René Descartes (1596 – 1650)	1644: explica que o movimento da Lua pressiona a matéria entre ela e a Terra, afetando as águas do planeta. Cada astro tem seu próprio céu, e o terrestre é oval. A influência da Lua é maior nas extremidades do céu da Terra, resultando em marés altas durante as fases de Lua Cheia e Nova. A influência lunar é mais forte nos equinócios, causando marés altas, e mais fraca nos solstícios, que têm marés baixas.
Nicolás Mascardi (1625 – 1673)	1650 – 1674: aproximava-se mais da proposição de influência lunar formulada por Descartes, embora também não tenha caracterizado as marés quanto a sua intensidade, como propôs Galileu Galilei. Referiu-se à interferência de especificidades locais em suas observações.
William Gilbert (1544 – 1603)	1651: obra publicada postumamente. Sugeriu explicitamente que havia uma atração entre a Lua e a água. Sua teoria magnética influenciou fortemente as próximas teorias, em especial Johannes Kepler.
Giambattista Baliani (1582 - 1666)	1651: tentou resolver a limitação da explicação galileana das marés adicionando um terceiro movimento da Terra em torno da Lua. Foi uma teoria considerada estranha à época, mas John Wallis aproveitou sabiamente essa ideia e a adotou, mais tarde, em sua teoria das marés. Veja John Wallis mais a frente.

Athanasius Kircher (1602 – 1680)	1655: sugeriu que as marés eram causadas pelo efeito da Lua sobre a luz do Sol. A luz pura do Sol seria infectada com uma “qualidade nitrosa” ao ser refletida na Lua e, passando para a Terra, causa turbulência e elevação do nível do mar. Assim, os “eflúvios nitrosos da Lua” fazem com que a água seja empurrada e puxada através de uma rede global de “passagens ocultas e ocultas”.
John Wallis (1616 – 1703)	1666: estende a versão da teoria de Galileu, sugerindo que as oscilações das marés resultam da rotação da Terra combinada, não apenas com o movimento da Terra ao redor do Sol, mas também com seu movimento ao redor do centro de gravidade do sistema Terra-Lua.
Henry Philips (?)	1668: fez uma modificação na previsão do momento das marés altas em Londres através do ciclo de sizígia e quadratura.
Thomas Philipot (falecido em 1682)	1673: desenvolve uma teoria química das marés: o “fluxo da maré” (sua subida) era devido a sais voláteis “sal ou espírito amoniacal, que é envolto nas entranhas do mar” que foram liberados pelas “impressões do sol e da lua”.
John Flamsteed (1646 – 1719)	1661: utilizou medições dos horários das marés altas em Tower-Wharfe. 1682: o mesmo em Tower-Wharfe e Greenwich no verão desse ano. Tais observações, juntamente com seus conhecimentos astronômicos sobre as órbitas da Lua e do Sol, permitiram a produção de uma tabela de marés para os horários das marés de Londres para 1683-88 e, por meio de ajustes simples, horários (um tanto imprecisos) das marés em outros lugares.

Isaac Newton (1642 – 1727)	1687: formulou a teoria estática das marés com base na lei da gravitação universal.
Jacques Cassini (1677 – 1756)	1711 – 1716: analisou os tempos e alturas das águas altas e baixas que foram registrados em Brest. Cassini interpretou esses dados como suporte para a teoria das marés de Descartes.
Colin Maclaurin (1698 – 1746)	1740: provou o que Newton presumiu intuitivamente, que a forma de um oceano esférico em equilíbrio estático com a força das marés induzida por um corpo perturbador (ou seja, a Lua ou o Sol) é um esferoide prolato (uma forma como uma bola de rúgbi com um eixo de simetria alongado), cujo eixo principal aponta para o corpo.
Leonhard Euler (1707 – 1783)	1741: mostrou que era a componente horizontal, e não vertical, do campo de força que levava ao movimento das marés.
Antoine Cavalleri (1698 – 1765)	1741: baseou-se na obra de Descartes, embora ele discordasse da teoria anterior devido à falta de uma contribuição importante das marés solares. Ele também discordou da teoria da gravitação de Newton e, em vez disso, perseverou em um desenvolvimento infrutífero da teoria cartesiana dos vórtices.
Murdoch Mackenzie (1712 - 1797)	1749: realizou observações sobre as marés em Órcades.
Immanuel Kant (1724 – 1804)	1754: introduziu o aspecto da fricção das marés.
Nevil Maskelyne (1732 – 1811)	1767: publicação do <i>Nautical Almanac</i> sob sua direção.
William Hutchinson (1715 - 1801)	1764 – 1767: quatro anos de observações do porto de Liverpool.

Richard (1718 - 1775) e George Holden (1723 - 1793)	1770: primeira tabela de marés confiável e de acesso público sendo produzida para o porto de Liverpool, ajustada a partir do método genérico de Bernoulli.
James Ferguson (1797 – 1867)	1775: propôs um “exercício” para a construção de um relógio de maré.
Pierre de Laplace (1749 – 1827)	1775: introduziu o potencial das marés (“fórmula das marés de Laplace”), expressando o potencial de maré em função da latitude, declinação e ângulo horário.
Daniel Bernoulli (1700 – 1782)	1781: seu ensaio introduziu a chamada Teoria do Equilíbrio, que descreve a estrutura temporal e espacial da maré de equilíbrio devido à combinação da Lua e do Sol. Combinou os dois esferoides prolatos individuais em uma forma geral e introduziu as órbitas lunar e solar e a rotação da Terra na discussão, de modo que a dependência temporal da maré de equilíbrio em qualquer ponto da superfície da Terra pudesse ser parametrizada.
Jérôme Lalande (1732 – 1807)	1781: registrou em sua tabela sobre o estabelecimento – o atraso entre o trânsito da Lua pelo meridiano e a próxima maré alta durante a sizígia.
Thomas Young (1773 - 1829)	1821: teoria baseada na fórmula integral das <u>oscilações forçadas</u> .
William Whewell (1794 – 1866)	1833: sistematizou dados disponíveis sobre marés em diferentes portos num mapa de linhas cotidais.
George Biddell Airy (1801 - 1892)	1842: teoria das marés com base numa bacia oceânica de morfologia simples e com uma <u>profundidade uniforme</u> .

William Ferrel (1817 – 1891)	1853: apontou que a fricção das marés causando um alongamento do dia levaria a uma aparente aceleração nos movimentos dos corpos celestes.
Charles Delaunay (1816-1872)	1865: retomou o desenvolvimento da teoria da perturbação lunar e chegou a uma conclusão semelhante à de Ferrel. A questão da fricção das marés se tornou amplamente conhecida nos círculos científicos.
George Airy (1801-1892)	1866: descobriu que o atrito das marés, além de alongar o dia, deveria causar uma distância crescente da Lua da Terra.
William Thomson – Lord Kelvin (1824-1907)	1863: desenvolveu uma teoria que defendia que a Terra era um sólido elástico (marés terrestres). Thomson introduziu a poderosa ferramenta de análise harmônica na teoria das marés.  1868: inventou a primeira máquina de previsão de marés.
George Darwin (1845 – 1912)	1882: realizou 33 observações nos portos de Inglaterra, França e Índia. Encontrou a razão entre a altura da maré oceânica na Terra elástica e na Terra rígida, provando assim a existência das marés terrestres (publicação na revista <i>Nature</i> ).
Rollin Harris (1863 – 1918)	1904: descobriu e explicou o caráter anfidrômico geral das marés oceânicas.
Poincaré (1854-1912)	1910: apresentou análises bem convincentes e sistematizadas sustentando a teoria de Harris.
Oskar Hecker (1864 – 1938)	1907: observou a inclinação de maré, concordando com o resultado de Darwin.
Augustus Love (1863 – 1940)	1909: descreveu as deformações elásticas da Terra.

Wilhelm Schweydar (1877 – 1959)	1914: observou as marés terrestres com um gravímetro.
Gustav Herglotz (1881 – 1953) e Leander Miller Hoskins (1860 – 1937)	Desenvolveram uma teoria para deformações elásticas da Terra não homogênea em 1905 e 1920, respectivamente. Resultou em uma equação diferencial de sexta ordem que estava, naquela época, além da capacidade de qualquer pessoa resolver.
Arthur Doodson (1890 – 1968)	1921: fez uma expansão harmônica do potencial das marés, a qual consistia em 386 componentes de diferentes períodos e amplitudes determinantes para a análise de marés numa determinada região.
Harold Jeffreys (1891 – 1989)	1920: apresentou evidências do retardo secular da rotação da Terra causado pelo atrito das marés em mares rasos.  1928: introduziu um efeito de maré diferente na rotação da Terra.
Chaim Leib Pekeris (1908 – 1993)	1940: resolveu o problema das marés nos poços.
Hitoshi Takeuchi (1920 – 2004)	1950: resolveu numericamente o problema em três equações diferenciais de segunda ordem de Herglotz e Hoskins.

**Quadro 2.** Resumo histórico do conhecimento das marés. Fonte: autor, 2023.

## Capítulo 5

### Aplicações da Sequência Didática

A sequência didática foi aplicada no primeiro semestre de 2021, no auge da pandemia da covid-19, em duas turmas presenciais do EM (1ª e 3ª séries) de um colégio e curso particular, da zona norte do Rio de Janeiro (RJ), unidade Vila da Penha, cujo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) para essa região, com o censo de 2000, foi de 0,909, ficando na 21ª posição de 126 bairros analisados (IBGE, 2000)<sup>50</sup>. Uma primeira aplicação para a 1ª série do EM com 7 alunos e uma segunda aplicação para a 3ª série do EM com 5 alunos.<sup>51</sup>

Como todo instrumento de avaliação, a elaboração de testes de múltipla escolha exige muito esforço por parte do elaborador: é preciso ter amplo domínio conceitual, definir claramente os objetivos de cada questão, ser capaz de criar opções com coerência científica e conhecer o perfil do público-alvo. Entretanto, frequentemente o elaborador das questões é surpreendido com interpretações bem diversas das que ele imaginou ao escrevê-las. Dependendo do conteúdo que está sendo avaliado no teste, a interpretação por parte dos respondentes pode ser fortemente influenciada por suas vivências pessoais. Também tem que ser levado em conta que nem todos os respondentes têm a mesma motivação e nem respondem ao teste com a mesma seriedade; principalmente em questões mais difíceis é grande a probabilidade de a resposta ser dada ao acaso, reduzindo a sua confiabilidade. Assim, a elaboração de um teste de múltipla escolha é um processo complexo, que geralmente exige avaliação e aperfeiçoamento do instrumento após cada aplicação (Saraiva; da Silveira; Steffani, 2011). O presente capítulo ilustra esse processo de elaboração de um teste sobre as marés e sua aplicação em duas turmas de estudantes do EM.

---

<sup>50</sup> O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é uma medida que avalia o nível de desenvolvimento humano de uma determinada região, levando em conta indicadores de saúde, educação e renda. Um IDH de 0,909 é considerado muito elevado e indica que a região em questão tem um nível de desenvolvimento humano muito bom. No caso específico mencionado, o bairro de Vila da Penha, no município do Rio de Janeiro, ter um IDH de 0,909, em 2000, colocou-o na posição de 21º lugar entre as 126 regiões analisadas, o que indica que estava entre as regiões com os maiores níveis de desenvolvimento humano no município na época.

<sup>51</sup> Por conta da pandemia do covid-19, a maioria dos alunos optou por ficar em casa assistindo às aulas de forma *online*. Dessa forma, cerca de 20 alunos em cada turma não participaram da atividade.

A elaboração do teste foi baseada nos testes de Viiri (2000a e 2004) e no artigo de da Silveira (2003) com algumas adaptações com relação ao nível de dificuldade do conteúdo abordado, pois, em parte, o público-alvo dos autores acima, eram professores também. Como nosso público-alvo se restringiu aos alunos do EM, foi necessário retirar muitas questões referentes ao ciclo anual das marés (solsticiais e equinociais) e o período diurno das marés. Adicionalmente, o teste concentrou-se somente em questões referentes ao assunto marés, pois testes dos autores citados também contemplavam questões sobre o formato da Terra e o sistema solar e apenas sobre gravidade, que antecediam as questões somente de marés. Houve também uma redução no número de questões e no número de alternativas em cada questão, de maneira a deixar o teste mais compacto para evitar possíveis desânimos por parte dos estudantes frente a um teste demasiado longo, o que provavelmente aumentaria a vontade de responder ao caso (da Silveira, 2011). Algumas questões foram acrescentadas sem equivalentes nos testes citados.

O pré-teste foi aplicado no mesmo dia da instrução formal, antecedendo-a, enquanto o pós-teste foi aplicado uma semana depois. Em entrevistas individuais e posteriores ao pré-teste, no mesmo dia em que este foi aplicado, a maioria dos alunos, da turma que participou da primeira aplicação, alegou não ter compreendido o que os enunciados das questões 11, 12, 13 e 14 do pré-teste, queriam cobrar. Dessa forma, o pré-teste teve de ser revisado, reelaborando essas questões e reduzindo o número total de questões. Como, a princípio, o pré e o pós-teste teriam as mesmas questões, o pós-teste acabou ficando com questões diferentes da do pré-teste por conta dessas dificuldades relatadas pelos alunos. Ambos os testes são compostos por questões múltipla-escolhas. O pós-teste teve de ser aplicado de forma *online* devido ao agravamento da covid-19 na época.

A instrução foi realizada na forma de uma aula expositiva-dialogada com duração de 1 h 40 min (2 tempos de aulas, tradicionalmente), para que ninguém pudesse criticar a sequência em termos de inviabilidade por questões de tempo. Além disso, devido às inúmeras imagens complexas usadas, preferiu-se realizar a aula usando PPT para que otimizasse o tempo de sala de aula.

As questões do pré-teste foram pensadas para fazer o aluno refletir com antecedência sobre os temas a serem tratados, motivando-os a acompanhar o desenvolvimento da discussão. As respostas ao pré-teste também foram úteis para orientar a preparação da aula, pois permitiram identificar dificuldades e interesses dos

alunos, com base no levantamento bibliográfico apresentado no capítulo 3. Por questão de espaço, não será apresentado aqui todas as respostas dadas pelos alunos, apenas será mostrado as consideradas mais informativas.

## 5.1 Primeira Aplicação

Por conta da pandemia do covid-19, a maioria dos alunos optou por ficar em casa assistindo às aulas de forma *online*. Dessa forma, apenas 7 alunos da 1ª série do EM participaram de toda a sequência dessa primeira aplicação. Os alunos da 1ª série do EM se demonstraram interessados no tema de marés e a maioria participou ativamente fazendo perguntas e dando respostas, com exceção de alguns poucos alunos mais tímidos, mas que não se dispersaram durante a aula.

A aula já começa com uma pergunta motivadora altamente engajadora: “*Se a Lua exerce influência nos mares e oceanos por que não influenciaria nos fluidos corporais?*”<sup>52</sup> Em seguida, resgata-se alguns conceitos newtonianos básicos para introduzir a ideia de campo gravitacional não uniforme. Exercícios mentais relativamente muito simples que nenhum aluno demonstrou dificuldade em respondê-los. Muito pelo contrário, a aula se deu de forma bem dinâmica com o professor perguntando e os alunos respondendo tudo de forma coerente. No que segue, diferencia-se os efeitos das forças de um corpo atrator para o caso de uma partícula e de um corpo extenso, usando-se de analogias e recursos lúdicos encontrados na própria literatura, tanto nos artigos capítulo 3 quanto em livros universitários. Aqui, os alunos não sentiram dificuldade em compreender a formação dos bojos de marés com o uso dessas analogias. Vale enfatizar que a abordagem qualitativa, sem a consideração da Terra como referencial acelerado, se demonstra extremamente facilitadora de compreender. Adicionalmente, os alunos conseguiram compreender de início que não importa a força gravitacional em si, mas a diferença dessa força no corpo extenso (Terra) devido ao campo gravitacional não uniforme da Lua. Dando continuidade à sequência, explica-se a periodicidade das marés, de forma simples, sem considerar o atraso das marés entre um dia e outro.<sup>53</sup> Logo em seguida, adiciona a contribuição do Sol nas marés,

---

<sup>52</sup> Retirada do artigo de da Silveira (2003). Mas o artigo Quincey. Why we are unmoved as oceans ebb and flow. *Skeptical Inquirer*, v. 18, p. 509-515, 1995, já inicia com essa indagação também e os jornais de notícias utilizados por Sawicki como visto no capítulo 3.

<sup>53</sup> Curiosamente, apenas um aluno, no final da aula, perguntou sobre esse atraso, pois ele era surfista. Portanto, apenas para esse aluno foi dada uma explicação mais próxima da realidade. No entanto, é de

correlacionado as composições lunares e solares, por meio de figuras bem ilustrativas e conhecidas nas literaturas nacional e internacional. Caminhando para o final, três perguntas retiradas do Física Conceitual são adaptadas e feitas para os alunos e mais duas perguntas envolvendo a prévia observação de vídeos no YouTube para respondê-las. Destas, a primeira é retirada da tese do Ferreira (2016), sobre o filme *Todo o Poderoso* (2003), e a segunda, é retirada do filme *Interstellar* (2014). Um dos pontos altos da aula é o final de fato, a correlação com o fenômeno das marés e os buracos negros, pois todos ficam surpresos em saber que forças de marés não se restringe a um assunto relacionados aos mares e o próprio assunto “buracos negros” é por si só atrativo, mesmo que apenas sirva para matar a curiosidade.

## 5.2 Segunda Aplicação

A segunda aplicação da sequência didática também foi realizada nos mesmos moldes da primeira. A única mudança estrutural foi a revisão do teste. No entanto, na 3ª série do EM, 9 alunos participaram do pré-teste, mas apenas 5 alunos participaram de toda a sequência. Adicionalmente, todos os alunos dessa série não estavam tão engajados na atividade, demonstrando muito mais preocupações em saber se o conteúdo era cobrado no vestibular.<sup>54</sup> Não se pode deixar de levar em consideração que a motivação para o estudo é um fator extremamente importante para o bom desempenho. Não à toa, como se verá mais a frente, o desempenho dos estudantes dessa série não foi tão expressivo quanto o da 1ª série.

A aplicação do pré-teste, da sequência de aula e a aplicação do pós-teste aconteceu de forma semelhante ao da outra série. O que muda é a participação dos alunos da 3ª série, muito mais apáticos e desinteressados. Somente no final da aula, quando se correlaciona com os buracos negros, que demonstraram real interesse em entender o fenômeno.

---

considerar para próximas aplicações em sala de aula uma indagação motivadora: *muitas pessoas do RJ vão a praia e acham que a maré sobe e desce sempre no mesmo horário. Será isso verdade?*

Adicionalmente, para um estudo sobre marés mais relacionado com propagação de ondas, vide o artigo “*Understading Tides* (Hicks, 2006)” que aborda nos capítulos 6, 7, 8 e 9 as ondas de maré, geralmente confundidas com os *tsunamis*.

<sup>54</sup> Ainda que a resposta fosse positiva, vide questão 110, 2º Dia – Caderno 12 – Verde (Enem Libras 2017) – Aplicação regular, dentre outras que corroborariam, nunca foi o intuito dar ênfase ao vestibular. Mas isso, certamente, foi um fator para que muitos não demonstrassem interesse, tampouco engajamento na sequência.

Semelhantemente ao que ocorreu na 1ª série, as entrevistas com os alunos no pré-teste, da 3ª série, evidenciaram inúmeros chutes e alguns conhecimentos prévios de que a Lua teria alguma relação com as águas, mas sem saber elaborar alguma explicação com as próprias palavras. Por outro lado, a maioria dos alunos, conseguiram compreender o que o enunciado das novas questões do teste revisado. Ainda assim, a observação das respostas dadas pelos alunos dessa série não se demonstrou de forma diferente das analisadas anteriormente.

### 5.3 Entrevistas

Participaram das entrevistas um total de 16 alunos (7 da 1ª série e 9 da 3ª série). Em entrevista com os alunos no pré-teste, a maioria dos alunos alegaram que, em quase todas as questões, chutaram as alternativas, demonstrando pouquíssimo conhecimento sobre o fenômeno, mesmo que sejam moradores de áreas litorâneas e frequentadores constantes de praias do RJ. As entrevistas foram realizadas fora do período de aula, logo depois da instrução sobre marés, e de forma individual, sendo conduzidas mediante as respostas que os alunos ofertavam. Por vezes, pedia-se para que representasse uma configuração específica de marés por meio de um desenho para captar melhor a informação que o aluno apresentava. Por outro lado, a maioria dos alunos também alegou já ter ouvido falar, em algum momento da vida, que as marés teriam a ver com a Lua. As questões **11**, **12**, **13** e **14**, da primeira versão do teste, não foram bem compreendidas pelos alunos. Ainda que tais questões estivessem baseadas nas imagens do artigo *Understanding Tides* (Hicks, 2006, p.12-14), os alunos realmente não compreenderam os esquemas das composições de maré lunares e solares. Essas questões foram avaliadas por dois professores-doutores da UFRJ, descartando as questões **11** e **12** por uma única questão, e reformulando as questões **13** e **14**. Dessa forma, o teste foi para sua segunda e última versão. As questões do pós-teste contemplam os temas centrais tratados durante a aula. No entanto, reduziu-se para 13 questões por conta das alterações das questões mal compreendidas. Consequentemente, não houve, por parte dos alunos, nenhuma dificuldade em interpretar as novas questões. Um dos professores da UFRJ, o qual participou da análise das questões mal formuladas, aprovou os novos ajustes.

As perguntas norteadoras das entrevistas foram baseadas no apêndice **A** do artigo de Ucar (2007, p.208-211), com pequenas adaptações para melhor alinhamento

com o teste elaborado. A observação das respostas dadas pelos alunos no pré-teste e pós-testes foi reveladora e se discutirá algumas delas a seguir. Para preservar o anonimato dos alunos, utilizou-se numerações ordinárias para fazer referência a suas respostas. Essa numeração não está relacionada ao grau de importância que atribuímos às respostas.

1. Em relação às áreas litorâneas, o fenômeno das marés oceânicas pode ser mais bem descrito como um movimento de

- (A) ressaca dos mares.
- (B) avanço e recuo do mar.
- (C) mudanças nas correntes marinhas.
- (D) rebentações intensas na beira das praias.

Dentre as alternativas redigidas, a que melhor descreve o fenômeno das marés é a alternativa (B). Aliás, tentou-se trazer a nomenclatura usada ao longo da história (fluxo e refluxo dos mares), como visto no capítulo 4, mas de forma atualizada. Por isso, a escolha dos verbetes “avanço” e “recuo” para se aproximar do vocabulário do público-alvo. As marés oceânicas são causadas por diversos fatores além das ações gravitacionais. Por essa razão, é bem complicado elaborar uma pergunta que não tangencie ou converse com as outras alternativas, o que forçou a inserção da parte “mais bem descrito” no enunciado da questão. A alternativa (A), por exemplo, não deixa de ser uma elevação “anormal” no nível do mar, mas associada aos sistemas atmosféricos de baixa pressão no oceano, com ventos intensos e tempestades. A alternativa (C) aborda as correntes marinhas, que podem ser afetadas pela influência dos ventos, pela diferença de temperatura, densidade e salinidade das águas e pelas próprias marés. Sobre a alternativa (D), à medida que as ondas da superfície do oceano se aproximam da costa, elas “quebram”, formando a superfície espumosa e borbulhante chamada de zona de rebentação, também conhecida como zona de *surf* (Pinet, 2008). A seguir, algumas respostas interessantes de alguns alunos:

Aluno 1: “Quando vou a praia, todo o mundo fala que a maré sobe num horário e depois desce.”

Esse aluno marcou o gabarito, e sua justificativa está baseada em relatos do senso-comum que converge com o conhecimento científico.

Aluno 3: “Já ouvi falarem que quando o mar está agitado é porque a maré está aumentando.”

Esse aluno marcou o distrator (A), e sua justificativa está baseada em relatos do senso-comum que diverge do conhecimento científico. A ressaca é popularmente descrita como “mar muito agitado”, levando em consideração a experiência vivida nas praias.

Aluno 6: “Achei que as marés fosse um fenômeno maior, tipo numa escala grande.”

Esse aluno marcou o distrator (C), e sua justificativa está baseada em um fator de escala do fenômeno. Com efeito, as marés é um fenômeno com características globais, por conta da formação do bojo nos dois lados da Terra, diametralmente opostos. Então, o aluno que a assinalou, não está equivocado, de certa forma, quando o associa ao outro fenômeno – correntes marinhas, também em escala global.

2. As fotos a seguir foram tiradas no mesmo local, praia do Forte, Cabo Frio, RJ, em diferentes horários, no mesmo dia. A figura da esquerda mostra a água cobrindo quase toda a faixa de areia, enquanto a figura da direita mostra a água mais recuada.



Qual é a causa principal para o fenômeno ilustrado?

- (A) Ventos fortes.
- (B) Atração gravitacional.
- (C) Mudanças climáticas.
- (D) Pequenos maremotos.

Dentre as alternativas redigidas, a causa *principal, primária*, para o fenômeno das marés é a alternativa (B). O uso do termo “principal” no enunciado é justamente para evitar dubiedade e/ou duplo-gabarito. Mas é interessante notar a justificativa de alguns alunos ao assinalarem o distrator (A):

Aluno 2: “Quando o vento tá forte, o mar fica agitado, aí o mar fica intenso.”

Aluno 5: “Os ventos deixam o mar violento.”

Aluno 6: “O mar deve ser meio que empurrado pelo vento.”

Percebe-se que muitas dessas respostas não são tão distantes do considerado cientificamente aceito, aproximando-se, inclusive, das explicações dadas por muitos cientistas, ao longo da história, conforme visto no capítulo 4.

Quanto ao distrator (C), tem-se:

Aluno 3: “Acredito que as marés tenham a ver com as estações do ano.”

De fato, tem, conforme visto no capítulo 4 também (marés solsticiais e equinociais), só não é a causa principal.

**3.** A principal força responsável pelas marés é a

- (A) de impacto entre as placas tectônicas.
- (B) das ondas se encontrando.
- (C) de gravidade.
- (D) dos ventos.

Aqui, apareceram algumas incoerências, pois a alternativa mais marcada foi o gabarito (C). No entanto, é de se esperar, por lógica, que quem marcasse (C) para a questão 3, marcasse (B) para a questão 2. Ao serem questionado sobre isso, todos, sem exceção, alegaram que chutaram.

**4.** De maneira geral, quantas marés altas ocorrem por dia?

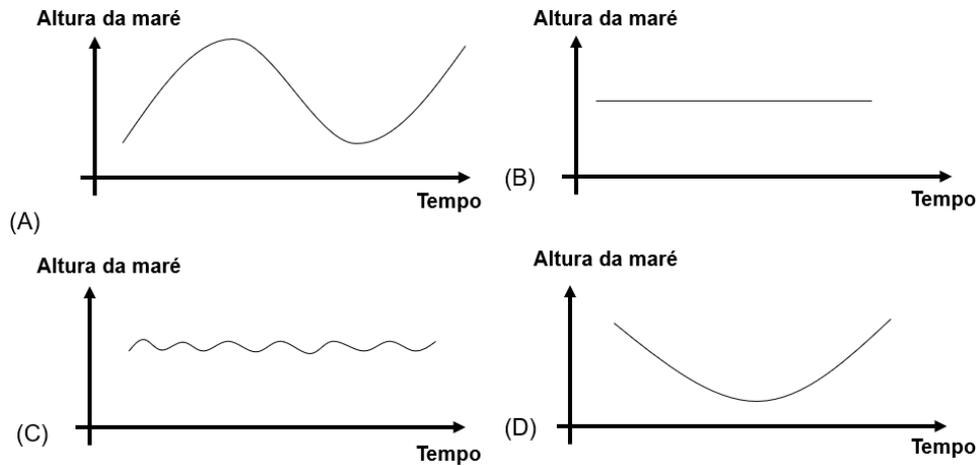
- (A) 1
- (B) 2
- (C) 3
- (D) 4

A maioria dos alunos responderam o gabarito (B), poucos alegando acerto casual, muitos alegando conhecimento prévio, ou seja, já ouviram ou perceberam que “a praia cobria a faixa de areia duas vezes no dia”.

Aluno 7: “Meu professor de *surf* disse para a gente que a água cobre a praia umas duas vezes por dia.”

Esse aluno pratica o esporte *surf*, alegando que já tinha esse conhecimento e, adicionalmente, descrevendo que os horários das marés se diferenciavam de um dia para o outro. Só não sabia explicar o porquê disso, mas não foi um ponto explorado em sala de aula.

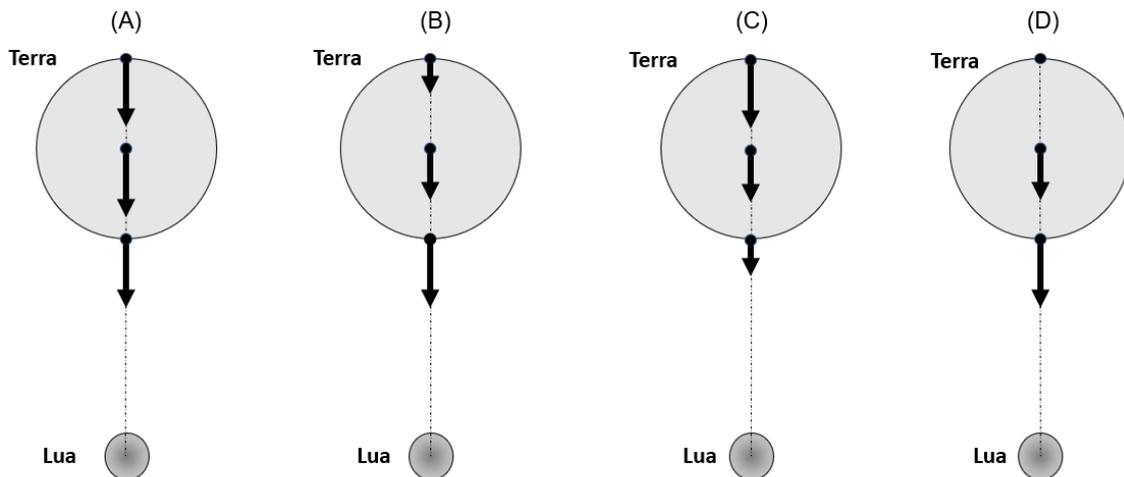
5. De maneira geral, qual gráfico que melhor representa a altura da maré ao longo de um dia?



A maioria dos alunos responderam o gabarito (A), poucos alegando acerto casual, muitos alegando, por coerência com a questão anterior, que são duas marés altas por dia. Um aluno assinalou (C), pensando no perfil das ondas e outros dois alunos assinalaram (D). Apesar de ser um esboço, o problema da (D) é que não mostra duas marés baixas também (informação oculta no enunciado, claro).

6. Qual das seguintes configurações Terra-Lua melhor corresponde à intensidade da força (representada pelas setas) que a Lua exerce em cada ponto representado na Terra?

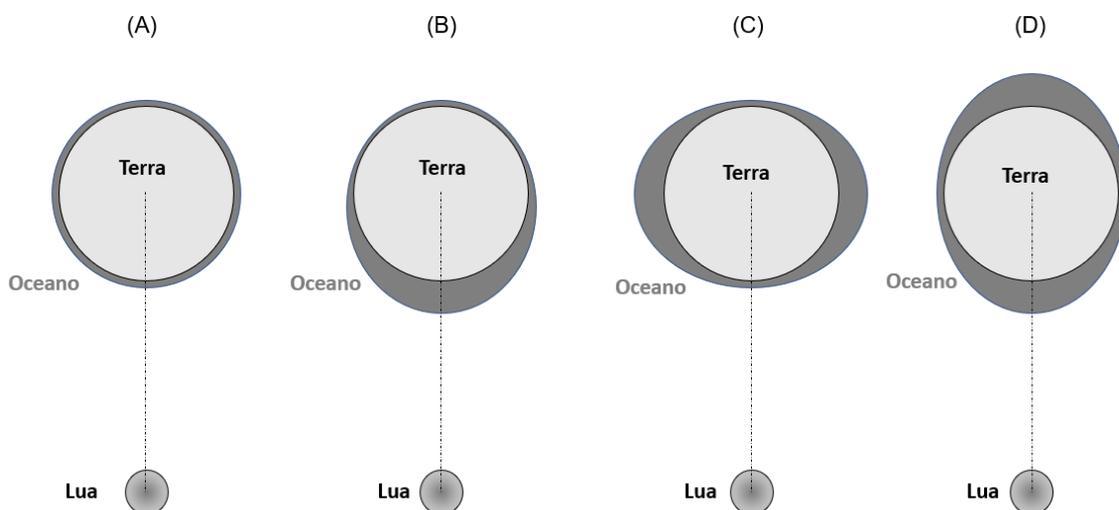
**Dados:** as figuras estão fora de escala.



A maioria assinalou o gabarito (B), lembrando das aulas de Gravitação, em que a intensidade da força gravitacional varia com o inverso do quadrado da distância entre os astros. Porém, houve uma frequência relativa de marcação das outras alternativas, por parte dos estudantes que alegaram terem esquecido da lei da gravitação universal e chutaram.

7. Qual das seguintes configurações Terra-Lua melhor corresponde ao perfil de marés oceânicas na Terra?

**Dados:** as figuras estão fora de escala.



A maioria dos estudantes assinalou a alternativa (B), o que já era esperado, até mesmo de forma lógica e coerente com a questão anterior. Mas isso também comprova o fato de que não é tão intuitivo que existem dois bojos de marés diametralmente opostos. Se se demonstrou um desafio para Galileu, imagina para os estudantes! Por outro lado, a segunda alternativa mais marcada foi a (C), em grande parte pelos mesmos alunos que marcaram (B) na questão 4 e (A) na questão 5, ou seja, argumentaram que tentaram correlacionar o fato de terem duas marés altas por dia com o perfil das marés oceânicas. Ao mesmo tempo, revela, de certa forma, que os alunos têm dificuldade de correlacionar a influência lunar com as marés. A minoria que marcou o gabarito (D), alegou acerto casual.

**8.** De maneira geral, quando ocorrem as marés altas mais altas?

- (A) Durante as fases de Lua Nova e Cheia.
- (B) Durante as fases Quarto Crescente e Cheia.
- (C) Durante as fases Quarto Minguante e Lua Nova.
- (D) Durante as fases Quarto Crescente e Quarto Minguante.

Muitos alunos até marcaram o gabarito (A), mas alegando que já ouviram dizer que a Lua tem alguma coisa a ver com as águas e foram influenciados pela cultura popular de atribuir como causa de vários fenômenos naturais as fases mais famosas, Cheia e Nova. Percebe-se que o imaginário popular das crenças míticas da Lua pode influenciar algumas respostas. Uma observação importante aqui é que as alternativas (A) e (D) acabam ficando mutuamente excludentes. Quando o questionário foi elaborado, o autor não tinha conhecimento de que isso não é aconselhável, pois pode ocasionar o descarte de outras alternativas por simples estratégia de eliminação de distratores, e não, necessariamente, porque o aluno consegue diferenciar o que é correta do que é errado com base no conteúdo. Em larga escala, esse efeito se acentua. Uma possível evidência que comprova esse fato encontra-se nas respostas da próxima questão. Talvez uma possível solução seria fazer mais alternativas.

**9.** De maneira geral, quando ocorrem as marés baixas mais baixas?

- (A) Durante as fases de Lua Nova e Cheia.
- (B) Durante as fases Quarto Crescente e Cheia.
- (C) Durante as fases Quarto Minguante e Lua Nova.
- (D) Durante as fases Quarto Crescente e Quarto Minguante.

A maioria dos estudantes assinalou a alternativa (D), pois por terem lido “marés baixas mais baixas”, ou seja, o antônimo da questão **8**, foram induzidos a pensarem que as outras fases da lua seriam a resposta.

**10.** Qual é a relação entre as forças de marés solares e lunares na Terra?

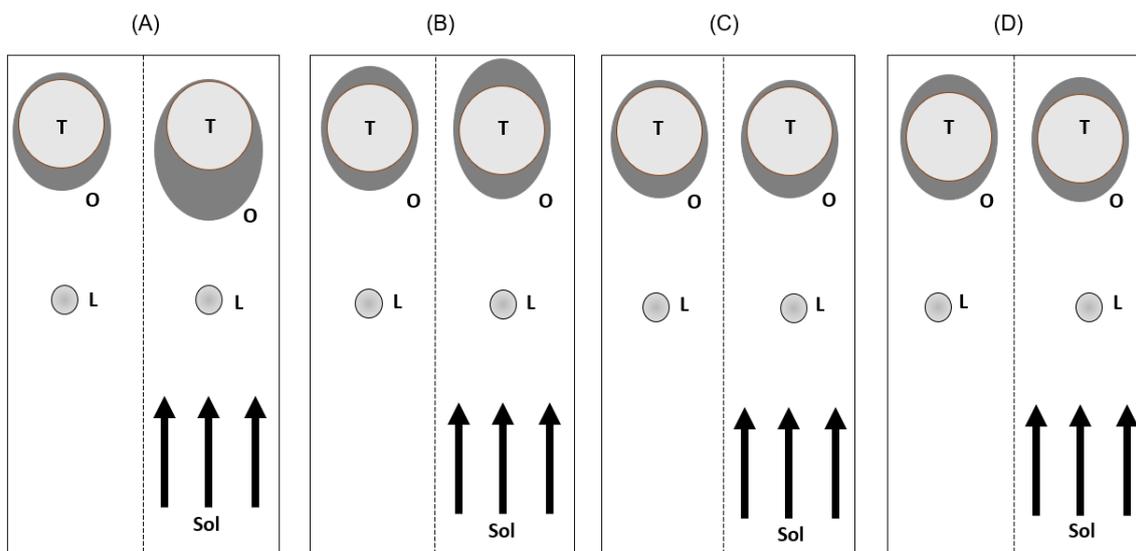
- (A) O Sol não exerce força de maré na Terra.
- (B) O Sol exerce uma força de maré maior que a Lua.
- (C) O Sol exerce uma força de maré menor que a Lua.
- (D) O Sol e a Lua exercem forças de maré iguais na Terra.

A maioria dos estudantes assinalou (C), utilizando-se do raciocínio de que o Sol estaria mais distante da Terra do que a Lua. No entanto, nas entrevistas foi lembrado pelo professor, que na lei da gravitação universal a massa também influencia. E como o Sol responde por aproximadamente 98% da massa do sistema solar, por que ele também não poderia influenciar nas marés a ponto de tal influencia ser maior que a da Lua? Quando posto esse raciocínio em voga, nenhum dos alunos soube contra-argumentar. Obviamente, não é esperado que o público-alvo não tenha conhecimento de que a força de maré é inversamente proporcional ao cubo da distância entre os astros, mas uma resposta que se esperava seria apenas a de que o fator “distância” é mais significativo do que o fator “massa”, nesse caso das forças de maré. Alguns alunos também assinalaram (A), alegando que já tinham ouvido falar que a Lua tinha alguma coisa a ver com as águas, mas o Sol não.

**11.** A melhor configuração que representa o perfil de marés, levando em consideração apenas a Lua e, em seguida, levando em consideração a ação conjunta da Lua e do Sol, está representada em

**Dados:**

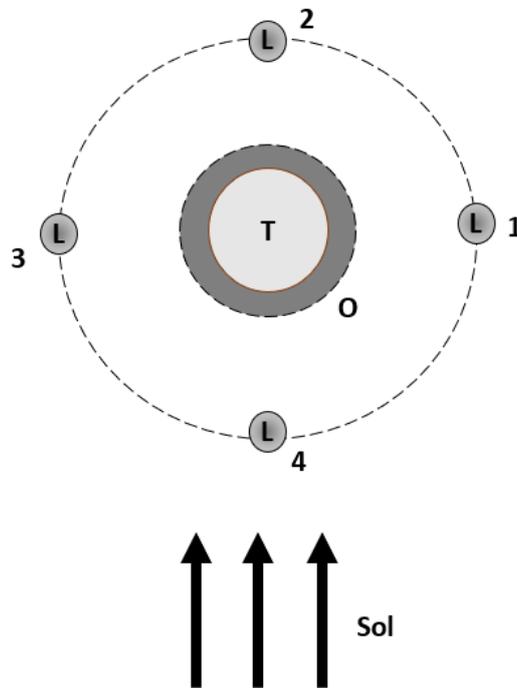
- **T:** Terra.
- **O:** oceano.
- **L:** Lua.
- **Setas:** raios solares.
- As figuras estão fora de escala.



Essa foi uma das questões alteradas, pois sua versão anterior, não foi compreendida pelos alunos, mesmo que os desenhos estivessem baseados nas imagens do artigo *Understanding Tides* (Hicks, 2006, p.12-14) como vista no capítulo 4. Os alunos tiveram muita dificuldade de entender os desenhos que representam composição das marés solares e lunares sobre a Terra. Por essa razão, preferiu-se refazer a questão de forma que os estudantes pudessem comparar as composições das marés de forma separada e não tudo em um mesmo desenho. Com esse ajuste, todos os alunos conseguiram interpretar o que o enunciado desejava.

De certa forma, a questão 10 pode influenciar a resposta da questão 11, mas uma tentativa de driblar essa situação foi justamente inserir um distrator na questão 11 que representasse o Sol não influenciando nas marés, distrator (D), em que os perfis de marés são idênticos. No pré-teste, pela confusão na compreensão textual já relatada e a necessidade de ajustes nessa questão, as respostas não revelaram coerência entre as questões 10 e 11. No pós-teste, por outro lado, todos os alunos, das duas turmas, marcaram o gabarito (C) da questão 10, e (B) para a questão 11.

12. Indique as posições em que a Lua se encontra durante as marés baixas mais baixas.



**Dados:**

- T: Terra.
- O: oceano.

- **L**: Lua.

- As figuras estão fora de escala.

- Os bojos de marés não foram representados para não influenciar na resposta.

(A) 1 e 2.

(B) 2 e 3.

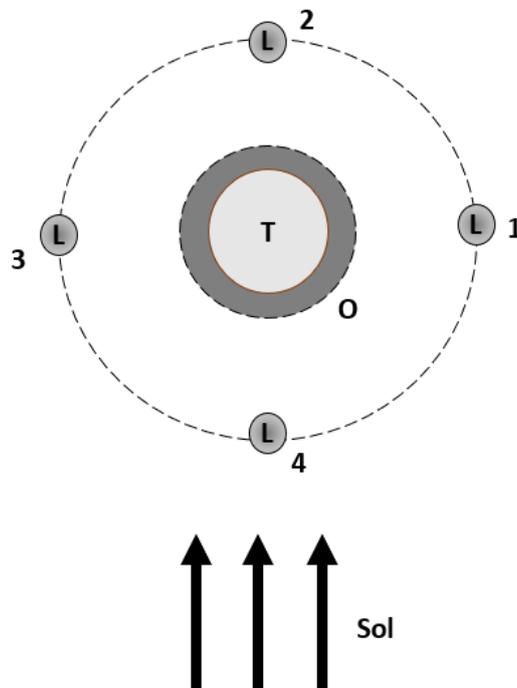
(C) 3 e 4.

(D) 4 e 1.

(E) 1 e 3.

(F) 2 e 4.

**13.** Indique as posições em que a Lua se encontra durante as marés altas mais altas.



**Dados:**

- **T**: Terra.

- **O**: oceano.

- **L**: Lua.

- As figuras estão fora de escala.

- Os bojos de marés não foram representados para não influenciar na resposta.

(A) 1 e 2.

(B) 2 e 3.

(C) 3 e 4.

- (D) 4 e 1.
- (E) 1 e 3.
- (F) 2 e 4.

Primeiramente, essas questões **12** e **13** também tiveram de serem ajustadas, pois suas versões antigas também estavam mal formuladas e, conseqüentemente, foram mal compreendidas pelos alunos. Antes, perguntavam sobre o ângulo formado entre Sol-Terra-Lua nas marés de sizígia e de quadratura. Essa versão atual requer que o candidato identifique essas configurações de marés, mas retomando à correlação das marés com as fases da Lua (questões **8** e **9**) e não adicionando o fator “ângulo”. Na versão do pós-teste, todos os alunos, das duas turmas, marcaram o gabarito (F). Nota-se que nessas questões, tentou-se fugir das alternativas mutuamente excludentes colocando todas as possibilidades possíveis, ou seja, como são 4 fases lunares principais e as alternativas mostram 2 números, tem-se uma combinação de 4 elementos tomados dois a dois, resultando em 12 possibilidades, mas se retira os casos repetidos, resultando em 6 possibilidades, logo, 6 alternativas.

## Capítulo 6

### Resultados das Aplicações

#### *Ganho normalizado*

O ganho normalizado foi introduzido por Hake “como uma medida aproximada da eficácia de um curso na promoção da compreensão conceitual” (Hake, 1998). Tornou-se a medida padrão para relatar pontuações em inventários conceituais baseados em pesquisa. Hake definiu o ganho normalizado médio  $\langle g \rangle$  como:

$$\langle g \rangle = \frac{\langle \text{post} \rangle - \langle \text{pre} \rangle}{100 - \langle \text{pre} \rangle}$$

em que os colchetes indicam as médias das turmas. Dessa forma,  $\langle \text{post} \rangle$  representa a média da turma no pós-teste e  $\langle \text{pre} \rangle$  é a média da turma no pré-teste. O ganho normalizado médio é a mudança na pontuação média da turma dividida pelo ganho máximo possível. Dito de forma mais simples, essa medida é comumente descrita como "a quantidade que os alunos aprenderam dividida pela quantidade que poderiam ter aprendido".

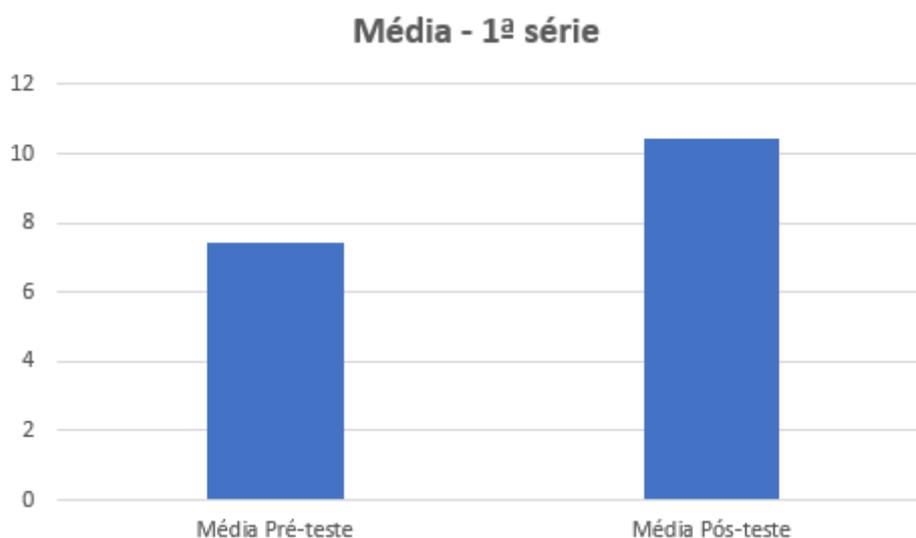
Hake (1998) define três classes de ganho normalizado. Turmas de ganho baixo apresentam valores de  $g < 0,30$ . Nas turmas de ganho médio, os valores de  $g$  estão no intervalo  $0,30 \leq g < 0,70$ . Já as turmas com ganhos normalizados  $g \geq 0,70$  representam a classe de ganho alto. A presente pesquisa aponta uma turma (EM 1<sup>a</sup>) na classe de ganho médio e uma turma (EM 3<sup>a</sup>) na classe de ganho baixo, ambas compatíveis a cursos realizados com metodologias tradicionais.

Na literatura nacional, os valores encontrados são bem diferentes. Professores da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) efetuaram pesquisas envolvendo métodos de engajamento interativo, adotando o intervalo de  $0,10 < g < 0,20$  para classes submetidas a métodos tradicionais (de Barros et al., 2004). A tabela 5 a seguir evidencia os dados comparativos do ganho de Hake.

<b>Turma</b>	<b>EM 1<sup>a</sup></b>	<b>EM 3<sup>a</sup></b>
Número de alunos que fizeram o pré-teste.	7	5
Número de alunos que fizeram o pós-teste.	7	5
Porcentagem de acertos no pré-teste.	7,43	7,40
Porcentagem de acertos no pós-teste.	10,43	8,60
Ganho de Hake	0,58	0,28

**Tabela 5.** Ganho normalizado para cada turma. Fonte: autor, 2023.

O gráfico 1 a seguir ilustra a comparação do pré-teste e pós-teste para a turma da 1<sup>a</sup> série:



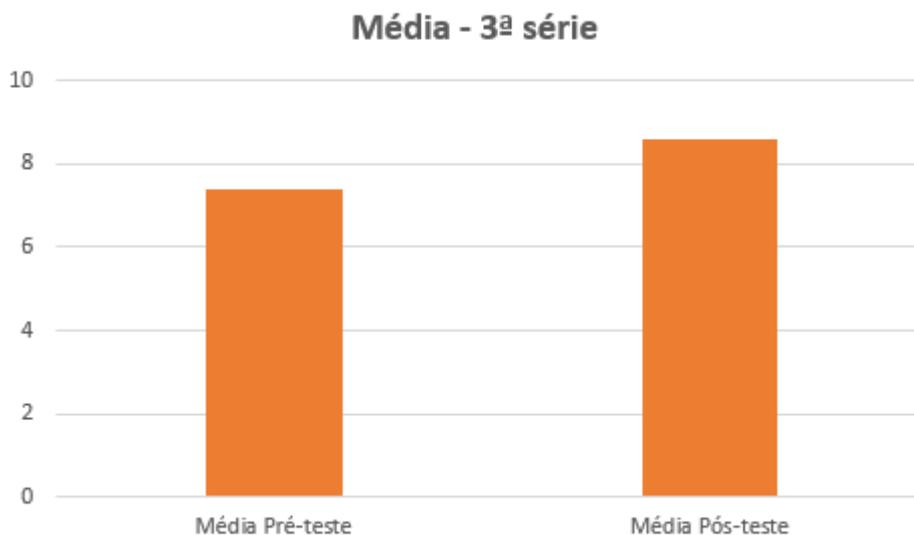
**Gráfico 1.** Comparação entre pré e pós-teste para 1<sup>a</sup> série do EM. Fonte: autor, 2023.

O cálculo para o ganho normalizado médio é feito a seguir:

$$\langle g \rangle = \frac{\frac{10,43}{13} \times 100 - \frac{7,43}{14} \times 100}{100 - \frac{7,43}{14} \times 100} \cong 0,58$$

Esse resultado de 0,58 representa um ganho médio, conforme visto anteriormente.

O gráfico 2 a seguir ilustra a comparação do pré-teste e pós-teste para a turma da 3ª série:



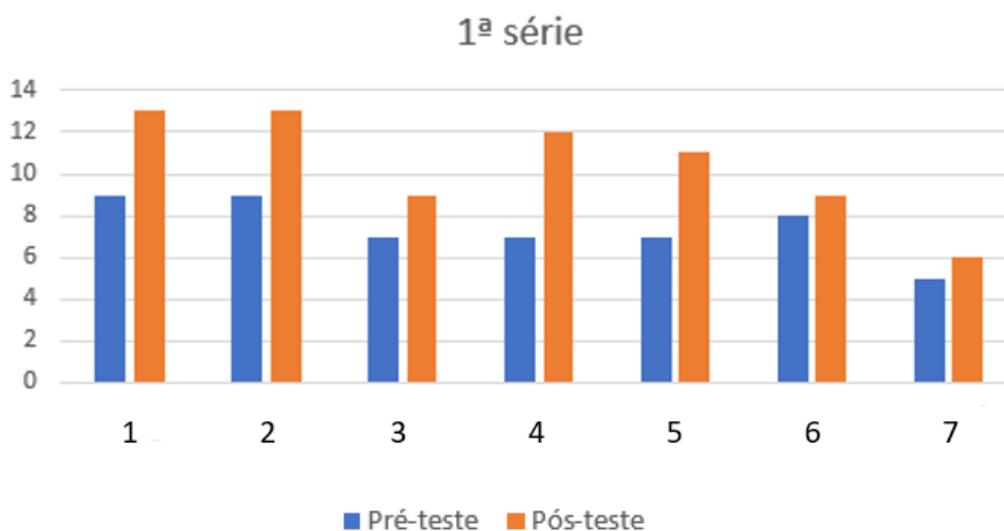
**Gráfico 2.** Comparação entre pré e pós-teste para 3ª série do EM. Fonte: autor, 2023.

O cálculo para o ganho normalizado médio é feito a seguir:

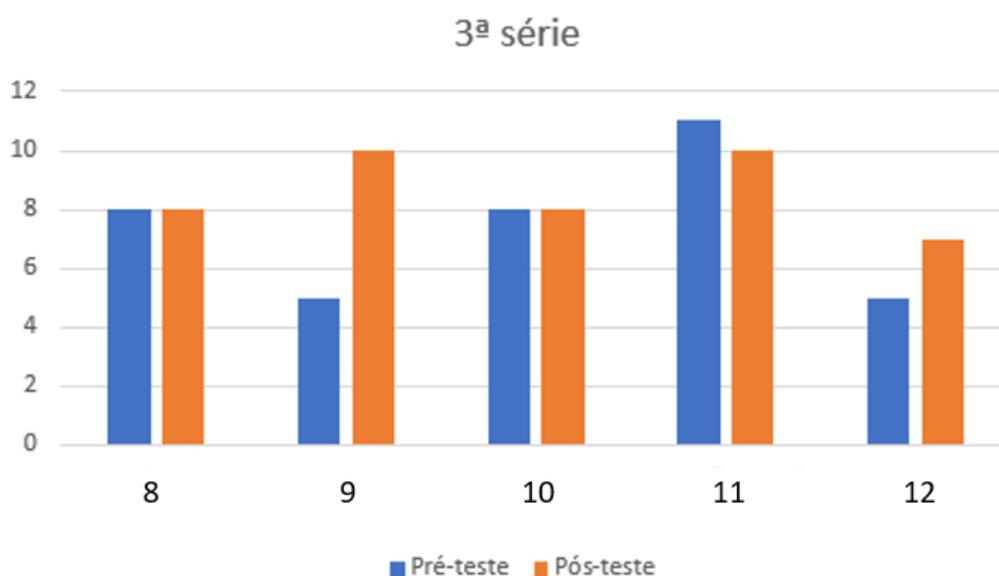
$$\langle g \rangle = \frac{\frac{8,6}{13} \times 100 - \frac{7,4}{14} \times 100}{100 - \frac{7,4}{14} \times 100} \cong 0,28$$

Esse resultado de 0,58 representa um ganho baixo, conforme visto anteriormente. Como já relatado, talvez esse resultado para a 3ª série se dê pelo fato de não terem ficado engajado durante a atividade.

Os gráficos 3 e 4 comparam o desempenho de cada estudante, em cada série, com relação ao número de acertos das questões.



**Gráfico 3.** Comparação do desempenho de cada estudante na 1ª série do EM. Fonte: autor, 2023.



**Gráfico 4.** Comparação do desempenho de cada estudante na 3ª série do EM. Fonte: autor, 2023.

As barras que ficam à esquerda de cada número (representando determinado aluno) referem-se ao número de acertos no pré-teste e as barras à direita referem-se ao número de acertos no pós-teste. Na 1ª série, todos os estudantes tiveram um aumento no número de acertos. Na 3ª série, apenas dois alunos tiveram um aumento, outros dois alunos mantiveram com o mesmo número de acertos e um outro aluno que teve uma

redução no número de acertos. Mais uma vez, isso sugere a importância da motivação e engajamento dos alunos para com as atividades.

*Comparação dos trabalhos de Viiri (1999, 2000, 2004) com as do presente trabalho.*

Referindo-se à tabela 2, a categoria A contém respostas dos estudantes que incluíram um modelo de duas protuberâncias de maré, mas com explicações diferentes. As categorias B e C contêm algumas concepções alternativas, como um modelo de uma única protuberância de maré; considerar as marés apenas como um fenômeno costeiro; explicar as marés como os efeitos da rotação da Lua, da Terra e do Sol; e explicar as marés como os efeitos do vento e da chuva. Essas concepções alternativas refletem tanto perspectivas astronômicas quanto oceanográficas. A concepção alternativa de um modelo de uma única protuberância de maré parece refletir uma perspectiva astronômica porque os estudantes usaram a atração da Lua para a explicação. Outras concepções alternativas parecem refletir uma perspectiva oceanográfica porque os entrevistados mencionaram marés nas costas e os efeitos do vento, da chuva ou de eventos atmosféricos. Em geral, as concepções alternativas estavam enraizadas tanto em perspectivas astronômicas quanto oceanográficas. Viiri (2000a) recomendou que tanto os professores quanto os escritores de livros didáticos usem o gradiente da atração lunar na explicação das marés. Viiri (2004) desenvolveu uma unidade baseada em pesquisa sobre as marés para alunos do EF. A unidade foi baseada na "teoria científica das marés, livro didático e análise das concepções dos alunos" (p. 463). A unidade exigiu um total de 50 min de tempo de ensino, mais 15 min para o pré-teste e 15 min para o pós-teste. Ele descreveu a unidade como não sendo centrada no aluno "porque a descrição e explicação das marés exigem ideias bastante abstratas e combinam muitas leis e quantidades, a unidade não foi muito centrada no aluno" (p. 475)<sup>55</sup>. A unidade refletiu estritamente a perspectiva astronômica da instrução sobre marés, onde nenhuma conexão foi feita com o modelo dinâmico das marés. A unidade foi testada com duas salas de aula do 8º ano, uma em 1999 (n = 10) e outra em 2000 (n = 17). As compreensões das marés dos alunos foram avaliadas com um questionário aberto e com desenhos e explicações antes e depois do ensino. No primeiro grupo do ano, 3 dos 10 alunos do EM tinham uma compreensão científica das marés antes do ensino. Após a

---

<sup>55</sup> Como já relatado, a instrução no **Apêndice B** foi construída sustentada nessa argumentação.

conclusão da unidade baseada em pesquisa, todos os alunos do primeiro grupo do ano mantinham o modelo de duas marés com 9 dos 10 participantes tendo uma compreensão científica das marés. No segundo grupo do ano, nenhum dos 17 participantes tinha compreensão científica das marés antes do ensino. Após o ensino, 12 dos 17 alunos do EM mantiveram o modelo de duas marés com compreensão científica, 4 dos 17 mantiveram o modelo de duas marés com explicações diferentes e 1 dos 17 manteve um modelo de uma maré. Esse estudo mostrou que, com o ensino apropriado, a compreensão científica das marés parece ser promovida entre os alunos do EM.

Resumidamente, o estudo classificou as respostas de alunos do EM sobre as marés em quatro categorias. Na categoria A, os alunos conheciam que as marés consistem em duas protuberâncias de água e deram explicações cientificamente corretas em termos de forças. Na categoria B, os alunos lembravam que havia apenas uma protuberância de água, mas não entendiam a causa do fenômeno. Na categoria C, os alunos desenharam as marés em nível local e deram explicações mais fenomenológicas e concretas. Na categoria D, os alunos não desenharam nada, mas as explicações foram semelhantes às da categoria C.

A instrução aplicada por Viiri (2004) é comparada com a usada no estudo atual, destacando as diferenças principais apresentadas no quadro 3. A principal diferença reside nos tópicos considerados importantes para a instrução. Assim, o estudo atual focou apenas nos pontos principais, enquanto Viiri cobriu uma ampla gama de tópicos.<sup>56</sup>

---

<sup>56</sup> Uma outra abordagem, mais voltada para professores pode ser encontrada em Ucar (2007). Para uma outra análise das explicações das marés nos livros universitários, de professores e de estudantes, consultar Galili e Lehavi, 2003, p.1131.

Viiri (2004)	Estudo atual (2021)
<b>Tempo da instrução</b>	
50 min	1 h 40 min
<b>Tópicos incluídos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estados da matéria;</li> <li>• Aceleração e força;</li> <li>• Lei da Gravitação Universal;</li> <li>• Representação gráfica da Lei da Gravitação;</li> <li>• Gradiente da interação lunar;</li> <li>• Queda livre;</li> <li>• Duas protuberâncias de água;</li> <li>• Duas marés em um dia;</li> <li>• Comparação das influências lunar e solar nas marés;</li> <li>• Marés na Lua de outro planeta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partícula x corpo extenso;</li> <li>• Leis de Newton;</li> <li>• Sistema Terra-Lua-Sol;</li> <li>• Força gravitacional diferencial.</li> </ul>
<b>Método instrucional</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Principalmente centrado no professor;</li> <li>- Apresentação do professor;</li> <li>- Discussão guiada pelo professor, dialógica;</li> <li>- Discussão entre colegas.</li> </ul>	

**Quadro 3.** Comparação entre o estudo de Viiri e do autor. Fonte: autor, 2023.

Da mesma forma, Bisard et al. (1994) examinaram as concepções alternativas dos alunos sobre conceitos astronômicos com outro questionário de múltipla escolha. Bisard et al. incluíram uma pergunta relacionada às marés em uma pesquisa de múltipla escolha, que foi aplicada a 708 alunos do EF, EM e universitário. Eles descobriram que 75% de todos os alunos não reconheciam que as marés altas ocorrem no lado oposto da Terra quando a Terra, a Lua e o Sol estavam alinhados. A resposta incorreta mais popular foi que havia uma única protuberância de maré no lado da Terra voltado para a Lua. Os alunos nesse estudo sabiam que a gravidade desempenha um papel na geração das marés, mas não podiam fornecer as razões para as marés no lado oposto da Terra. Embora este estudo apoie as descobertas de outros estudos, o estudo de Bisard et al. foi bastante limitado porque a conclusão foi baseada nas respostas dos alunos a apenas uma pergunta de múltipla escolha.

Em outro estudo para identificar as concepções equivocadas sobre conceitos astronômicos, Skamp (1994) aplicou uma técnica chamada "Sort-Card" (p. 63), que envolveu fornecer um grupo de cartões aos alunos e perguntar se eles "concordavam / discordavam / não sabiam" sobre a declaração escrita no cartão. Os participantes também foram convidados a fornecer razões por escrito para suas opiniões. As

declarações nos cartões foram derivadas da pesquisa sobre concepções equivocadas. Oitenta e um professores primários em formação participaram deste estudo. Uma ampla variedade de concepções equivocadas para diferentes conceitos astronômicos, incluindo as marés, foi identificada no estudo. Skamp (1994) indicou que a maioria de suas descobertas foi semelhante às descobertas de outros estudos, exceto aquelas relacionadas às marés. As concepções equivocadas relacionadas às marés determinadas por Skamp foram: as marés são causadas pela lua orbitando a Terra a cada 24 horas; existe apenas uma maré alta e uma maré baixa por dia; a órbita elíptica da lua ao redor da Terra causa as marés: quando a lua está mais próxima da Terra, ocorre a maré alta; as marés altas ocorrem quando a lua é visível; e a maré alta ocorre no lado oposto da Terra da maré baixa (p. 65). As descobertas de Skamp foram semelhantes às concepções alternativas diagnosticadas anteriormente por Viiri (2000a) e Galili e Lehavi (2003). No entanto, sua metodologia, que solicitava aos participantes que expressassem sua opinião com base em uma declaração fornecida pelos pesquisadores, parece ter sido inadequada para determinar as concepções alternativas, pois essas declarações podem ter influenciado os participantes ou fornecido informações para as explicações adicionais dos participantes. Portanto, este estudo não fornece conclusões confiáveis sobre as concepções de maré e causas das marés de professores em formação inicial.

Os estudos de pesquisa sobre as marés sugerem que os alunos desenvolvem concepções alternativas relacionadas tanto à abordagem astronômica quanto à abordagem de oceanografia, ou seja, parece que a compreensão dos alunos das marés depende da compreensão tanto das teorias de equilíbrio quanto das teorias dinâmicas. A teoria de equilíbrio aumentaria a compreensão dos alunos sobre as forças geradoras de maré. Por outro lado, a teoria dinâmica poderia aumentar a compreensão dos alunos sobre como os oceanos respondem a essas forças em locais específicos na Terra (Ucar, 2007, p.75). Evidentemente, a abordagem relacionada a teorias dinâmicas não pertenceu ao escopo do presente estudo.

Como o presente estudo não usou as mesmas questões utilizadas no trabalho de Viiri (2000a), não fez muito sentido usar as mesmas categorias usadas por esse autor. No entanto, quando os desenhos e explicações dos alunos foram analisados, as categorias qualitativamente diferentes foram derivadas das respostas dos alunos. Viiri (2000a), categorizou suas descobertas, baseando-se primeiro nos desenhos dos alunos e segundo em suas explicações escritas. A razão para essa estratégia foi que as respostas dos alunos mostraram tanto implicitamente quanto explicitamente que, se eles achassem

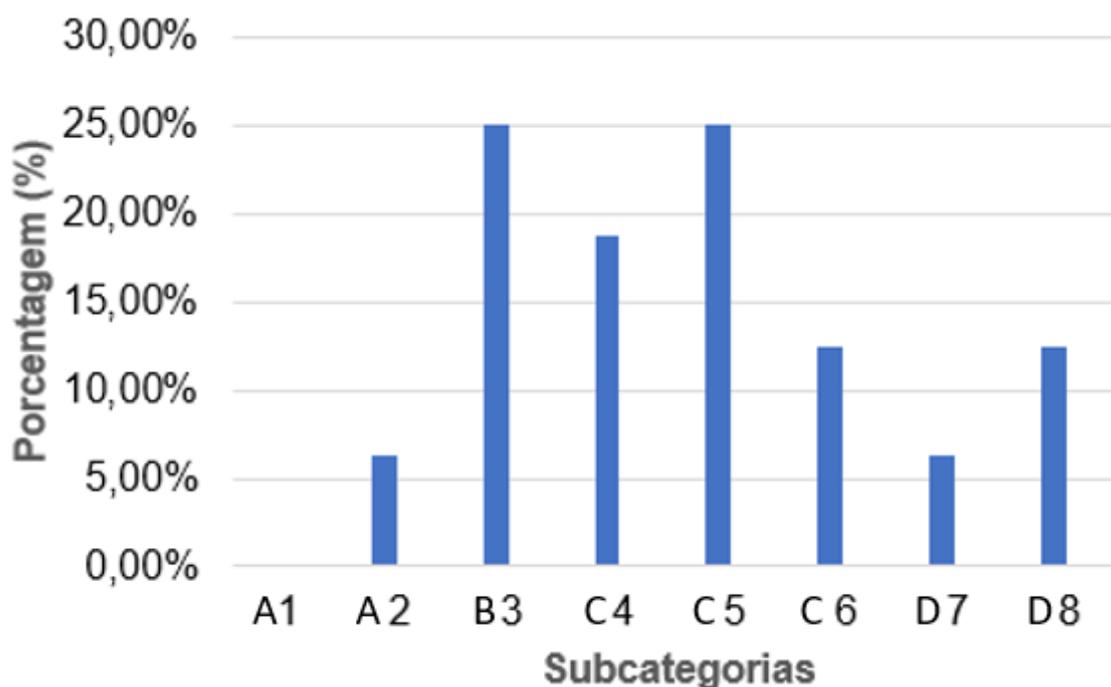
que não entendiam a noção de marés, eles se recusariam a desenhar qualquer coisa. Por outro lado, o presente estudo levou em consideração as respostas dos alunos nas entrevistas e o conjunto de respostas no teste múltipla-escolha, resultando nas seguintes categorias, identificadas no quadro 4.

<b>A.</b> Duas protuberâncias de maré.	<b>A.1.</b> Duas protuberâncias de maré e o gradiente da atração (lunar e solar).
	<b>A.2.</b> Duas protuberâncias de maré e atração da Lua.
<b>B.</b> Uma protuberância de maré.	<b>B.3.</b> Uma protuberância de maré e a atração da Lua.
<b>C.</b> Marés na costa.	<b>C.4.</b> Marés na costa e a atração da Lua.
	<b>C.5.</b> Marés na costa e os movimentos da Terra, Lua ou Sol.
	<b>C.6.</b> Marés na costa e vento, chuva, etc.
<b>D.</b> Sem imagens.	<b>D.7.</b> A gravitação da Lua.
	<b>D.8.</b> Vento, chuva, etc.

**Quadro 4.** Resultados do pré e pós-teste: números de estudantes nas categorias representativas das concepções sobre marés. Fonte: adaptado de Viiri (2000a), 2023.

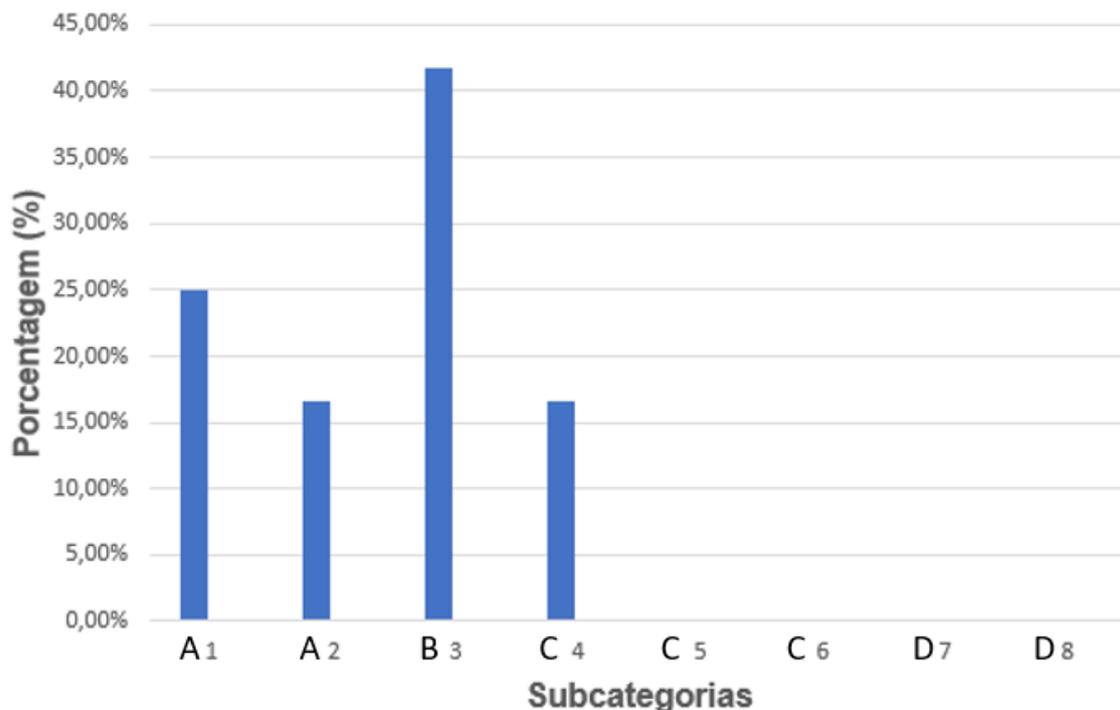
Como se percebe, não foi encontrado algumas categorias equivalentes ao trabalho do Viiri. Em particular, é interessante notar a ausência da subcategoria D15, pois todos os participantes, durante as entrevistas, deram alguma explicação (A categoria D subsiste por conta das respostas que alguns alunos deram através de desenhos ao longo das entrevistas). Contudo, a ausência das outras subcategorias talvez se deva ao número reduzido de participantes que realizaram o pré-teste.

Da mesma forma que Viiri (1999, 2000a, 2004) classificamos os respondentes em cada subcategoria de acordo com suas respostas. Por conta da pequena amostragem de 12 participantes, consideramos como se fosse uma turma só. A seguir, apresenta-se o gráfico 5 com a quantidade de alunos em cada subcategoria depois de termos realizado a análise das respostas do pré-teste juntamente com as das entrevistas.



**Gráfico 5.** Porcentagem dos estudantes em cada subcategoria depois do pré-teste e entrevistas - adaptada do trabalho de Viiri. Fonte: autor, 2023.

Como se percebe, há um grande quantitativo dos alunos (68,75%) nas categorias C e D. Embora muitos tivessem assinalado alternativas aleatoriamente, conforme já relatado, é interessante perceber que a categoria C se alinha muito bem com a tentativa de vários cientistas ao longo do tempo de explicar as marés pela ação de fatores climáticos, como os ventos, chuvas, maremotos, etc. De certa forma, isso corrobora com a história e o levantamento das concepções espontâneas sobre marés. Ninguém atingiu a subcategoria A1, apenas a A2 foi atingida por uma pessoa, pois ela conseguiu relacionar o conhecimento de força gravitacional com seu conhecimento prévio sobre as duas protuberâncias. Por fim, um quantitativo razoável (25%) se enquadrou na B3, de apenas uma protuberância, o que já era razoável de se esperar, corroborando o levantamento das concepções espontâneas. Mesmo com uma amostra significativamente pequena de alunos, as concepções espontâneas foram bem evidentes e se alinharam com o que o levantamento bibliográfico mostrou. A seguir, apresenta-se o gráfico 6 com a quantidade de alunos em cada subcategoria depois de termos realizado a análise das respostas do pós-teste.



**Gráfico 6.** Porcentagem dos estudantes em cada subcategoria depois do pós-teste - adaptada do trabalho de Viiri. Fonte: autor, 2023.

Percebe-se a ausência de alunos nas subcategorias C5, C6, D7 e D8, indicando alguns ganhos conceituais. Antes da instrução, nenhum aluno se enquadrava em A1. Depois da instrução, o pós-teste revela que 3 alunos subiram para essa subcategoria. Aliás, cerca de 41,67% dos estudantes foram para a categoria A. A mesma porcentagem é verificada para a categoria B. Finalmente, 16,67% dos estudantes se concentraram na subcategoria C4.

Em suma, da amostra de 12 participantes, 3 conseguiram adquirir os conceitos cientificamente adequados (A1), 2 conseguiram reconhecer duas protuberâncias de maré em lados opostos da Terra, explicando-as com base na atração lunar, 5 lembraram que havia apenas uma única saliência de água. Suas explicações para a maré alta eram, ou em termos de força, ou conectadas com o movimento da Lua ou do Sol. É evidente que eles lembraram que o nível da maré alta está relacionado às posições relativas da Terra, da Lua e do Sol. Mas eles não entenderam que as posições não são as causas do fenômeno. Por fim, 2 alunos lembraram das marés na costa. Embora nas entrevistas tenha sido solicitado aos alunos que explicassem e desenhassem as marés em escala global, alguns alunos desenhavam imagens representando a maré alta e baixa na costa.

Parece que quando o nível de compreensão dos alunos diminui, eles fornecem razões mais variadas para as marés (Viiri, 2000a). Todos os alunos das categorias A e B deram algum tipo de explicação, mas na categoria C há alunos que não conseguiram fornecer nenhuma explicação.

## Capítulo 7

### Considerações Finais

#### *Limitações do trabalho*

As limitações do estudo decorrem de diversas fontes: o uso das mesmas perguntas de entrevista e testes para a coleta de dados pré e pós-teste; a falta de uma amostra aleatória de sujeitos; ter apenas um projeto de amostra sem grupo de controle; e não ter gravado todas as falas dos entrevistados.

Uma limitação do estudo decorre do uso de perguntas idênticas para as entrevistas pré e pós-teste. Os estudantes podem ter se lembrado das perguntas da entrevista e prestado mais atenção ao material relacionado a essas perguntas durante a aula. Portanto, eles podem ter uma melhor compreensão dessas perguntas específicas e responder de acordo durante o pós-teste. A mesma limitação também é uma preocupação para os itens do teste, porque o mesmo teste foi usado para o pré e pós-teste. A retestagem do indivíduo com perguntas de teste idênticas é uma das principais limitações da medição (Thorndike, 1997). Problemas com esse tipo de *design* foram especificados por Gay (1996) como "os sujeitos podem aprender algo no primeiro teste que os ajuda no segundo" (p. 363). Além disso, a entrevista pode afetar as respostas dos alunos aos itens do teste porque foram fornecidas algumas definições durante a entrevista para esclarecer as perguntas da entrevista.

Outra limitação que pode ter afetado este estudo é a amostra escolhida. Os participantes foram selecionados devido à sua disponibilidade e eram todos voluntários que receberam pontuações extras na nota como incentivo. Portanto, foi uma amostra de conveniência. Como não foi um grupo selecionado aleatoriamente, esse procedimento de amostragem diminui a generalizabilidade dos resultados. Além do método de amostragem, o tamanho da amostra não foi grande o suficiente para generalizar os resultados para toda a população.

Outra limitação do estudo foi que o projeto envolveu apenas um grupo que foi pré-entrevistado e pré-testado, envolvido no tratamento, pós-entrevistado e pós-testado. Esse tipo de design é chamado de "pré-teste e pós-teste de um único grupo" por Gay (1996, p.326). O foco foi comparar pré-teste, entrevista e pós-teste, e descrever as

compreensões conceituais antes e depois da instrução. Como não havia um grupo de controle para comparação, o estudo tem potencial limitado para atribuir relações de causa e efeito.

Por fim, o fato de não ter gravado as falas de todos os entrevistados suscita algumas desvantagens. Ainda que tenham sido entrevistados poucos estudantes e tenha sido feitas anotações constante durante tais entrevistas, pode ocorrer: (a) perda de informações importantes, em que alguns detalhes importantes tenham sido perdidos (com a gravação, é possível ouvir novamente e identificar informações relevantes que podem ter sido perdidas); (b) dificuldade na transcrição, pois a transcrição das anotações pode ser mais difícil e demorada, já que as informações precisam ser interpretadas a partir das anotações, correndo ainda o risco de se interpretar errado o que foi dito; e (c) viés de memória, isto é, sem a gravação das falas, os pesquisadores e entrevistados podem ter uma lembrança diferente do que foi dito, o que pode levar a informações conflitantes ou imprecisas.

#### *Incentivar discussões curriculares*

A discussão sobre a inserção de aulas mais detalhadas sobre o fenômeno das marés nos conteúdos programáticos e currículos de escolas de regiões litorâneas e costeiras é de grande importância para a formação de estudantes mais conscientes e engajados em relação ao meio ambiente. O conhecimento sobre as forças de marés, por exemplo, pode permitir uma melhor compreensão da dinâmica costeira e dos impactos que as atividades humanas podem causar na região. Além disso, pode contribuir para o desenvolvimento de tecnologias e estratégias mais eficazes para o gerenciamento costeiro, como previsão de ressacas e enchentes. Portanto, investir em uma educação mais completa e atualizada sobre o fenômeno das marés pode trazer benefícios não apenas para as comunidades costeiras, mas também para a sociedade como um todo.

#### *Implicações para a educação de professores*

Várias implicações para a formação de professores em serviço e em formação inicial podem ser deduzidas a partir dos resultados deste estudo. É importante que os professores tenham uma boa compreensão do conteúdo que devem ensinar e que essa compreensão vá além do conhecimento comum do conteúdo. Se os professores mantiverem concepções alternativas, podem ter dificuldades em identificar as concepções alternativas de seus alunos e abordá-las com sucesso (Calik e Ayas, 2005).

Os estudos relativos às concepções espontâneas dos professores sobre marés mostraram que todos os professores em formação inicial que participaram das entrevistas prévias à instrução mantinham concepções alternativas ou fragmentos alternativos como suas compreensões conceituais. Sem instrução, esses professores em formação inicial provavelmente teriam levado suas concepções alternativas sobre marés para suas futuras salas de aula e podem ter ensinado suas ideias alternativas sobre marés para seus alunos. Portanto, os resultados deste estudo sugerem que mais conhecimento do conteúdo de conceitos astronômicos fundamentais deve ser introduzido para professores em formação inicial e em serviço durante sua formação inicial ou durante o desenvolvimento profissional. Professores de ciências e de educação em ciências que ministram conteúdo de ciências em programas de formação inicial de professores devem estar cientes das concepções alternativas dos professores em formação inicial e modificar o conteúdo e as práticas instrucionais dos cursos para abordar as concepções alternativas. Esses cursos também devem tentar promover uma compreensão científica do conteúdo. A compreensão das marés requer uma boa compreensão de outros conteúdos, como as fases e o ciclo da Lua (Saraiva; da Silveira; Steffani, 2011), a gravidade e as forças inerciais. Antes de ensinar marés, é preciso abordar esses conceitos pré-requisitos.

*Espera-se que o compilado de textos didáticos voltados para professores auxiliem na produção de aulas e materiais didáticos para o ensino universitário*

Por mais que nossa pesquisa não tenha se concentrado em aplicar a proposta de aula e o teste múltipla-escolha, tampouco verificar resultados a partir disso, para os estudantes universitários, espera-se que os textos didáticos coletados possam auxiliar os professores desse nível a construírem boas aulas, baseadas em boas referências. Iniciar a exploração desse fenômeno com a explicação qualitativa oferecida nesse trabalho pode se demonstrar um bom ponto de partida. Em seguida, tomar a Terra como referencial acelerado para explicar o fenômeno sobre essa outra perspectiva pode tornar o caminho mais fácil para compreensão dos estudantes. Por fim, os textos didáticos apontam os principais fatores relacionados à teoria dinâmica das marés, podendo auxiliar os professores a estruturarem suas aulas de forma mais objetiva.

*O estudo amplia o escopo da pesquisa nas concepções dos alunos sobre fenômenos astronômicos.*

A compreensão das marés está ligada à compreensão de muitos outros conceitos. De acordo com Warren (1979, p.54), "se eles [alunos] realmente entendessem por que uma protuberância aparece, eles também entenderiam a razão da outra". Conseqüentemente, explicar as marés é uma boa experiência para fazer uso do conhecimento sobre vários assuntos pré-requisitos da física. Além disso, Galili e Lehavi (2001) argumentaram que uma compreensão das marés é um fator influente na construção do conhecimento da gravitação e do peso em geral pelo aluno. Em que pese às marés estarem especificamente relacionadas às fases da Lua e às forças gravitacionais, e parcialmente relacionadas a outros conceitos astronômicos, as compreensões conceituais dos alunos sobre esse fenômeno não foram completamente estudadas por meio da pesquisa em educação científica. O resumo das principais concepções alternativas sobre marés, apresentado nas páginas 56-57 desse trabalho contribui nesse sentido.

*A análise da estrutura de conteúdo fornece o conhecimento científico que precisa ser ensinado.*

No nosso caso, os principais elementos foram o gradiente gravitacional e a periodicidade do fenômeno. Na Educação Básica não podemos ensinar o conhecimento científico mais abstrato, mas temos que modificá-lo para se adequar ao nível de nossos alunos. Com isso em mente, incluímos apenas as forças que atuam no ponto da Terra voltado para a Lua e no outro lado da Terra. Em estudos futuros, o modelo de referencial acelerado apresentado por da Silveira (2003) pode ser testado. Além de nos fornecer *insights* sobre os conteúdos da unidade de ensino-aprendizagem, as informações que obtivemos sobre os conteúdos ensináveis foram aproveitadas na análise dos livros didáticos e na elaboração de comparações com as ideias dos alunos.

*Por meio da análise dos livros didáticos, é possível identificar os modelos que são empregados no ensino e nos materiais didáticos utilizados em sala de aula.*

De acordo com a nossa análise do livro didático, é comum que os autores usem vários modelos para explicar um mesmo fenômeno, como no caso das marés, em que a gravitação da Lua e a força centrífuga são mencionadas. No entanto, o uso de modelos cientificamente incorretos pode prejudicar o aprendizado dos alunos e, por isso,

optamos por não utilizar essa explicação em nossa sessão de ensino. Esse problema pode ter contribuído para os resultados pobres obtidos em experimentos anteriores, como o conduzido por Sandberg e Barnard (1997). O material hipermídia (Keizer 1993; Sandberg e Barnard 1997; van Saane & van Genuchten, 1992) usado em seu curso não usou consistentemente o gradiente de atração da Lua em sua explicação das marés. Além disso, a falta de consideração das concepções prévias dos alunos sobre as marés pode ter sido outra deficiência desse estudo. Em nosso material didático, optamos por utilizar apenas o gradiente gravitacional lunar e solar como explicação para as marés, sem adicionar elementos desnecessários. Sugerimos, portanto, que outros professores e escritores de livros sigam essa abordagem mais simples e correta ao ensinar sobre as marés.

*A análise das concepções espontâneas auxilia os professores na implementação de estratégias pedagógicas*

O levantamento bibliográfico sobre as concepções espontâneas dos estudantes em relação às marés se torna uma ferramenta valiosa para os professores. Por meio dessa pesquisa, é possível identificar as ideias prévias dos alunos e, assim, elaborar estratégias de ensino mais eficazes, capazes de corrigir e/ou complementar essas concepções. Ao conhecer as concepções espontâneas dos estudantes, os professores podem adaptar sua linguagem e metodologia para tornar o conteúdo mais acessível e compreensível. Além disso, é possível elaborar atividades que explorem as ideias prévias dos alunos e as utilizem como ponto de partida para a construção do conhecimento científico. Por isso, espera-se que o levantamento bibliográfico sobre as concepções espontâneas dos estudantes sobre o assunto marés seja uma importante ferramenta para auxiliar os professores no desenvolvimento de estratégias mais eficazes de ensino, contribuindo para uma melhor compreensão do fenômeno pelas novas gerações.

*Mesmo em amostra pequena as concepções mais evidentes apareceram*

É interessante notar que embora a quantidade de alunos seja estatisticamente ínfima, apenas 12 alunos, as concepções alternativas mais evidentes que apareceram no levantamento bibliográfico, também apareceram com o resultado da análise do conjunto de respostas dadas pelos alunos no pré-teste e nas entrevistas. Agora, é bem sabido que uma amostra pequena pode não revelar bons resultados em pesquisas quantitativas

porque quanto menor a amostra, maior a probabilidade de ela não ser representativa da população que se pretende estudar. Isso significa que as características da amostra podem não refletir as características da população em geral, levando a resultados imprecisos ou viesados. Quando a amostra é pequena, pode haver uma variação significativa nos dados, o que pode levar a resultados inconsistentes e pouco confiáveis. Além disso, uma amostra pequena pode não ter poder estatístico suficiente para detectar diferenças significativas entre grupos ou para identificar relações importantes entre variáveis. Para minimizar esses problemas, é importante que a amostra seja grande o suficiente para representar adequadamente a população e que a seleção da amostra seja feita de forma aleatória e representativa. Dessa forma, os resultados obtidos serão mais precisos e confiáveis.

#### *Incentivo à pesquisa em História e Filosofia da Ciência*

Espera-se que o resumo histórico das teorias das marés possa incentivar professores a pesquisarem mais sobre a história e filosofia da ciência. A história da ciência consiste em estudar o desenvolvimento das teorias científicas ao longo do tempo, considerando não apenas os aspectos técnicos (abordagem conceitual), mas também os contextos sociais, políticos e culturais (abordagem não conceitual) em que foram produzidas (Martins, 2005, p.306). Nesse sentido, o estudo da história das teorias das marés pode ajudar a compreender como a ciência evoluiu em relação a essa área específica do conhecimento. Por outro lado, a filosofia da ciência busca investigar os fundamentos teóricos, as suposições e os métodos utilizados pelos cientistas para a produção do conhecimento. Assim, o estudo das teorias das marés pode ser um ponto de partida para reflexões filosóficas mais amplas sobre a natureza da ciência e sua relação com a sociedade. Desse modo, o incentivo à pesquisa em História e Filosofia da Ciência, a partir do estudo das teorias das marés, pode contribuir para o aprofundamento do conhecimento científico e para uma reflexão crítica sobre a produção e divulgação da ciência na sociedade.

#### *O papel fundamental do professor para auxiliar a construção do conhecimento dos alunos em assuntos complexos.*

Não é comum que estudantes já suponham que as marés são causadas pela gravitação da Lua. Como a explicação científica também faz uso da força da gravitação, ou mais precisamente do gradiente da gravitação, as ideias desses estudantes não fica

muito distantes da correta. Mas há aqueles que atribuem como causa primária as condições climáticas. Ora, com base na história da explicação das marés por cientistas, é compreensível que não seja possível para os alunos descobrirem a noção do gradiente de gravitação individualmente ou em discussões entre pares. O professor precisa ensinar esse tipo de ideia científica abstrata. Visto que a gravitação é ensinada como uma força atrativa, é totalmente impossível em um contexto cotidiano descobrir que a outra protuberância de água resulta da força atrativa. Consequentemente, nossa hipótese era que a compreensão dos alunos poderia ser melhorada expandindo sua concepção atual. Na prática, o professor usou analogias, que é uma das muitas maneiras de “transformar” o conhecimento para uso em sala de aula. Por exemplo, analogias com a “goma de mascar” ou uma “bola de material gelatinoso” (Hewitt, 2015, p.168). De acordo com Ogborn et al. (1996, p.61), esse processo de transformação é chamado de "transposição didática". Mercer (1995) destaca a importância do papel do professor na orientação da aprendizagem dos alunos por meio da "construção guiada do conhecimento". Acreditamos que os professores devem auxiliar seus alunos na construção de seus próprios conhecimentos, sem deixá-los isolados nesse processo. Embora se espere que cada aluno construa seu próprio conhecimento, a orientação e o apoio do professor são fundamentais para garantir uma aprendizagem mais significativa.

*As atividades de ensino devem ser bem estruturadas e organizadas.*

Além da exposição do professor, os alunos devem ser estimulados a trabalhar em conjunto e individualmente. Para entender os efeitos da aprendizagem, é fundamental que a fala do professor siga um ritmo que vá desde a apresentação até a discussão dialógica. Conforme Leach e Scott (2000, p.3) alegam, é inválido afirmar que “uma sequência de ensino é melhor do que outra sem considerar o papel do professor em motivar e engajar os alunos por meio da conversa”. Analisar a distribuição das atividades de ensino-aprendizagem e os diferentes modos de fala do professor pode fornecer informações valiosas sobre a efetividade de sua apresentação. O modo de falar deve ser ajustado ao nível de abstração do tópico em discussão. Dependendo do tema, uma unidade de ensino pode ser mais centrada no aluno ou no professor, e o ritmo deve ser ajustado a cada situação de aprendizagem em sala de aula. É importante ressaltar que a pesquisa pode ajudar os professores no planejamento de suas sessões de ensino.

*Os novos modelos devem ser usados em muitos contextos diferentes para uma aprendizagem mais profunda.*

Para uma aprendizagem profunda, é necessário aplicar novos modelos em vários contextos e permitir que os alunos os apliquem também. Na unidade sobre marés e buracos negros, os alunos podem aplicar o método aprendido em um novo contexto. Isso se assemelha a um esquema de ensino bem-sucedido. Estudos mostram que os alunos têm melhores resultados quando têm várias oportunidades de aplicar seus conhecimentos. Se não aplicarem o que aprenderam, não perceberão o valor da nova ideia e usarão suas ideias antigas após o fim do ensino. É importante fornecer oportunidades para aplicação em diferentes contextos para uma aprendizagem mais profunda. Essa fase da sequência de ensino se assemelha à fase de aplicação do esquema de ensino Children's Learning in Science (Needham e Hill, 1987). Nos experimentos realizados em Leeds<sup>57</sup>, resultados positivos foram obtidos quando os alunos tiveram diversas oportunidades de aplicar seus novos conhecimentos (Viiri, 2004).

*Devemos sempre retomar assuntos já abordados nas aulas atuais (on-time)*

O assunto de marés obriga o professor a retomar assuntos de cinemática e dinâmica que, a priori, já foram lecionados em um planejamento anual e tradicional de um curso de mecânica. Por exemplo, dentro da cinemática o conceito de aceleração tem que estar bem firmado na mente dos alunos. Dentro da dinâmica, o conceito de força (interação entre os corpos) tem que estar bem enraizado. A discussão básica sobre os principais estados da matéria também perpassa o início da unidade de ensino de marés proposta por nós, pois temos que apontar a deformidade das porções de água na formação de bojos de marés. E assim se sucede com inúmeros outros temas que devem ser, sempre que possível, reforçados nas estruturas cognitivas dos estudantes para que não retornem às ideias pré-concebidas dos fenômenos, conferindo credibilidade ao conhecimento científico.

---

<sup>57</sup> Cidade do norte da Inglaterra.

### *Perspectivas futuras para o presente trabalho*

Este estudo foi conduzido com um pequeno grupo de estudantes do EM. Futuras pesquisas devem se concentrar em aumentar o tamanho da amostra do estudo para aumentar a generalização dos resultados. Uma vez que este estudo se concentrou em descrever a compreensão conceitual das marés sem qualquer intenção de generalizar os resultados para toda a população, estudos adicionais são necessários para realizar essa missão.

Melhorar o teste múltipla-escolha levando em consideração os critérios de elaboração e revisão de itens para excluir alternativas mutuamente excludentes e deixar as alternativas mais independentes entre si, sem que uma possa influenciar a outra. A partir dessa reelaboração, validar estatisticamente o teste múltipla-escolha.

Por fim, incorporar a proposta em uma sequência didática sobre o ensino de mecânica, pois como visto, muitos são os tópicos pré-requisitos para melhor compreensão do fenômeno das marés. Sendo bem trabalhos, aumenta-se a probabilidade de compreensão dos alunos sobre as marés.

## Referências Bibliográficas

- \_\_\_\_\_. A guide to Newton's Principia. In: NEWTON, I. *The principia - Mathematical principles of natural philosophy*. Tradução I. B. Cohen & A. Whitman. Berkeley: University of California Press, 1999, p. 1-370.
- \_\_\_\_\_. De fluxu et refluxu maris. On the ebb and flow of the sea. In: Rees, G. (Ed.). *Philosophical studies c 1611-c. 1619*. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1996. p. 63-93. (The Oxford Francis Bacon, vi).
- \_\_\_\_\_. *Dialogo dei massimi sistemi*. In: PAGNINI, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. V. 4, 3.
- \_\_\_\_\_. *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Tradução, introdução e notas A. B. Marí. Madrid: Alianza Editorial, 1994.
- \_\_\_\_\_. Introduction: Galileo, man of science. In: McMullin, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988a. p. 3-51.
- \_\_\_\_\_. Nota sulla marea. In: PAGNINI, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. v. 3, p. 296-301.
- Afonso, G. B., F. *Galileu E A Natureza Dos Tupinambá*. **Scientific American Brasil**, p. 60-65, maio, 2009.
- Aiton, E.J., 1954. Galileo's theory of the tides. *Ann. Sci.* 10, 44–57. <https://doi.org/10.1080/00033795400200054>.
- Aiton, E.J., 1955a. Descartes's theory of the tides. *Ann. Sci.* 11, 337–348. <https://doi.org/10.1080/00033795500200335>.
- Aiton, E.J., 1955b. The contributions of Newton, Bernoulli and Euler to the theory of the tides. *Ann. Sci.* 11, 206–223. <https://doi.org/10.1080/00033795500200215>.
- Aiton, E.J., 1957. The vortex theory of the planetary motions—I. *Ann. Sci.* 13, 249–264. <https://doi.org/10.1080/00033795700200131>.
- Aiton, E.J., 1958a. The vortex theory of the planetary motions—II. *Ann. Sci.* 14, 132–147. <https://doi.org/10.1080/00033795800200047>.

Aiton, E.J., 1958b. The vortex theory of the planetary motions—III. *Ann. Sci.* 14, 157–172. <https://doi.org/10.1080/00033795800200087>.

Aiton, E.J., 1963. On Galileo and the earth-moon system. *Isis* 54, 265–266. <https://www.jstor.org/stable/228546>.

Aiton, E.J., 1969. Newton's aether-stream hypothesis and the inverse square law of gravitation. *Ann. Sci.* 25, 255–260. <https://doi.org/10.1080/00033796900200151>.

Aiton, E.J., Burstyn, H.L., 1965. Galileo and the theory of the tides. *Isis* 56, 56–63. <https://www.jstor.org/stable/228458>.

Arbic, B. K., 2022. *Incorporating tides and internal gravity waves within global ocean general circulation models: a review*. **Prog. Oceanogr.**, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102824>.

Arons, A. B. *Basic physics of the semidiurnal lunar tide*. **American Journal of Physics**, v. 47, n. 11, p. 934-937, 1979.

Aston, N., 2008. Hutchinsonians. *Oxford Dictionary of National Biography*, <https://doi.org/10.1093/ref:odnb/59223>

[Astronomia Indígena] - *Astronomia indígena prevê influência da lua sobre as marés antes de Galileu e Newton*. Disponível em: <https://mundogeo.com/2009/06/19/astronomia-indigena-preve-influencia-da-lua-sobre-as-mares-antes-de-galileu-e-newton/>. Acesso em 02/04/2023.

Bacon, *Do fluxo e refluxo do mar, scientiæ studia*, São Paulo, v.5, n.4, p.520-48, 2007, p.521

Bacon, *Novo Organum*, tradução - José Aluysio Reis de Andrade, 2002

Baldwin, M.R., 1985. Magnetism and the anti-Copernican polemic. *J. Hist. Astron.* 16, 155–174. <https://doi.org/10.1177/002182868501600301>.

Benison, L. *Early medieval science: the evidence of Bede*. **Endeavour**, v. 24, n. 3, p. 111-116, 2000.

BISCH, Sérgio Mascarello. Uma proposta de ensino problematizadora e dialógica sobre o sistema Sol-Terra-Lua. In: *Simpósio Nacional de Educação em Astronomia*, 4., 2016, Goiânia-GO. Disponível em: <https://www.sab->

astro.org.br/wpcontent/uploads/2018/04/SNEA2016\_TCO23.pdf. Acesso em: 30 dez. 2020.

Bonelli, F.; Russo, L. *The origin of modern astronomical theories of tides: Chrisogono, de Dominis and their sources*. **The British Journal for the History of Science**, v. 29, n. 4, p. 385-401, 1996.

Brauen, F., 1982. Athanasius Kircher (1602-1680). *J. Hist. Ideas* 43, 129–134. <https://www.jstor.org/stable/2709164>.

Burstyn, H. L. Galileo's attempt to prove that the earth moves. *Isis*, 53, p. 161-85, 1964.

Butikov, E. I. *A dynamical picture of the oceanic tides*. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 10, p. 1001-1011, 2002.

Camargo, R.; Harari, J. Marés. In: Castelo, J. P.; Krug, L. C. (Org.). *Introdução às Ciências do Mar*. **Pelotas: Editora Textos**, 2015. p. 226-255.

CARONTE – Fonte: [www.fsc.ufsc.br/~tati/caronte](http://www.fsc.ufsc.br/~tati/caronte). Acesso em 15/04/2021.

Cartwright, D. E. *Tides - a scientific history*. **Cambridge University Press, Cambridge, UK**, 1999.

Case, J. (março de 2000). «*Understanding Tides — From Ancient Beliefs to Present-day Solutions to the Laplace Equations*». **SIAM News**. **33** (2)

Casotto, S.; Biscani, F. *A fully analytical approach to the harmonic development of the tide-generating potential accounting for precession, nutation, and perturbations due to figure and planetary terms*. In: **AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting# 35**. 2004, p. 08.05.

CDSB, 2008. *Johannes Kepler. Complete Dictionary of Scientific Biography*, first ed. Charles Scribner's Sons, New York (ebook).

Cesalpino, A. *Quaestionum peripateticarum libri V*, Venice: Iuntas, 1571, 70r–71v.

Chi, M. T. H., et al. *Eliciting self-explanations improves understanding*. **Cognitive science**, v. 18, n. 3, p. 439-477, 1994.

Childrey, J., 1670. A letter of Mr. Joseph Childrey to the Right Reverend Seth Lord Bishop of Sarum, containing some animaversions upon the Reverend Dr. John Wallis's

hypothesis about the flux and reflux of the sea, publish't No. 16. of these tracts. Philos. Trans. R. Soc. 5, 2061–2068. <https://doi.org/10.1098/rstl.1670.0050>

Clancy, P. E. (1969). *The tides* (New York: Anchor Books Doubleday & Company).

Clavelin, M. Galilée et le refus de l' équivalence des hypotheses. In: V.V.A.A. *Galilée. Aspects de sa vie et de son oeuvre*. Paris: PUF, 1968. p. 147-54.

Cohen, I. B. Galileo, Newton and the divine order of the solar system. In: McMullin, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988. p. 407-31.

Cohen, R. S. et al. (Ed.). *Essays in memory of Imre Lakatos*. Dordrecht: Reidel, 1976.

Corrochano, D., et al. *Ideas de estudiantes de instituto y universidad acerca del significado y el origen de las mareas*. 2017.

Craik, A. D. D. *Thomas Young on fluid mechanics*. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 67, p. 95-113, 2010.

Cregg, P. J. *Just how much do the planets affect the tides?*. **Physics Education**, v. 52, n. 5, p. 053003, 2017.

Creswell, J. W. (2003). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (2nd ed.). Thousand Oaks: Sage Publications.

Curcio, R., Quinto et al. *De la vida y acciones de Alexandro el grande* - traducido de la lengua latina en la española por D. Matheo Ibañez deSegovia y Orellana. 1974. Tese de Doutorado.

Da Silva, F. P. *O fenômeno das marés: Gravitação e Astronomia numa proposta de unidade de ensino potencialmente significativa para o ensino médio*. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo.

Da Silva, K. M. E.; Do Amaral, E. M. R.; De Oliveira, M. A. B. *Maré, mangue ou manguezal: uma análise de concepções de estudantes no Ensino Fundamental*. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 12, n. 3, p. 151-171, 2012.

Da Silva, T. *No céu, na Terra e na tela*. **XX Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF 2013** – São Paulo, SP - 20 a 25 de janeiro de 2013.

Da Silveira, F. L. *Marés, fases principais da Lua e bebês*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n. 1, p. 10-29, 2003.

Dantas, J. H. S. *Um material para professores de Física sobre o ensino de marés na Educação Básica*. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Daumas, M. *Histoire générale des techniques*. Paris: PUF, 1964. 5v.

Deacon, M., 1971. *Scientists and the Sea, 1650–1900: A Study of Marine Science*. Academic Press, London. 445pp.

De Jesus, A, M. et al. *Concepções apresentadas por estudantes do ensino médio da Baía de Camamu e de São Miguel das Matas com relação ao fenômeno das marés*. 2018.

De Jong, M. L. Using tide data in introductory classes. **The Physics Teacher**, v. 44, n. 8, p. 504-508, 2006.

De Levie, R. *Tidal analysis on a spreadsheet*. **American Journal of Physics**, v. 72, n. 5, p. 644-651, 2004.

DE MESQUITA, Afranio Rubens. Marés, circulação e nível do mar na Costa Sudeste do Brasil. **Laboratório MAPTOLAB (Laboratório de Marés e Processos Temporais Oceânicos): www.mares.io.usp.br Ícone Marés**, 1997.

Descartes, R. *Le monde ou Traité de la Lumiere*. In: Adam, C. & Tannery, P. (Ed.). *Œuvres de Descartes*. Paris: Vrin, 1996. v. 11, p. 3- 118.

Dondi, J. (dall’Orologio): *De fluxu et refluxu maris*. Editado em 1912 por P. Revelli.

Duit, R., et al. The model of educational reconstruction – A framework for improving teaching and learning science. In: **Science education research and practice in Europe**. Brill, 2012. p. 13-37.

Duit, R., Komorek, M. & Wilbers, J. 1997. Studies on the educational reconstruction of chaos theory. *Research in Science Education* 27(3), 339-357

Durand-Richard Marie-José. De la prédiction des marées: entre calcul, observations et mécanisation (1831-1876). **Cahiers François Viète**, n. II-8/9, p. 105-135, 2016.

Dúvida sobre Força de maré – Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=duvida-sobre-a-forca-de-mare#:~:text=As%20for%C3%A7as%20inerciais%20centr%C3%ADfugas%20devidas,com%20os%20efeitos%20de%20mar%C3%A9>. Acesso em 01/02/2023.

Edocente – Fonte: <<https://www.edocente.com.br/>>. Acesso em 10/01/2021 (e algumas obras do PNLD).

Efeitos de maré na Terra dos demais planetas do sistema solar? – Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=efeitos-de-mare-na-terra-dos-demais-planetado-sistema-solar>. Acesso em 04/04/2023.

Einstein, A., 1954. *Ideas and Opinions*. (Translated by S. Bargmann). Crown Publishers, London, ISBN: 978-0-285-64724-4.

Ekman, M. *A concise history of the theories of tides, precession-nutation and polar motion (from antiquity to 1950)*. **Surveys in Geophysics**, v. 14, n. 6, p. 585-617, 1993 (e suas referências).

ExploreLearning – Fonte: <[www.explorelarning.com/index.cfm?method=cResource.dspExpguide&ResourceID=368](http://www.explorelarning.com/index.cfm?method=cResource.dspExpguide&ResourceID=368)>. Acesso em 04/04/2023.

Explorers Presentation - *Explaining the Tides to children (2015)* – Fonte: <https://oar.marine.ie/handle/10793/1112>. Acesso em: 04/04/2023.

Fachini Baptista, C. M.; Lawall, I. T.; Clement, L. *Significados produzidos por estudantes do ensino médio sobre fenômeno das marés em aulas investigativas*. **Revista electrónica de investigación en educación en ciencias**, v. 15, n. 1, p. 33-49, 2020.

Fara, P., 1996. *Sympathetic Attractions: Magnetic Practices, Beliefs, and Symbolism in Eighteenth-Century England*. Princeton University Press, New Jersey. 326 pp.

Ferguson, J., 1773. *Select Mechanical Exercises Shewing How to Construct Clocks, Orreries and Sun Dials on Plain and Easy Principles*. Strahan and Cadell, London. 272 pp.

Ferreira, J. C., *Discutindo A Física Das Marés Como Proposta Para A Crise De Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Biociências) – Instituto Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro, 2016.

Ferrogliia, A.; Fiolhais, M. C. N. *Tidal locking and the gravitational fold catastrophe*. **American Journal of Physics**, v. 88, n. 12, p. 1059-1067, 2020.

- Finocchiaro, M. A. Commentary: dialectical aspects of the copernican revolution: conceptual elucidations and historiographical problems. In: WESTMAN, R. S. (Ed.). *The copemican achievement*. Berkeley: University of California Press, 1975. p. 404-14.
- Fiolhais, M.; Golli, B.; Nogueira, R. *Mechanical apparatus for the fold catastrophe demonstration*. **European Journal of Physics**, v. 42, n. 4, p. 045001, 2021.
- Fleck, E. C. D.; Biehl, M.. *Sobre os céus e as marés do Pacífico: as observações astronômicas do jesuíta Nicolás Mascardi (Chile, século XVII)*. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 6, n. 12, 2014.
- Findlen, P. (Ed.), 2004. Athanasius Kircher: The Last Man Who Knew Everything. Routledge, New York. 464 pp
- Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) - Fonte: <<https://www.fnde.gov.br/index.php/programas/programas-do-livro/pnld/guia-do-pnld>>. Acesso em 10/01/2021 (e os livros no PNLD 2015 e 2018).
- Furlong, Guillermo, S.J. *Entre los Tehuelches da Patagonia*. Buenos Aires: San Pablo, 1943
- Galilei, G. *Diálogo Sobre Os Dois Máximos Sistemas Do Mundo Ptolomaico e Copernicano*. Tradução de Pablo Ruben Mariconda. 3a. ed. Editora 34, 2011.
- Galili, I.; Lehavi, Y. *The importance of weightlessness and tides in teaching gravitation*. **American Journal of Physics**, v. 71, n. 11, p. 1127-1135, 2003.
- Garcia da Silva, M.; Ferreira, H. S. *Modelo de reconstrução educacional como um aporte teórico e metodológico para o design de ambientes de ensino e aprendizagem da ciência*. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 1, 2020.
- Garrick-Bethell, I. et al. *The tidal–rotational shape of the Moon and evidence for polar wander*. **Nature**, v. 512, n. 7513, p. 181-184, 2014.
- Glassie, J., 2012. A Man of Misconceptions: The Life of an Eccentric in an Age of Change. Riverhead Books, New York. 333 pp.
- Goldstein, H.; Poole, C.; Safko, J.. *Classical mechanics*. 2002.
- Griffin, A. *Tides, as explained by Newton*. **Physics Education**, v. 43, n. 2, p. 129, 2008.

Gross, R. S. The effect of ocean tides on the Earth's rotation as predicted by the results of an ocean tide model. **Geophysical research letters**, v. 20, n. 4, p. 293-296, 1993.

Hake, R. R. *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses*. **Am. J. Phys.** 66, 64 (1998)

Haigh, I. D. et al. *The tides they are a-Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications*. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. e2018RG000636, 2020.

Harper, W.L., 2011. Isaac Newton's Scientific Method: Turning Data into Evidence about Gravity and Cosmology. Oxford University Press, Oxford. 444 pp.

Harris, R.A., 1898. Manual of Tides, Part 1. (Appendix No. 8 of US Coast and Geodetic Survey Report for 1897). Government Printing Office, Washington, D.C. Available from Google Books Härtel, H. *The tides-a neglected topic*. **Physics Education**, v. 35, n. 1, p. 40, 2000.

Hecht, E., 2019. *Kepler and the origins of the theory of gravity*. **Am. J. Phys.** 87, 176–185. <https://doi.org/10.1119/1.5089751>.

Hewitt, P. *Física Conceitual-12*. **Bookman Editora**, 2015.

Hicks, S. D. *Understanding tides*. **US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service**, 2006

Hodges, L. *Tides, eclipses, and the densities of the sun and the moon*. **The Physics Teacher**, v. 25, n. 7, p. 427-427, 1987.

Hutchinson, W., 1777. A Treatise on Practical Seamanship. Reprinted 1787 and available at British library. Reprinted 1979 by Scholar Press, London, p. viii. xiv, 213, pl.10, map. 27 cm.

Hutchinsonianos – Fonte: <[https://www.britishmuseum.org/collection/object/P\\_Cc-2-255](https://www.britishmuseum.org/collection/object/P_Cc-2-255)>. Acesso em 04/04/2023.

Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) – Censo de 2000. Disponível em: <<https://www.data.rio/documents/58186e41a2ad410f9099af99e46366fd/about>>. Acesso em 04/04/2023.

Influência dos ventos nas marés – Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=diversas-influencias-sobre-as-mares>. Acesso em 04/04/2023.

Intergovernmental Oceanographic Commission- IOC. 2002. *Manual on sea level measurement and interpretation*. Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. IOC – **Intergovernmental Oceanographic Commission, Manual and Guides** No. 14, UNESCO 2002. 49p. Stewart 2004.

Iparraguirre, L. M. *Las mareas*. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 13, n. 2, p. 25-36, 2000.

Irby-Massie, G. L.; Keyser, P. T. *Greek Science of the Hellenistic Era: A Sourcebook*. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=SA2uJ21epQC&pg=PA146&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Jänicke, L. et al. Assessment of tidal range changes in the North Sea from 1958 to 2014. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 126, n. 1, p. e2020JC016456, 2021.

Jammer, Max; Ribeiro, Vera. **Conceitos de força: Um estudo sobre os fundamentos da dinâmica**. Contraponto Editora, 2021.

Kattmann, U. (2007). Learning biology by means of anthropomorphic conceptions? In M. Hamman et al. (Eds.), *Biology in context: Learning and teaching for 21st century* (pp. 21–26). London: Institute of Education, University of London.

Kapoulitsas, G. M. *On the generation of tides*. **European Journal of Physics**, v. 6, n. 3, p. 201, 1985.

Kibble, T.; Berkshire, F. H. *Classical mechanics*. world scientific publishing company, 2004.

Koestler, A. *The sleepwalkers: A history of man's changing vision of the universe*. Penguin UK, 2017.

Kulesza, W., *Previsão Astronômica Através Da Observação Das Marés*. **Revista de Ensino de Física**, vol. 10, dez. 1998.

Kvale. Tidal constituents of modern and ancient tidal rhythmites: criteria for recognition and analyses. In: **Principles of tidal sedimentology**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p.1-17

Lalande, J. J., 1781. *Traité du flux et du reflux de la mer*. In: *Astronomie*. Tome 4. Chez la veuve Desaint, Paris. 348pp.

Landau, L. D.; Kitaigorodski, A. I. *Física para Todos – Libro I – Cuerpos Físicos*. Editorial MIR – Moscú, 1997.

Langhi, R. *Educação em Astronomia: da revisão bibliográfica sobre concepções alternativas à necessidade de uma ação nacional*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 2, p. 373-399, 2011.

Langhi, R.; Nardi, R. *Dificuldades de professores dos anos iniciais do ensino fundamental em relação ao ensino da Astronomia*. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 2, p. 75-91, 2005.

Laplace, P.S., 1775. *Recherches sur plusieurs points du système du monde*. Mem. Acad. R. Sci. Paris 88, 75–182 (Reprinted in *Oeuvres Complètes de Laplace*, Gauthier-Villars, Paris, 9 (1893)).

Laplace, P.S., 1776. *Recherches sur plusieurs points du système du monde*. Mem. Acad. R. Sci. Paris 89, 177–264 (Reprinted in *Oeuvres Complètes de Laplace*, Gauthier-Villars, Paris, 9 (1893)).

Lefevre; le Provost; Lyard. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.105, n.C4, p.8707-8725, 2000.

Linjse, P. (1995). ‘Developmental research’ as a way to an empirically based ‘didactical structure’ of science. *Science Education*, 79, 189–199.

Lino, A. et al. *A Concepção Sobre Marés Dos Estudantes Do Litoral Norte Paulista: Investigando As Relações existentes com o desenvolvimento Histórico Do Conceito*. In: **11º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IFSP**. 2020.

Lopes, W. *Efeitos das Marés Sobre o Sistema Terra-Lua*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 18, n. 4, p. 286-292, 1996.

Loxson, F. M. *Explaining tides*. **The Physics Teacher**, v. 15, n. 5, p. 304-304, 1977.

Machado, R. R.; Tort, A. C.; Zarro, C. A. D. O princípio da equivalência: Uma introdução à relatividade geral. *A Física na Escola*, v. 19, n. 2, 2021.

- Machado, R. R.; Tort, A. C.; Zarro, C. A. D. Squashing and spaghettification in Newtonian gravitation. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.
- Mackenzie, M., 1749. The state of the tides in Orkney. *Philos. Trans. R. Soc.* 46, 149–160. <https://doi.org/10.1098/rstl.1749.0029>
- Maremotriz – Fonte: <https://blog.esferaenergia.com.br>. Acesso em: 04/04/2023.
- Mariconda, P. R. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano*. 2011.
- Mariconda, P. R. *Francis Bacon e as marés: a concepção da natureza e o mecanicismo*. **Scientiae Studia**, v. 5, p. 501-519, 2007.
- Mariconda, P. R. *Galileu e a teoria das marés*. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, n. 1-2, p. 33-71, 1999.
- Mariconda, P. R. *O alcance cosmológico e mecânico da carta de G. Galilei a F. Ingoli*. **Scientiae Studia**, v. 3, p. 443-466, 2005.
- Marion, J. B.; Thornton, Stephen T. *Classical mechanics of particles and systems*. **Saunders College, Forth Worth, Philadelphia**, 1995.
- Marmer, H. A. *On cotidal maps*. **Geographical Review**, v. 18, n. 1, p. 129-143, 1928.
- Marmer, H. A. *Problems of Tides*. **The Scientific Monthly**, Vol. 14, No. 3 (Mar., 1922), pp. 209-222.
- Marmer, H. A. *Tides in the Bay of Fundy*. **Geographical Review**, v. 12, n. 2, p. 195-205, 1922.
- Martinez, R. Garcia; VIDAL, W. P. Novo olhar. **Geografia**, v. 1, 2013.
- Martins, L. A. C. P. *História da ciência: objetos, métodos e problemas*. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 02, p. 305-317, 2005.
- Martins, R. A. *Galileo e a rotação da Terra*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 11, n. 3, p. 196-211, 1994.
- Masi, M. *On compressive radial tidal forces*. **American Journal of Physics**, v. 75, n. 2, p. 116-124, 2007.

Maury, J. P. *Marées*. In: Lecourt, D. (Ed.). Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences. Paris: PUF, 1999. p. 608-11

McCully, J. G. *Beyond the moon: A conversational common sense guide to understanding the tides*. World Scientific, 2006.

McGee, C. Jean Le Rond d'Alembert biography of a mathematician, philosopher, and man of. 2008.

McMullin, E. The fertility of theory and the unit of appraisal in science. In: Cohen, R. S. et al. (Ed.). *Essays in memory of Imre Lakatos*. Dordrecht: Reidel, 1976. p. 395-43~.

McTighe, T. P. Galileo's 'platonism': a consideration. In: McMullin, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988, p. 365-87.

Miami Herald, July 2, 1996. Disponível em:

<https://miamiherald.newspapers.com/paper/the-miami-herald/881/>. Acesso em 25/04/2023.

Millburn, J.R., 1988. *Wheelwright of the Heavens. The Life and Work of James Ferguson, FRS*. Vade-Mecum Press, London. 339pp.

Millet, E. *Another important component of tides*. **The Physics Teacher**, v. 38, n. 1, p. 4-4, 2000.

Ministério da Educação, Guia Digital PNLD 2021: obras didáticas por área de conhecimento e específicas (Ministério da Educação, Brasília, 2021). Disponível: <[https://pnld.nees.ufal.br/pnld\\_2021\\_formacao\\_continuada/inicio](https://pnld.nees.ufal.br/pnld_2021_formacao_continuada/inicio)>. Acesso em 10/01/2021.

Mitchell, H., 1948. *Glossary of Geodesy* (US Government Printing Office)

Moray, R., 1665. A relation of some extraordinary tides in the West-Isles of Scotland, as it was communicated by Sr. Robert Moray. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1, 53–55. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0026>.

Moray, R., 1666. Considerations and enquiries concerning tides; likewise for a further search into Dr. Wallis's newly published hypothesis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1, 298–301. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0113>

Morin, D. *Introduction to classical mechanics: with problems and solutions*. Cambridge University Press, 2008.

Moyses, H. N. *Curso de Física Básica: Mecânica*. 1997.

National Geodetic Survey (US); United States. National Ocean Service. Office of Charting; Geodetic Services. **Geodetic glossary**. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Charting and Geodetic Services, 1986.

Naylor, R. *Paolo Sarpi and the first Copernican tidal theory*. **The British Journal for the History of Science**, v. 47, n. 4, p. 661-675, 2014.

Neta, M. L. S.; Voelzke, M. R. *Uma proposta de ensino sobre marés oceânicas baseada no ciclo de experiência de George Kelly*. **Revista Areté| Revista Amazônica de Ensino de Ciências**, 2020.

Newton, I. *The principia - Mathematical principles of natural philosophy*. Tradução I. B. Cohen & A. Whitman. Berkeley: University of California Press, 1999.

Newton, I. *Principia, Livros II e III—Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. 2020. Tradução de André Koch Torres Assis e Fábio Duarte Joly.

NG, C. K. *How tidal forces cause ocean tides in the equilibrium theory*. **Physics Education**, v. 50, n. 2, p. 159, 2015.

Nolan, C. Interestelar (2014). Disponível em: <  
<https://www.youtube.com/watch?v=0mkMFHkhcTo&t=69s>>. Acesso em 04/04/2023.

Nussbaum, J. *Children's Conceptions of the Earth as a Cosmic Body: A Cross Age Study*. **Science education**, v. 63, n. 1, p. 83-93, 1979.

Oh, J. Y. *Understanding the alternative conceptions of pre-service secondary science teachers about tidal phenomena based on Toulmin's argumentation*. **International Journal of Science and Mathematics Education**, v. 12, p. 353-370, 2014.

Olson, D. W.; Lytle, T. E. *High tides?*. **The Physics Teacher**, v. 37, n. 9, p. 517-517, 1999.

Open University Course Team 2002. *Waves, tides and shallow-water process*. 2th ed. England. 227p.

- Pagnini, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. 4v.
- Palmerino. *The Reception of the Galilean Science of Motion in Seventeenth-Century Europe*, pp. 200 op books.google.nl
- Paula, A. S. P.; Oliveira, H. J. Q. *Análises e propostas para o ensino de Astronomia*. Disponível em: <<http://cdcc-gwy.cdcc.sc.usp.br/cda/erros-no-brasil/index.html>>. Acesso em: 04/04/2023.
- Pereira, A. P.; Ostermann, F. *Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente*. **Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 14, n. 3 (dez. 2009), p. 393-420**, 2009.
- Philips, H. *A letter written to Dr. John Wallis by Mr. Henry Philips, containing his observations about true time of the tides*. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 3, n. 34, p. 656-659
- Pinet, P. R. *Invitation to Oceanography*. Jones & Bartlett Publishers. 2008.
- Português, E. H. *"Theorica Verdadeira das Marés" (1737): O primeiro texto newtoniano. em português*. I.C. Moreira; C. A. Nascimento; L. R. Oliveira.
- Popper, K. R. *Objective knowledge*. Oxford: Clarendon Press, 1974.
- Proudman, J. *Dynamical oceanography*. Methuen, 1953.
- Ptolemeu com Frank E. Robbins, trans., *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Book 1, chapter 2.
- Pugh, D.T., Woodworth, P.L., 2014. *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN: 9781107028197. 408 pp.
- Pujol, O.; Lagoute, C.; Pérez, J. P. *Weight, gravitation, inertia, and tides*. **European Journal of Physics**, v. 36, n. 6, p. 065012, 2015.
- Quincey, P. *Why we are unmoved as oceans ebb and flow?*. **Skeptical Inquirer**, v. 18, p. 509-515, 1995.
- RAO, Suvrat; BRÜGGEN, Marcus; LISKE, Jochen. Detection of gravitational waves in circular particle accelerators. **Physical Review D**, v. 102, n. 12, p. 122006, 2020.

- Razmi, H. *On the tidal force of the Moon on the Earth*. **European journal of physics**, v. 26, n. 5, p. 927, 2005.
- Reilly, C., 1974. Athanasius Kircher S.J.: Master of a Hundred Arts, 1602–1680. Edizioni del Mondo, Wiesbaden and Rome. 207 pp.
- Reinfried, S.; Mathis, C.; Kattmann, U.. Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. **Beiträge zur Lehrerbildung**, v. 27, n. 3, p. 404-414, 2009.
- Rees, G** (Ed.). *Philosophical studies* c. 1611-c. 1619. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1996. (The Oxford Francis Bacon, vi).
- Robbins, F. E. Tradução de *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Livro 1, Cap. 2.
- Rodrigues, M. H. S.; Pinon, J. de C. S.; Lopes, S. S.; Souza, N. S. B. *Estudando o Fenômeno das Marés na Praia de Ajuruteua-Pará: Uma Proposta de Ensino a partir da Aprendizagem Centrada em Eventos*. **XI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – XI ENPEC**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – 3 a 6 de julho de 2017.
- Rosa, C. A. P. *História da ciência: da antiguidade ao renascimento científico*. In: **História da ciência: da antiguidade ao renascimento científico**. 2012. p. 469-469.
- Rosmorduc, J.; Fernandes, C. *De Tales a Einstein: história da Física e da química*. 1983.
- Roos, A.M., 2001. Thomas Philipot and chemical theories of the tides in seventeenth century England. *Ambix* 48, 125–136. <https://doi.org/10.1179/amb.2001.48.3.125>.
- Rossi, P. *La scienza e la filosofia dei moderni*. Torino: Bolati Boringuieri, 1989.
- Rossiter, J.R., 1971. The history of tidal predictions in the United Kingdom before the twentieth century. *Proc. R. Soc. Edinb. B* 73, 13–23. <https://doi.org/10.1017/S0080455X00002071>
- Russo, L. *Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens*. Übersetzt aus dem Italienischen von Bärbel Deninger, Springer 2005, ISBN 978-3-540-20938-

6, <http://books.google.com.br/books?id=iIsfBAAAQBAJ&pg=PA351&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Sant'Anna, A. S.; Afonso, G. B. *On the tidal time delay of the Earth*. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 16, p. 3-14, 1998.

Saraiva, M. F. O. **Astronomia & Astrofísica**. Editora Livraria da Física, 2004.

Saraiva, M. F. O.; da Silveira, F. L.; Steffani, M. H. *Concepções de estudantes universitários sobre as fases da Lua*. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 11, p. 63-80, 2011.

Sawicki, M. *Is the moon falling upside down?*. **The Physics Teacher**, v. 35, n. 6, p. 379-381, 1997.

Sawicki, M. *Myths about gravity and tides*. **The Physics Teacher**, v. 37, n. 7, p. 438-441, 1999.

Science in School – Fonte: <https://www.scienceinschool.org/>. Acesso em 04/04/2023.

Shadyac, T. (2003). O Todo Poderoso. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=GdrlHHupGEQ&t=55s>>. Acesso em 04/04/2023.

Shea, N. M. *Estimating the power in the tides*. **The Physics Teacher**, v. 25, n. 7, p. 426-426, 1987.

Shea, W. *Descartes as critic of Galileo*. In: BuTTS, R. E. & PITT, J. C. (Ed.). *New perspectives on Galileo*. Dordrecht: Reidel, 1978. p. 139-59.

Shum, C. K. et al. *Accuracy assessment of recent ocean tide models*. **Journal of geophysical research: oceans**, v. 102, n. C11, p. 25173-25194, 1997.

Silva, A. A. *Uma modelização didáctica das marés*. *Gazeta de Física*, vol 21, FASC. 3., p.2-8 (1998). Disponível em: <[nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/21\\_3/002-008.large.pdf](http://nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/21_3/002-008.large.pdf)>. Acesso em 27 jul. 2012.

Simanek, D. E. *Tidal Misconceptions*. **Recovered from: <https://www.lockhaven.edu/~dsimanek/scenario/tides.htm>**, 2015.

Skamp, K. *Determining misconceptions about astronomy*. **Australian Science Teachers Journal**, v. 40, n. 3, p. 63-67, 1994.

Sneider, C.; Pulos, S. *Children's Cosmographies: Understanding the Earth's Shape and Gravity*. **Science Education**, v. 67, n. 2, p. 205-21, 1983.

Soares, R. G.; de Amorim, H. S. *Um marógrafo ultrassônico baseado na placa Arduino para investigação do fenômeno das marés*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 2, p. 925-943, 2020.

Sosio, L. Galileo e la cosmologia. In: Galileu Galilei. *Dialogo soprai due massimi sistemi del mondo*. Introdução e notas L. Sosio. Torino: Giulio Einaudi Editore, 1970. p. ix-lxxxvii.

Stevin, S.; Crone, E. **Principal works**. CV Swets & Zeitlinger, 1955.

Tábua das Marés – Marinha do Brasil – Fonte:

<<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>>. Acesso em 04/04/2023.

Taylor, I.; Barker, M.; Jones, A.. Promoting mental model building in astronomy education. **International Journal of Science Education**, v. 25, n. 10, p. 1205-1225, 2003.

Teoria de marés da Galileu - Fonte: <<https://cref.if.ufrgs.br>>. Acesso em: 04/04/2023.

Thomson, W. (Lord Kelvin), 1882. *The Tides: Evening lecture to the British Association at the Southampton meeting*. Disponível em: <https://sourcebooks.fordham.edu/mod/1882kelvin-tides.asp>

Tidal heating – Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_heating)>. Acesso em 04/04/2023.

Todorov, I. *Galileo (1564-1642) and Kepler (1571-1630): the modern scientist and the mystic*. **arXiv preprint arXiv:1610.05749**, 2016.

Tolmacheva, M. (27 de janeiro de 2014). Glick, Thomas F., ed. *Geography, Chorography. Medieval Science, Technology, and Medicine: An Encyclopedia*. [S.l.]: Routledge. p. 188. ISBN 9781135459321

Tonel, A. P.; Marranghello, G. F. *O movimento aparente da Lua*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, 2013.

Tradução comentada dos três primeiros capítulos do *Tetrabiblos* de Ptolomeu, Marcus Reis Pinheiro, Cristina de Amorim Machado, Cad. Hist. Fil. Ci., Campinas, Série 4, v. 1, n. 2, p. 301-332, jul.-dez. 2015, p.312.

Trundle, K. C.; Atwood, R. K.; Christopher, J. E. *Preservice elementary teachers' conceptions of moon phases before and after instruction*. **Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching**, v. 39, n. 7, p. 633-658, 2002.

Tsantes, E. *Note on the tides*. **American Journal of Physics**, v. 42, n. 4, p. 330-333, 1974.

Tyson, P., 2002. *Galileo's Big Mistake*. NOVA Science Trust.  
<https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/galileo-big-mistake/>.

Ucar, S. *Using inquiry-based instruction with web-based data archives to facilitate conceptual change about tides among preservice teachers*. 2007. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

Udías, A., 2020. *Athanasius Kircher and terrestrial magnetism: the magnetic map*. J. Jesuit Stud. 7, 166–184. <https://doi.org/10.1163/22141332-00702002>.

Unesco 1985. *Manual de medição e interpretação do nível do mar*. Comissão Oceanográfica Internacional. 82p.

van Lunteren, F., 1993. Eighteenth-century conceptions of gravitation. In: Petry, M.J. (Ed.), *Hegel and Newtonianism*. Archives Internationales D'Histoire des Idées/International Archives of the History of Ideas, vol. 136. Springer, Dordrecht, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1662-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1662-6_24).

Variação de maré na costa brasileira – Fonte:

<<https://www.engeplus.com.br/noticia/viagens/2010/variacao-de-mare-chega-a-oito-metros-na-costa-brasileira>>. Acesso em 04/04/2023.

Variação de maré no Maranhão – Fonte:

<<https://g1.globo.com/ma/maranhao/maranhao-natureza/noticia/variacao-de-mare-no-maranhao-e-uma-das-maiores-do-mundo.ghtml>>. Acesso em 04/04/2023.

Viiri, J. *Students' understanding of tides*. **Physics Education**, v. 35, n. 2, p. 105, 2000.

- Viiri, J. *Tides in textbooks, expert teachers' ideas and students' understanding*. **Research in Science Education-Past, Present, and Future**, v. 1, p. 116-118, 1999.
- Viiri, J; Saari, H. *Research-based teaching unit on the tides*. **International Journal of Science Education**, v. 26, n. 4, p. 463-481, 2004 (e suas referências).
- Voelkel, J. R. *The composition of Kepler's Astronomia nova*. Princeton University Press, 2002.
- Walker, J. *O grande circo da física*. Lisboa: Gradiva, 1990.
- Wallis, F. *Bede, the Reckoning of Time* (Translated Texts for Historians; V.29). Liverpool University Press, 1999.
- Wallis, J., 1666. *An essay of Dr. John Wallis, exhibiting his hypothesis about the flux and reflux of the sea*. **Phil. Trans. R. Soc. London** 1, 263–281. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0108>. 281-289, <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0109> and 297-298, <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0112>.
- Wendel, J. *New research reveals tidal forces that shaped the Moon*. 2014.
- Wilde, C.B., 1980. Hutchinsonianism, natural philosophy and religious controversy in eighteenth century Britain. *Hist. Sci.* 18, 1–24. <https://doi.org/10.1177/007327538001800101>.
- Wilson, A. J. C. *The Tides and Kindred Phenomena in the Solar System by GH Darwin*. 1962.
- Wolfschmidt, G. *Navigare necesse est – Geschichte der Navigation: Begleitbuch zur Ausstellung 2008/09 in Hamburg und Nürnberg*. Norderstedt, 2008. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=BYyLsHineFAC&pg=PA25&f=false>. Acesso em 04/04/2023.
- Woodworth, P. L. (2010). *A survey of recent changes in the main components of the ocean tide*. *Continental Shelf Research*, 30(15), 1680–1691. doi:10.1016/j.csr.2010.07.002.
- Woodworth, P.L., 2002. *Three Georges and one Richard Holden: the Liverpool tide table makers*. **Trans. Hist. Soc. Lancashire Cheshire** 151, 19–51.

Woodworth, P.L., Rowe, G.H., 2018. *The tidal measurements of James cook during the voyage of the Endeavour*. **Hist. Geo Space Sci.** 9, 85–103. <https://doi.org/10.5194/hgss-9-85-2018>.

Woodworth, P. L. *Tidal science before and after Newton*. In: **A Journey Through Tides**. Elsevier, 2023. p. 3-36 (e suas referências).

Woppelmann, G., Pouvreau, N., Simon, B., 2006. Brest Sea level record: a time series reconstruction back to the early eighteenth century. *Ocean Dyn.* 56, 487–497. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0044-z>

Young T = “A.L.” (1823). *Tides*, **Supplement** to the 4th, 5th and 6th edns of *Encyclopaedia Britannica*, 6 vols (1815–1824), Napier M (ed), vol 6, pp 658–675. Constable, Edinburgh. Also in [8], 2:291–335

Young T = “E.F.G.H.” (1813). *A theory of tides, including the consideration of resistance*. *Nicholson’s J* 35:145–159, 217–227. Also in [8], 2:262–290

## **Apêndice A**

### **Roteiro Didático: Forças de Marés**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

## **FORÇAS DE MARÉS PARA O ENSINO MÉDIO**

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:  
Antônio Carlos Fontes dos Santos

Rio de Janeiro  
26 de junho de 2023

## FORÇAS DE MARÉS PARA O ENSINO MÉDIO

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Orientador:  
Antônio Carlos Fontes dos Santos

### 1. Pergunta motivadora

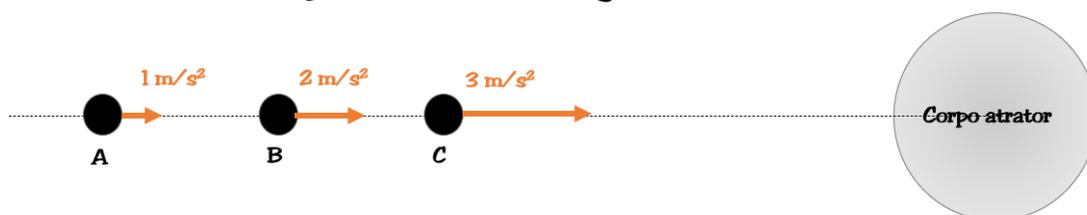
“Se a Lua influencia nos mares e oceanos, por que não influenciaria nos fluidos corporais?”

Essa é uma indagação que não encontrará resposta favorável na ciência, mas isso não significa que ela é desprovida de sentido. Muito pelo contrário, a pergunta está usando um argumento baseado em analogia para persuadir o leitor. Esse tipo de argumento compara duas situações diferentes que têm alguma semelhança, com o objetivo de mostrar que, se algo é verdadeiro em uma situação, também deve ser verdadeiro na outra. No caso da perguntada apresentada, o argumento é que, se a Lua é capaz de influenciar nas marés oceânicas por meio da força gravitacional, então ela também poderia influenciar os líquidos corporais, como o útero da mãe e o crescimento do cabelo. O argumento se baseia na semelhança entre os líquidos corporais e os oceanos em termos de sua composição líquida e na capacidade da Lua de exercer força gravitacional sobre grandes massas de água. De forma simples, se influencia o “grande”, por que não influenciaria o “pequeno”? No entanto, é importante notar que esse argumento é falacioso e não é apoiado pela ciência. Embora a Lua possa afetar as marés, a influência dela sobre os líquidos corporais é insignificante e não tem efeito mensurável sobre o crescimento do cabelo ou qualquer outro aspecto da saúde humana. Só que essa pergunta deverá ser respondida pelos próprios alunos, interagindo com eles em torno de 5 min. Ao longo da aula, deverá ser fornecidos as ferramentas básicas para respondê-la.

## 2. Sistema de três corpos de mesma massa submetidos a um campo gravitacional não uniforme

Começemos a fornecer tais ferramentas com um exercício elementar que envolve os conceitos básicos de leis newtonianas, baseada em uma figura adaptada de Silveira (2003). O primeiro exemplo será composto por um sistema de três corpos, A, B e C, de mesma massa ( $m = 1 \text{ kg}$ ) submetidos a um campo gravitacional não uniforme, com acelerações distintas, em um referencial inercial, conforme ilustra a figura 1:

**Ex.1:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Suas acelerações estão representadas na figura abaixo.

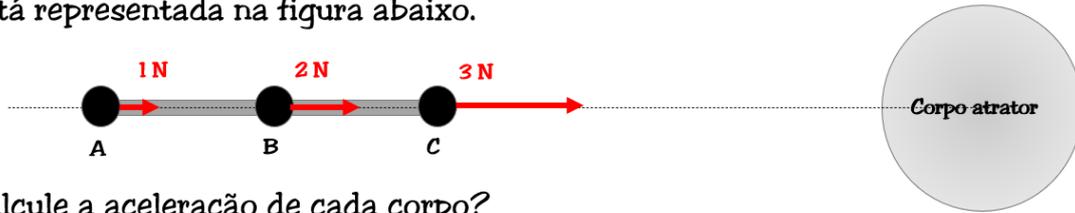


**Figura 1.** Sistema de três corpos de mesma massa submetidos a um campo gravitacional não uniforme. Baseado em da Silveira (2003). Fonte: autor, 2023.

A ideia inicial é somente perguntar aos alunos qual será o valor das forças em cada corpo devido à ação gravitacional do corpo atrator à direita. Não indicaremos, em nossa figura, as forças que cada pequena massa também exerce sobre o corpo atrator; focalizaremos somente o que ocorre com as massas menores, devido à ação do corpo atrator. Geralmente, os alunos levam 2 min aplicando a 2ª lei de Newton, calculando os valores e respondendo ao professor. Feito isso, deverão encontrar os seguintes valores:  $F_A = 1 \text{ N}$ ,  $F_B = 2 \text{ N}$  e  $F_C = 3 \text{ N}$ . Do ponto de vista do corpo B, ele perceberá tanto o corpo A quanto o corpo C, afastando-se de si, tendência esta que se manifestará para qualquer observador.

Em seguida, apresenta-se um exercício muito semelhante, com a diferença de que os corpos agora estão ligados por uma haste fina e leve, configurando um sistema rígido, conforme a figura 2:

**Ex.2:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Agora há uma haste ideal que liga os corpos. As forças que o corpo atrator exerce em cada corpo está representada na figura abaixo.



Calcule a aceleração de cada corpo?

**Figura 2.** Sistema de três corpos de mesma massa ligados por uma haste fina e leve submetidos a um campo gravitacional não uniforme. Baseado em da Silveira (2003).

Fonte: autor, 2023.

Note que agora já é fornecido o valor das forças a que cada corpo está submetido. Contudo, a presença da haste mudará o valor das acelerações a que os corpos estarão submetidos. Então, a ideia aqui é perguntar aos alunos qual o valor das acelerações. Só que esse é um exercício muito comum nas aulas de leis de Newton, pois se trata de um sistema mecânico com um vínculo geométrico em uma dimensão. Dessa forma, os corpos compartilham da mesma aceleração quando a haste estiver tensionada. Os professores costumam realizar vários exemplos como esse em sala de aula: blocos ligados por um fio inextensível, vagões de uma locomotiva modelados de maneira semelhante, etc.

Quando o corpo C é submetido à força gravitacional (3 N), espera-se que ele tenha uma aceleração de  $3 \text{ m/s}^2$ . No entanto, como o corpo C apresenta uma aceleração menor ( $2 \text{ m/s}^2$ ), isso indica que uma força interna está sendo exercida sobre ele pela haste, com direção para a esquerda. Por outro lado, o corpo A tem uma aceleração maior ( $2 \text{ m/s}^2$ ) do que a produzida pelo campo gravitacional ( $1 \text{ m/s}^2$ ), o que sugere a existência de uma força interna atuando sobre ele pela haste, com direção para a direita. Esse exemplo numérico ilustra como um campo gravitacional não uniforme aplicado em um sistema extenso (três corpos, por exemplo) pode levar à geração de forças internas no sistema. Portanto, depois de mais 2 min de interação com os alunos, todos deverão responder corretamente que a aceleração dos corpos é de  $2 \text{ m/s}^2$ , pois  $F_R = (m + m + m) \times a \rightarrow 6 \text{ N} = 3 \text{ kg} \times a \rightarrow a = 2 \text{ m/s}^2$ . Adicionalmente, que há forças internas ao sistema.

Agora, deve-se realizar um exercício de confrontar uma situação real com as situações ideais que os livros trazem. O professor deverá deixar claro que qualquer sistema real (Terra, por exemplo) não é rígido e, portanto, a ocorrência dessas forças

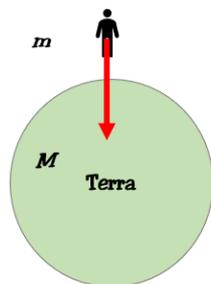
internas, devidas ao campo gravitacional não uniforme externo (Sol ou Lua, por exemplo), dará origem a deformações do sistema (marés). Fornecemos a primeira ferramenta básica para responder à pergunta inicial. É importante enfatizar a necessidade do campo gravitacional não uniforme externo para que ocorra deformações em corpo flexível.

### 3. As marés

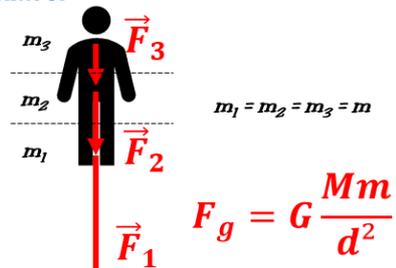
Vamos aplicar esse novo conhecimento do campo gravitacional não uniforme em uma situação lúdica e hipotética. Assim, mostra-se para os alunos as seguintes situações, ambas fora de escala<sup>58</sup>:

i) Partícula

$$\vec{P} = \vec{F}_g = m\vec{g}$$



ii) Corpo extenso



**Figura 3.** Uma partícula e um corpo extenso, ambos submetidos a um campo gravitacional não uniforme. Fonte: autor, 2023.

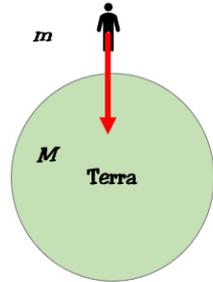
A situação da esquerda mostra uma pessoa sendo atraída nas intermediações da superfície da Terra, ou seja, ela estará submetida a uma força gravitacional (força peso)  $\vec{P} = m\vec{g}$ . A situação da direita mostra uma pessoa “gigante” sendo atraída pelo planeta Terra a uma distância consideravelmente maior que o raio da Terra. Por didatismo, divide-se a pessoa “gigante” em três partes de massas iguais ( $m_1 = m_2 = m_3 = m$ ) e aplica-se a lei da gravitação universal em cada parte, concluindo que o pé do “gigante” estará submetido a uma força gravitacional maior que na barriga, e esta estará submetida a uma força maior que na cabeça (apenas estamos reforçando o conhecimento da proporcionalidade inversamente ao quadrado da distância com a intensidade da força

<sup>58</sup> Todas as imagens apresentadas estão fora de escala.

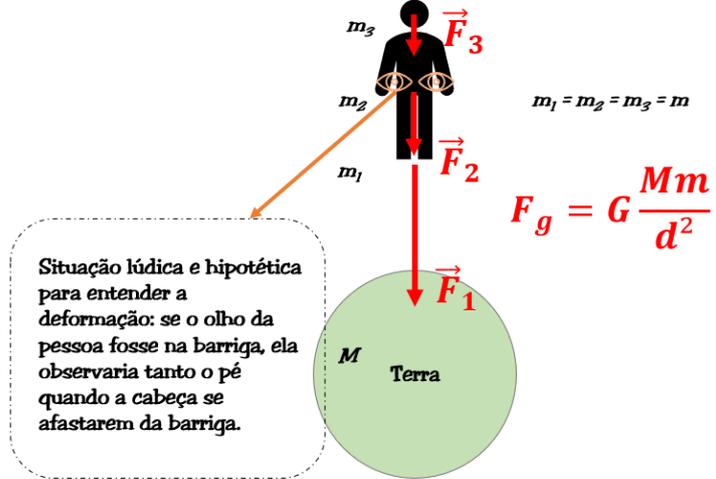
gravitacional). Toda a análise é feita de forma qualitativa, sem contas expressas. Mas agora, pede-se aos alunos que imaginem o olho desse “gigante” em sua barriga.

i) Partícula

$$\vec{P} = \vec{F}_g = m\vec{g}$$



ii) Corpo extenso

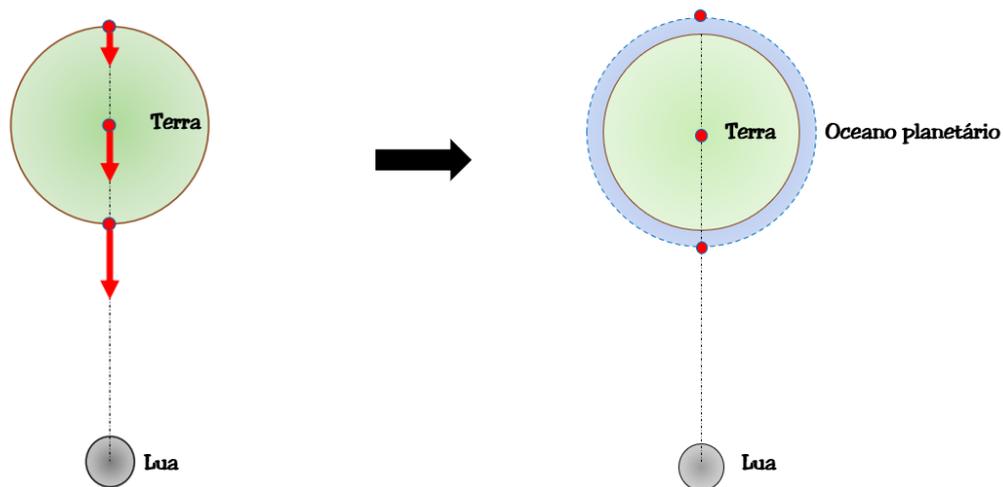


**Figura 4.** A deformação causada em um corpo extenso, quando submetido a um campo gravitacional não uniforme. Fonte: autor, 2023.

Se o olho da pessoa fosse na barriga, ela observaria tanto o pé quando a cabeça se afastarem da barriga, pois o “gigante” é um sistema flexível (e não rígido).

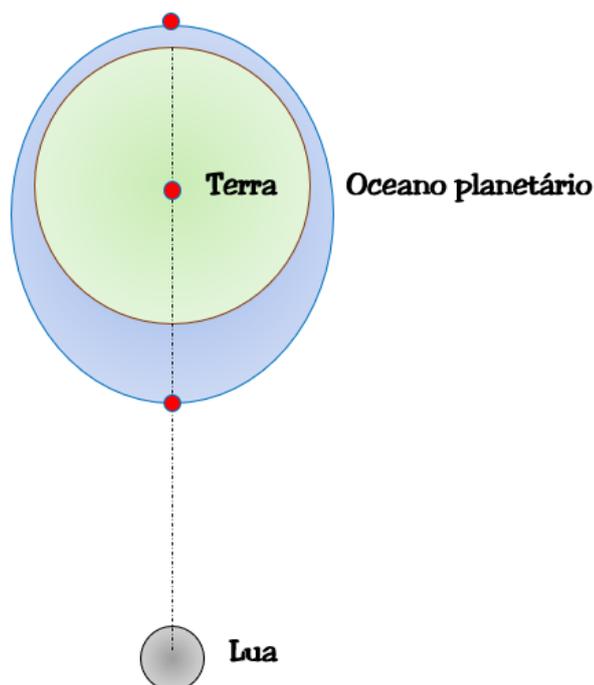
Agora, apliquemos esse conceito do campo gravitacional não uniforme e a consequente deformação de um sistema flexível para o caso real do sistema Terra-Lua par entendermos as marés (figura 5).

### A) Diferença das forças gravitacionais



**Figura 5.** Sistema Terra-Lua. O modelo “estático” das marés adotado é o de Newton. Fonte: autor, 2023.

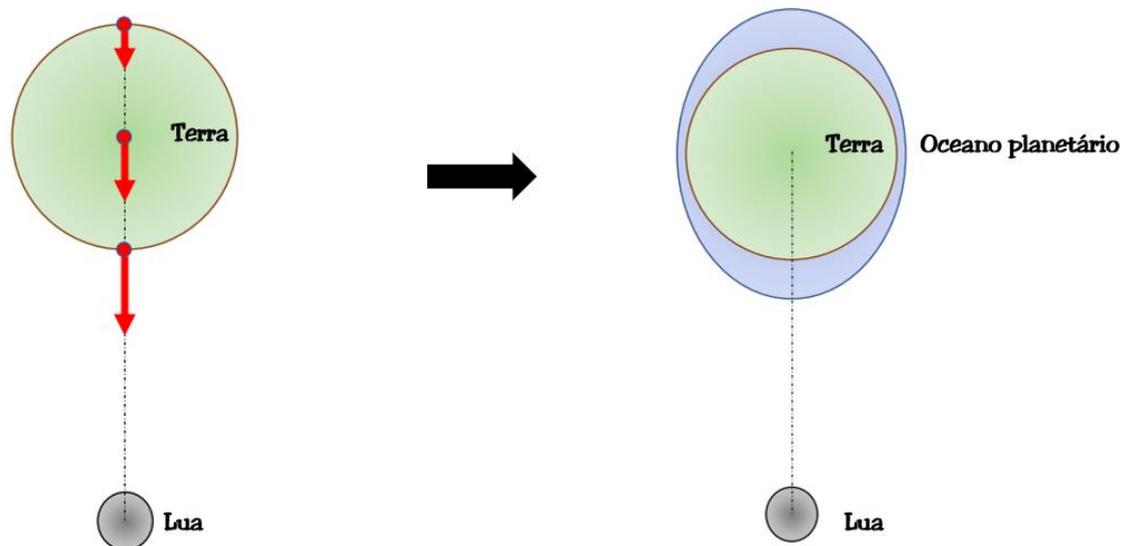
Na figura 5, a imagem da esquerda ilustra as forças gravitacionais que a Lua exerce sobre três pontos distintos da Terra: um ponto mais próximo da Lua, um ponto no centro da Terra e um ponto mais afastado da Lua (diametralmente oposto ao ponto mais próximo da Lua). Aplica-se o conhecimento da lei da gravitação universal, destacando através de setas vermelhas a intensidade da força gravitacional que varia conforme a distância do ponto ao corpo atrator (Lua). A imagem da direita, por outro lado, ilustra a Terra com o oceano planetário. Trata-se de um modelo simplificado da Terra, composta apenas por um oceano liso e sem continentes (sem atrito entre o oceano e os continentes). Pedese aos alunos que desenhem em uma folha de papel a configuração resultante do oceano planetário devido ao campo gravitacional não uniforme da Lua sobre a Terra (é importante frisar que há um campo gravitacional não uniforme lunar). Invariavelmente aparecerá o seguinte desenho:



**Figura 6.** Concepção alternativa muito comum dos estudantes com relação à configuração das marés na Terra devido à Lua. Fonte: autor, 2023.

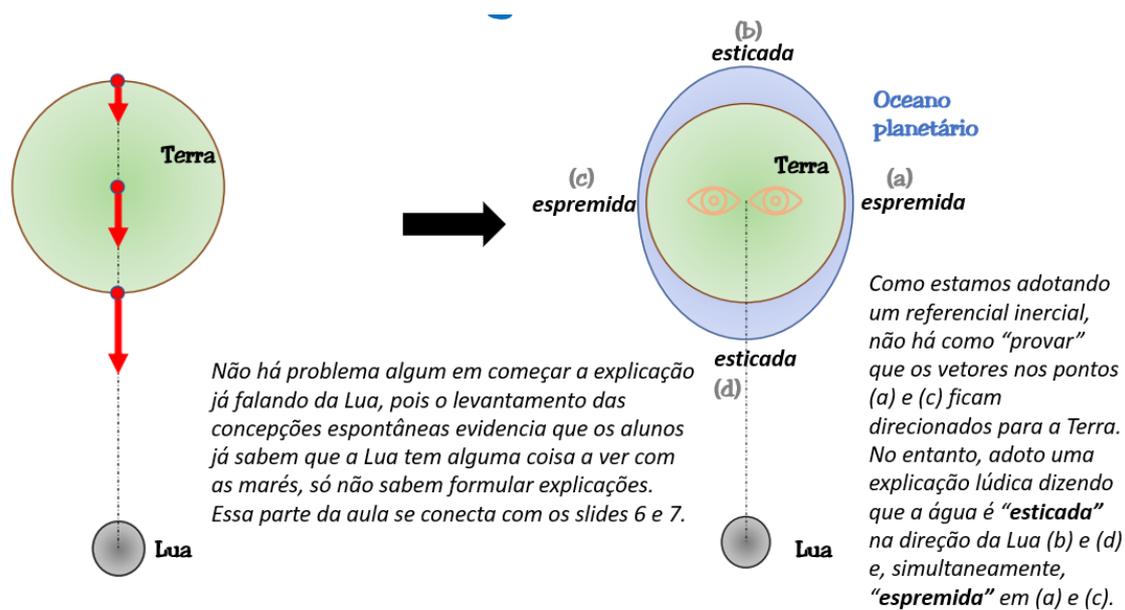
É super esperado que a maioria dos estudantes apresentem desenhos com essa configuração ou que respondam algo próximo disso, pois a lei da gravitação universal induz a pensar dessa forma. No entanto, o raciocínio subjacente à formação de duas protuberâncias (ou bojos) de marés deverá ser explorado pelo professor, sustentado pelos exemplos anteriores, especialmente de considerar uma região central como

referencial inercial para observar o que acontece com as outras regiões. Dificilmente um estudante conseguirá associar tal raciocínio com a seguinte configuração real das duas protuberâncias de maré:



**Figura 7.** Configuração real das marés no modelo “estático”. Fonte: autor, 2023.

O lado da Terra mais próximo da Lua certamente será mais atraído que o centro da Terra, e este, mais atraído que o lado da Terra mais afastado da Lua. No entanto, do ponto de vista do centro da Terra (referencial inercial) percebe-se um afastamento das regiões extremas entre si, ou seja, é o mesmo raciocínio aplicado nos exemplos anteriores do sistema de três corpos e do “gigante”. Daí a configuração resultante ser a formação de duas marés altas em regiões diametralmente opostas, uma do lado mais próximo da Lua e a outra do lado mais afastado da Lua. Como o volume do oceano planetário pode ser considerado constante e ele é flexível, pode-se imaginá-lo como sendo uma goma de mascar, um chiclete que será “esticado” na direção que une a Terra e a Lua e “espremido” na direção perpendicular à Lua, conforme ilustra a figura 8:

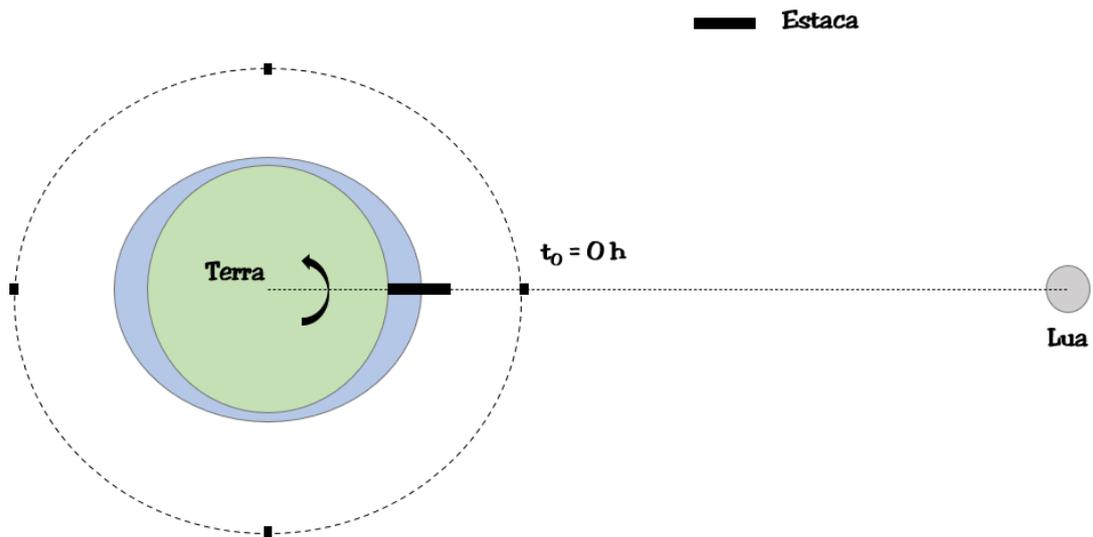


**Figura 8.** Explicação simples e qualitativa das duas protuberâncias de marés na Terra por conta da Lua. Fonte: autor, 2023.

Até aqui, discutiu-se sobre o principal conceito para entender a causa das marés: o campo gravitacional não uniforme lunar (gradiente gravitacional lunar ou força diferencial gravitacional lunar). Passemos agora a discutir sobre a periodicidade das marés por se tratar do outro conceito fundamental a ser explicado para os alunos. É recomendável dar prioridade para a explicação das causas e da periodicidade em relação aos outros conceitos posteriores nessa proposta, caso o professor-leitor tenha tempo limitado em sala de aula.

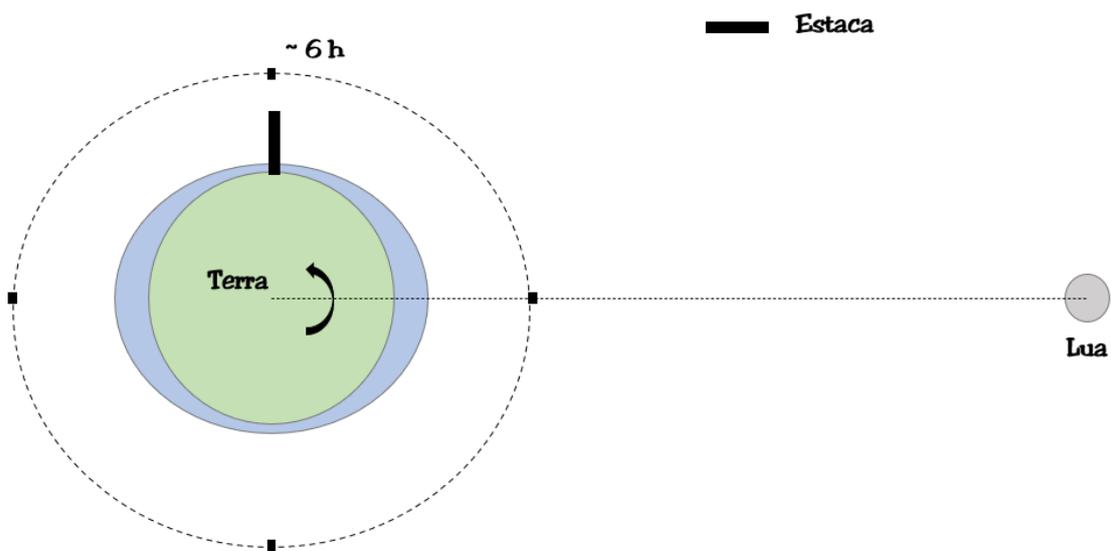
## B) Periodicidade das marés

Imagine uma estaca (pode ser uma pessoa “gigante” para manter a ludicidade) que será fincada sobre um ponto da Terra no instante de tempo  $t_0$ , conforme a figura 9:



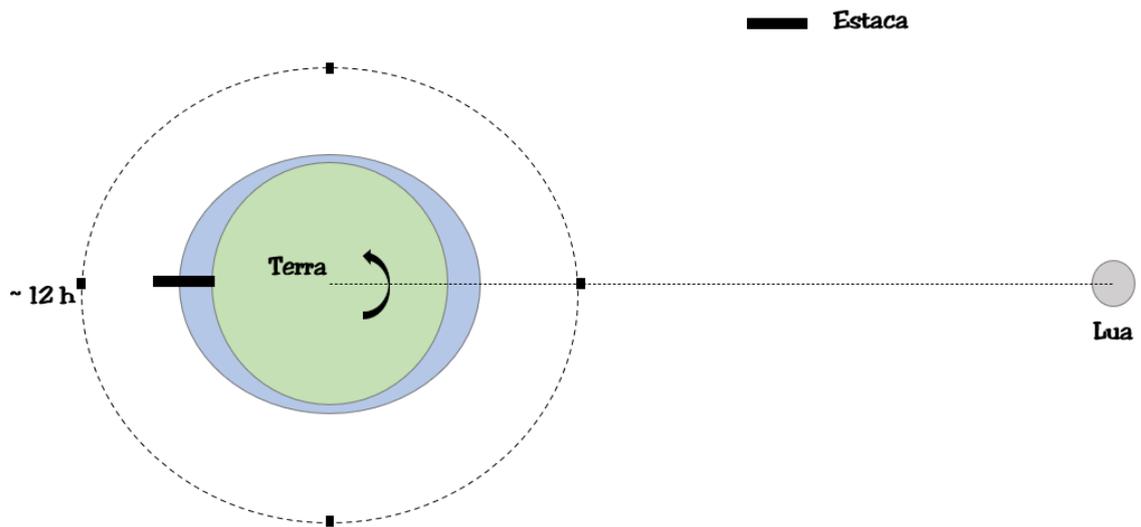
**Figura 9.** Periodicidade das marés [parte 1]. Fonte: autor, 2023.

Como a Terra gira em torno de seu eixo de rotação em um período aproximado de 24 h, depois de 6 h, a estaca deverá ocupar a seguinte posição:



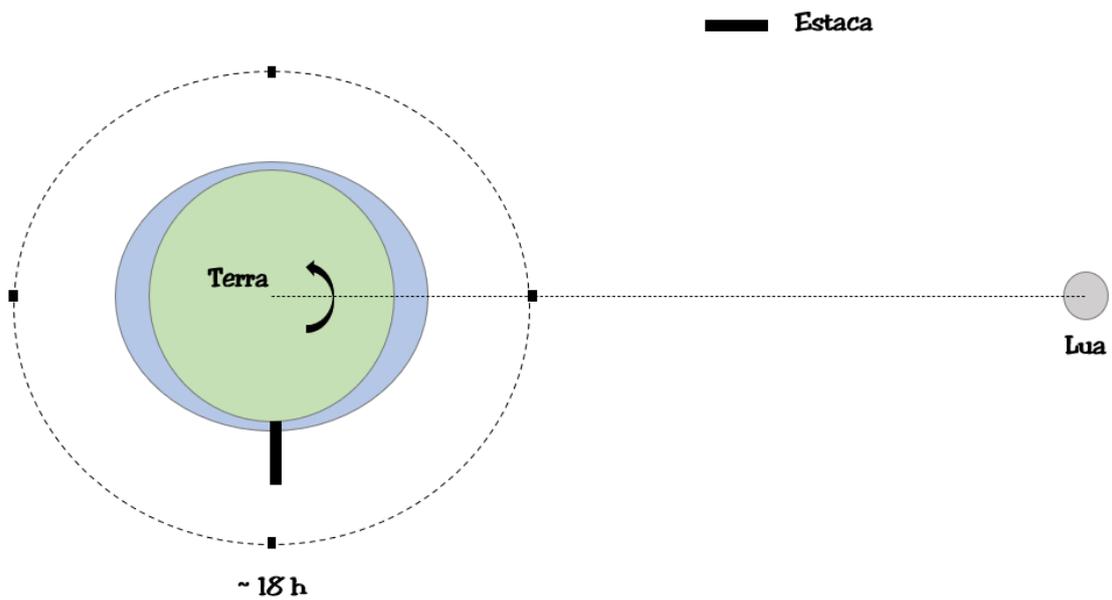
**Figura 10.** Periodicidade das marés [parte 2]. Fonte: autor, 2023.

Passadas mais 6 h (12 h no total), deverá ocupar a seguinte posição:



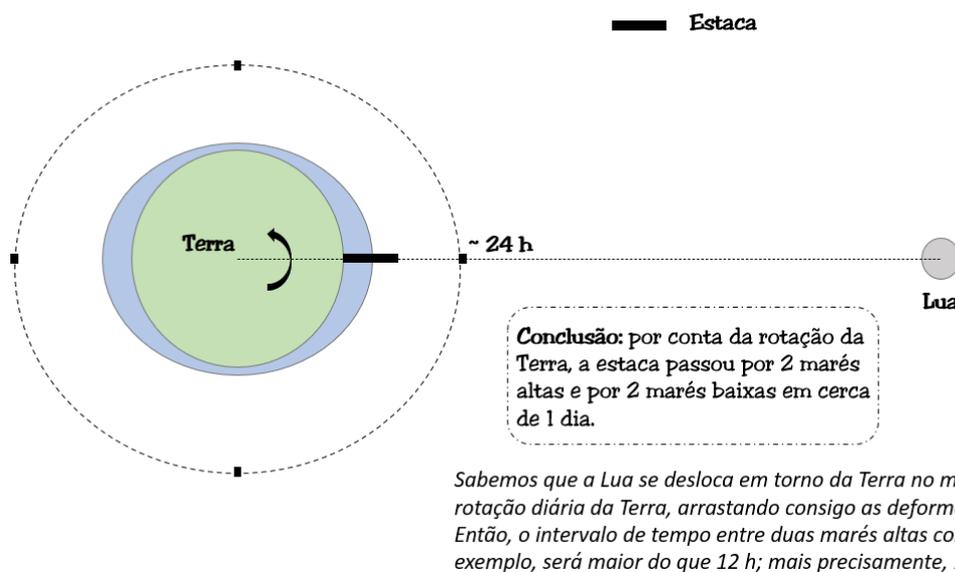
**Figura 11.** Periodicidade das marés [parte 3]. Fonte: autor, 2023.

Passadas mais 6 h (18 h no total), deverá ocupar agora a seguinte posição:



**Figura 12.** Periodicidade das marés [parte 4]. Fonte: autor, 2023.

E, por fim, passadas mais 6 h (24 h no total), deverá retornar à posição original:



**Figura 13.** Periodicidade das marés [parte 5]. Fonte: autor, 2023.

A conclusão é de que, por conta da rotação da Terra, a estaca passou por 2 marés altas e por 2 marés baixas em cerca de 24 h (1 dia terrestre). O uso de vídeos e de *graphics interchange format* (GIF) é altamente incentivado nessas partes que enfatizam a mecânica dos astros.

Sabemos que a Lua se desloca em torno da Terra no mesmo sentido de rotação diária da Terra, arrastando consigo as deformações oceânicas. Então, o intervalo de tempo entre duas marés altas consecutivas, por exemplo, será maior do que 12 h; mais precisamente, 12 h 26 min (da Silveira, 2003). No entanto, dificilmente algum aluno do EM conseguirá relacionar o movimento da Lua ao arrasto das marés. É importante deixar claro também que esse resultado se restringe ao modelo da Terra coberta apenas por um oceano planetário liso e que não fornece atrito com os continentes. Basta dizer aos alunos que por conta da presença dos continentes, o modelo dinâmico das marés pode ocasionar que em algumas partes do globo não haja 4 marés no total por dia, podendo haver 3 marés ou às vezes até duas por dia.

Agora, apresentaremos que o Sol também contribui na formação de marés aqui na Terra, só que em menor intensidade que a Lua. Só que para isso, precisaremos reforçar que a causa das marés não se deve apenas à força gravitacional agindo sobre a Terra. Se assim o fosse, forçoso seria admitir que o Sol contribuiria de maneira muito mais intensa nas marés que a Lua. O que importa é a força gravitacional ser diferente (gradiente) em cada ponto da Terra (corpo extenso e flexível). A ideia agora, portanto, é

propor mais uma ferramenta aos alunos para que eles concluam que o Sol contribui na formação das marés, só que de maneira menos intensa que a Lua.

### C) Força gravitacional?

Para cumprir esse objetivo, pede-se aos alunos que calculem a força gravitacional que o Sol e a Lua exercem aqui na Terra, a partir da lei da gravitação universal e pesquisando os valores das massas desses astros, bem como suas distâncias relativas à Terra, e o valor da constante da gravitação universal, usando seus *smartphones*.

## C) Força gravitacional ?

**Ex:** Consulte os seguintes valores na internet usando seu *smartphone* para calcularmos e compararmos os valores das forças gravitacionais que o Sol exerce na Terra e que o Sol exerce na Lua.

$$M_{\text{Terra}} = ?$$

$$M_{\text{Lua}} = ?$$

$$M_{\text{Sol}} = ?$$

$$D_{\text{T,S}} = ?$$

$$D_{\text{T,L}} = ?$$

$$G = ?$$

$$F_{\text{S,T}} = ?$$

$$F_{\text{L,T}} = ?$$

*Agora, explicaremos que se a causa das marés fosse a força gravitacional em si, o Sol seria o maior contribuinte.*

**Figura 14.** Comparação entre os cálculos da força gravitacional solar e lunar sobre a Terra [parte 1]. Fonte: autor, 2023.

Por experiência, essa tarefa deverá ser bem conduzida pelo professor, pois os alunos tendem a se distrair usando os celulares. O resultado dessas contas deverá indicar que a força gravitacional que o Sol exerce sobre a Terra é quase 200 vezes maior que a força gravitacional que a Lua exerce sobre a Terra.

$$F_{S,T} = G \frac{M_S M_T}{D_{T,S}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,99 \cdot 10^{30} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{1,5 \cdot 10^{11} \cdot 1,5 \cdot 10^{11}} \cong 35,28 \cdot 10^{21} \text{ N}$$

$$F_{L,T} = G \frac{M_S M_T}{D_{T,L}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{7,36 \cdot 10^{22} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{3,85 \cdot 10^8 \cdot 3,85 \cdot 10^8} \cong 19,80 \cdot 10^{19} \text{ N}$$

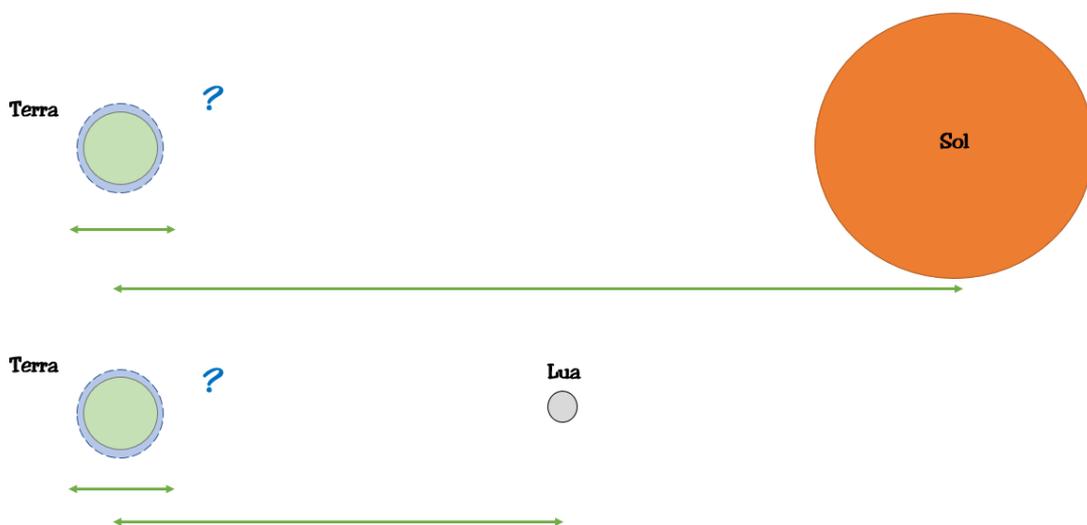
$$\frac{F_{S,T}}{F_{L,T}} = \frac{35,28 \cdot 10^{21}}{19,80 \cdot 10^{19}} \cong 170$$

**Se o Sol exerce uma força na Terra quase 200 vezes maior que a Lua faz na Terra, por que não é o Sol que contribui mais nas marés?**

**Figura 15.** Comparação entre os cálculos da força gravitacional solar e lunar sobre a Terra [parte 2]. Fonte: autor, 2023.

Mas ainda não provamos que de fato é a Lua que influencia mais que o Sol nas marés oceânicas. Para isso, apresenta-se, pela primeira vez, o sistema Terra-Lua-Sol a seguir:

**Ex:** Comparação entre as forças gravitacionais diferenciais entre Sol e Terra e Lua e Terra. Fora de escala



**Figura 15.** Comparação entre os gradientes gravitacionais solar e lunar sobre a Terra [parte 1]. Fonte: autor, 2023.

Deve-se comparar com os alunos as forças gravitacionais diferenciais entre o Sol e a Terra e entre a Lua e a Terra. Em outras palavras, é mais uma vez pedir para os alunos esboçarem em uma folha de papel, como ficaria a configuração do oceano planetário se apenas o Sol agisse e se apenas a Lua agisse nesse oceano. Aqui, três respostas costumam aparecer:

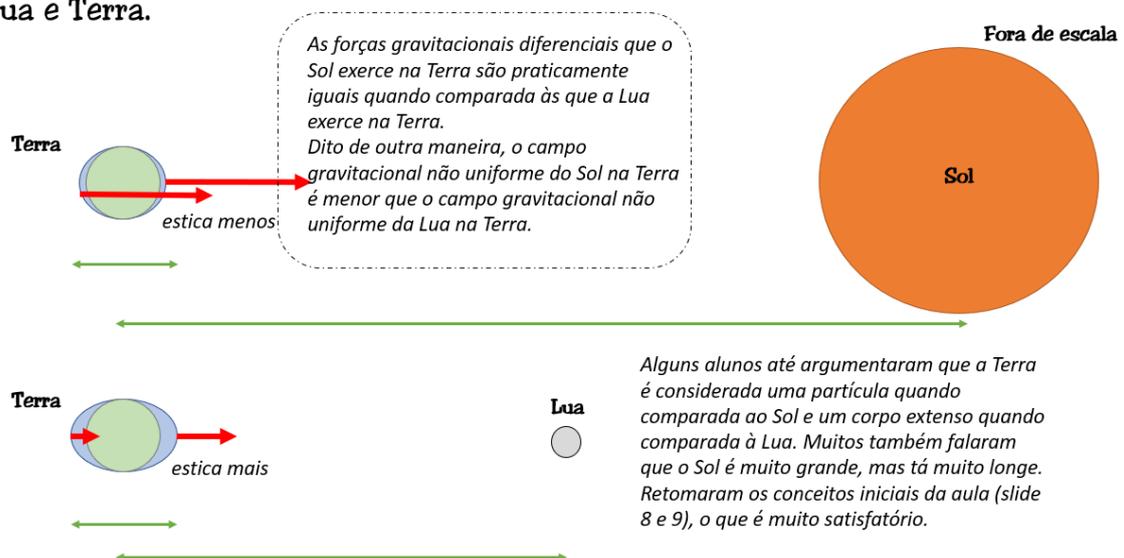
(i) alguns alunos ainda pensam que o Sol contribuirá muito mais que a Lua nas marés, por conta do seu tamanho, embora tenhamos feito os cálculos anteriores das forças gravitacionais solar e lunar sobre a Terra;

(ii) alguns alunos acham que o Sol nem chegará a influenciar nas marés, pois apesar de seu tamanho, ele está muito longe, fazendo com que sua influência seja nula; e

(iii) alguns alunos conseguem responder que a Lua contribuirá mais porque apesar de o Sol ser muito grande, ele está muito longe, adicionando em suas explicações que a Terra comparada ao Sol seria uma partícula (provocando marés “baixinhas” em sua linguagem) e que a Terra comparada à Lua seria um corpo extenso (formando as marés “normais” em sua linguagem).

É válido perceber que a terceira resposta (correta) revela uma associação com o exemplo da pessoa (partícula) e do “gigante” (corpo extenso) no exemplo inicial (Figura XX). Dessa forma, as forças gravitacionais diferenciais que o Sol exerce na Terra são praticamente iguais quando comparada às que a Lua exerce na Terra. Dito de outra maneira, o campo gravitacional não uniforme do Sol na Terra é menor que o campo gravitacional não uniforme da Lua na Terra.

**Ex.: Comparação entre as forças gravitacionais diferenciais entre Sol e Terra e Lua e Terra.**



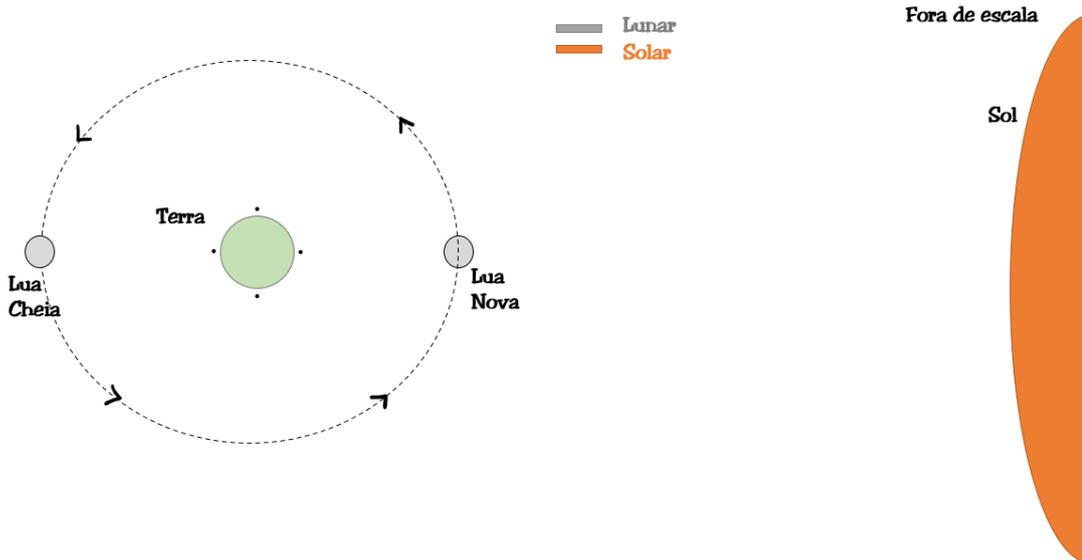
**Figura 16.** Comparação entre os gradientes gravitacionais solar e lunar sobre a Terra [parte 2]. Fonte: autor, 2023.

Portanto, fica comprovado que se as marés fossem causadas apenas pela força gravitacional, o Sol deveria ser o principal agente influenciador nas marés.

Falta agora apresentarmos esse mesmo sistema Terra-Lua-Sol de forma um pouco mais dinâmica, onde a Lua transladará em torno da Terra.

#### D) Composição das forças de maré solares e lunares

### D) Composição das forças de maré solares e lunares



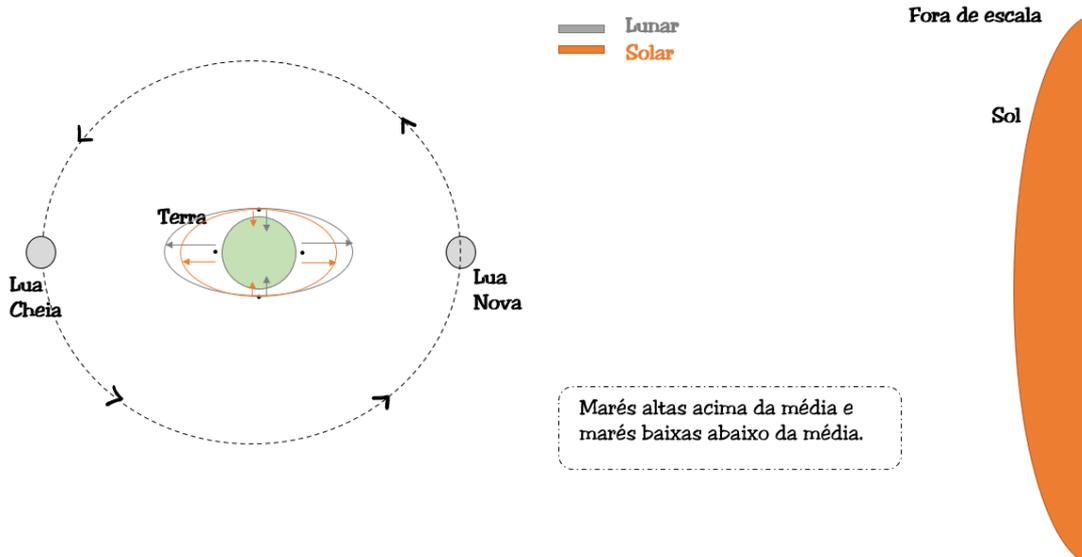
**Figura 17.** Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 1].

Fonte: autor, 2023.

A figura anterior ilustra um tipo de alinhamento específico entre Terra-Lua-Sol. Há alguns pontos na Terra e as fases lunares representadas são a Cheia e a Nova.

O professor pode pedir aos alunos que respondam como seria a configuração das marés devido a ação lunar (representada por cinza). Em seguida, a configuração das marés devido a ação solar (representada em alaranjado). Espera-se que a resposta padrão seja algo assim:

## D) Composição das forças de maré solares e lunares



**Figura 18.** Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 2].

Fonte: autor, 2023.

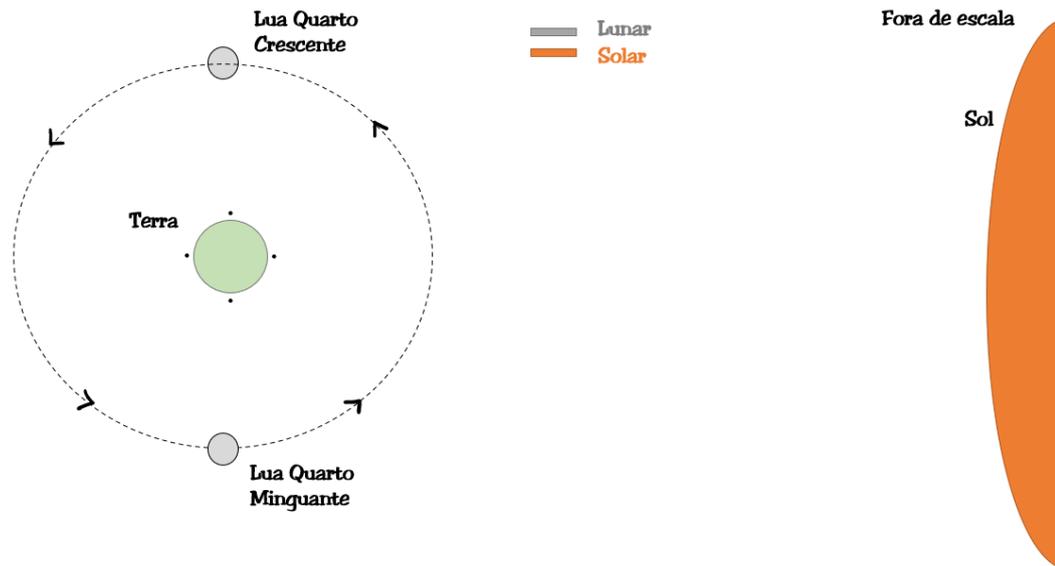
Os *slides* devem ser apresentados um por um, ou seja,

1. As setas cinzas para indicar que a Lua “estica” em alguns pontos e “espreme” em outros para retomar à linguagem fornecida no início da explicação da causa das marés (seção 2);
2. O elipsoide cinza para representar as protuberâncias de marés devido à Lua;
3. As setas alaranjadas para indicar que o Sol “estica” em alguns pontos e “espreme” em outros, mas com menor intensidade que a Lua; e
4. O elipsoide alaranjado para representar as protuberâncias de marés devido ao Sol.

Finaliza-se explicando que, nesse tipo de alinhamento chamado de sизígia, haverá a formação das marés altas mais altas e das marés baixas mais baixas, pois as forças de marés solares e lunares se somam. Por isso, essa configuração recebe o nome de marés de sизígia.

Em seguida, apresenta-se uma figura que fornece o outro tipo de alinhamento entre esses astros:

## D) Composição das forças de maré solares e lunares

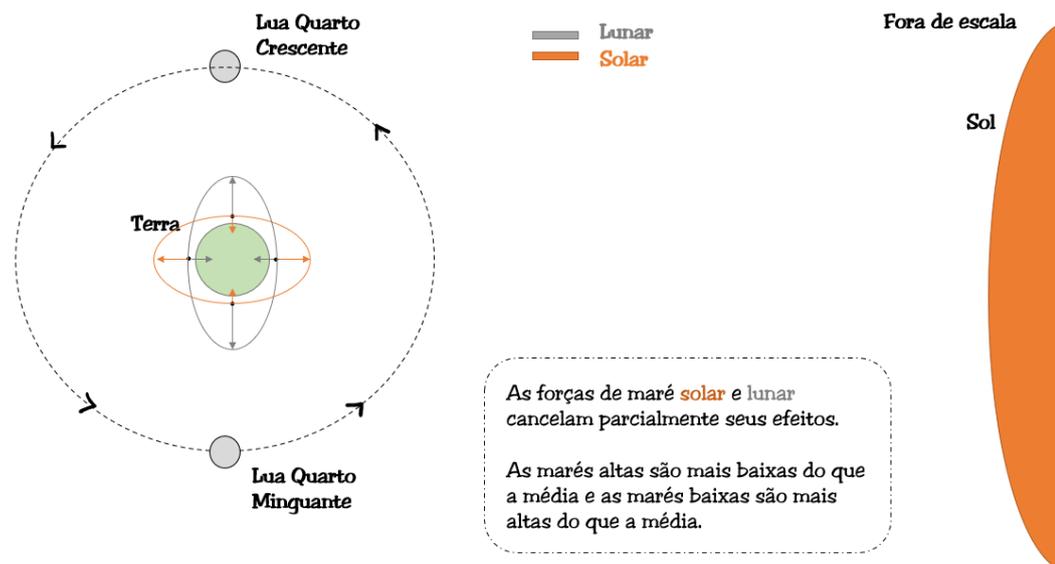


**Figura 19.** Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 3].

Fonte: autor, 2023.

Mais uma vez, o professor pode pedir aos alunos que respondam como seria a configuração das marés devido a ação lunar (representada por cinza). Em seguida, a configuração das marés devido a ação solar (representada em alaranjado). Espera-se que a resposta padrão seja algo assim:

## D) Composição das forças de maré solares e lunares



**Figura 20.** Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 4].

Fonte: autor, 2023.

Recomenda-se mais uma vez que os *slides* sejam apresentados um por um. Finaliza-se explicando que, nesse tipo de alinhamento chamado de quadratura, as marés altas serão mais baixas do que a média das marés altas e as marés baixas serão mais altas do que a média das marés baixas, pois as forças de marés solares e lunares se cancelam parcialmente.

Agora, é chegado o momento de apresentar tacitamente situações novas para os alunos para verificarmos se eles conseguiram adquirir os novos conhecimentos. Três perguntas são feitas para eles:

**1) É possível ocorrer maré em um lago?** (pergunta semelhante ao raciocínio da astróloga anônima).

**2) Até aqui vimos as marés oceânicas. No entanto, a Terra, em sua maior parte, é rocha fundida coberta por uma crosta fina, sólida e flexível. Será que existe marés *terrestres*?**

**3) Faz sentido a seguinte frase? “[...] terremotos e erupções vulcânicas têm probabilidade ligeiramente maior de ocorrência quando a Terra está experimentando as marés altas mais altas em sua crosta – ou seja, perto de uma lua cheia ou uma lua nova.”**

A primeira pergunta é relativamente simples e serve como indicativo de que o aluno compreende que um corpo de dimensões desprezíveis (partícula) não deverá ser deformado, pois a diferença de forças gravitacionais entre dois pontos dele será desprezível.

A segunda e terceira perguntas são uma extensão das análises feitas durante a aula com o objetivo de que os alunos reforcem o conceito de que a Terra é um sistema extenso e flexível, mesmo as partes sólidas, permitindo as marés terrestres. Duas vezes a cada dia, a superfície sólida da Terra é elevada e abaixada em até 25 cm (Hewitt, 2015, p.170). Esse ponto da aula é importante para que os alunos compreendam que as marés não se restringem às águas. Em outras palavras, as marés são um fenômeno puramente gravitacional. Em rigor, se tiver massa (sólida, líquida e gasosa) e campo gravitacional não uniforme, poderá haver marés. Aliás, não é incomum, muitos alunos perguntarem se há marés atmosféricas.

Caminhando para o final da aula, apresenta-se dois vídeos para a turma:

1. O primeiro vídeo é inspirado em Ferreira (Ferreira, 2016), onde se apresenta um trecho do filme *O Todo Poderoso* (2003), protagonizados por Jim Carrey e Jennifer

Aniston. Nessa cena, o protagonista de Jim Carrey, ganha poderes e consegue “puxar” a Lua para mais perto da Terra, conforme as imagens a seguir.



**Figura 21.** Cena do filme O Todo Poderoso, em que o personagem de Jim Carrey puxa a Lua para mais próxima da Terra. Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=GdrlHHupGEQ>. Acesso em 23/04/2023.

Mais à frente da cena, aparece a personagem de Jennifer Aniston assistindo a um noticiário em que o repórter diz ter acontecido uma catástrofe devido a uma atividade lunar incomum. Pergunta-se aos alunos se essa hipótese levantada faz sentido. O professor vai intermediando as respostas de forma que se chegue à conclusão de que sim, pois como a Lua se aproximou, as forças gravitacionais diferenciais aumentariam, induzindo marés mais intensas

2. O segundo vídeo é retirado do filme Interestelar (2014), protagonizado por Matthew McConaughey e Jessica Chastain. em que os protagonistas entram no planeta Miller, que orbita um buraco negro, Gargantua. Nessa cena, eles estão coletando alguns objetos quando se deparam com uma enorme onda se aproximando deles, conforme a seguinte figura:



**Figura 22.** Cena do filme Interestelar, em que aparecem ondas gigantes. Fonte: [https://www.youtube.com/watch?v=4Hf\\_XkgE1d0](https://www.youtube.com/watch?v=4Hf_XkgE1d0). Acesso em 23/04/2023.

É ocultado a informação dos alunos que há um buraco negro e a cena também não revela. Nesse sentido, pergunta-se aos alunos o que poderia estar provocando essa enorme onda? Muitos estudantes costumam responder que se trata de uma Lua gigante ou um Sol gigante. Há quem possa ter assistido ao filme e responder que tem um buraco negro (é importante que esse aluno não forneça *spoiler*). Essa última pergunta permite que a aula se encerre com um excelente engajamento dos alunos, pois se trata de um tema que muitos gostam de discutir. Buracos negros são corpos supermassivos e superdensos. Assim, sua força gravitacional diferencial no planeta Miller induz marés muito intensas.



**Figura 23.** Cena do filme Interestelar, em que aparece a nave perto do planeta fictício Miller que orbita o buraco-negro fictício Gargantua. Fonte: <https://www.showmetech.com.br/o-buraco-negro-que-interestelar-descobriu-e-nao-nos-mostrou/>. Acesso em 23/04/2023.

Aliás, se alguém se aproximasse de um buraco negro sem a devida velocidade de escape, seria “espaguetificado”.



**Figura 24.** Representação do fenômeno de “espaguetificação”. Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/Spaghettification.jpg>. Acesso em 23/04/2023.

Cabe aqui um comentário crucial sobre os efeitos de esmagamento e esticamento (ou espaguetificação) de corpos extensos submetidos a campos gravitacionais externos não uniformes. Como visto nos trabalhos de Machado, Tort e Zarro, 2020 - *Squashing and spaghettification in Newtonian gravitation* (2020) e *O princípio da equivalência: Uma introdução à relatividade geral* (2021), conclui-se que para um corpo extenso submetido a um campo gravitacional que tem uma variação linear com a distância radial, observamos o efeito de esmagamento. Enquanto para um corpo extenso submetido a um campo gravitacional que varia com a lei do inverso do quadrado, observamos o efeito de espaguetificação. O segundo exemplo é muito comum de se trabalhar no EM. Sendo assim, é importante deixar claro para os alunos essas condições do objeto que está “caindo” em direção ao buraco negro.

## Referências bibliográficas

- SILVEIRA, Fernando Lang da. Marés, fases principais da Lua e bebês. **Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 20, n. 1 (abr. 2003), p. 10-29**, 2003.
- HEWITT, Paul. **Física Conceitual-12**. Bookman Editora, 2015.
- FERREIRA, Jean Coelho et al. **Discutindo a Física das Marés como proposta para a crise de energia elétrica**. 2016. Tese de Doutorado.
- SHADYAC, Tom. O Todo Poderoso. Universal Pictures, 2003. Filme.
- NOLAN, Christopher. Interestelar. Paramount Pictures, 2014. Filme.
- MACHADO, R. R.; TORT, A. C.; ZARRO, C. A. D. Squashing and spaghettification in Newtonian gravitation. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. e20200278, 2020.
- MACHADO, R. R.; TORT, A. C.; ZARRO, C. A. D. O princípio da equivalência: uma introdução à relatividade geral. **A Física na Escola**, v. 19, n. 2, 2021.

## **Apêndice B**

### **Uma Aula sobre Forças de Marés para o Ensino Médio**

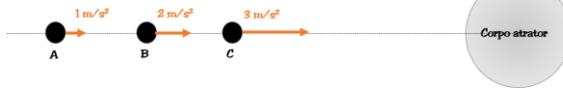
## ➔ Forças de marés

### 1) Introdução

*"Se a Lua influencia nos mares e oceanos por que não influenciaria nos fluidos corporais?"*

Astróloga anônima

**Ex.1:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Um corpo atrator à direita induz, nos corpos à direita, acelerações, as quais estão representadas na figura abaixo.



Calcule a intensidade das forças em cada corpo?

Resposta:  $F_R = ma$

$$F_A = 1 \times 1 = 1 \text{ N}$$

$$F_B = 1 \times 2 = 2 \text{ N}$$

$$F_C = 1 \times 3 = 3 \text{ N}$$

**Ex.2:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Agora há uma haste ideal que liga os corpos. As forças que o corpo atrator exerce em cada corpo está representada na figura abaixo.

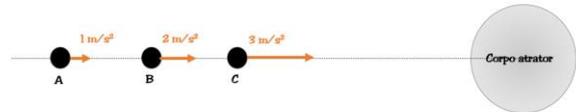


Calcule a aceleração de cada corpo?

Resposta:

$$F_R = m_{\text{total}}a \rightarrow (3 + 2 + 1) = 3a \rightarrow a = 2 \text{ m/s}^2$$

**Ex.1:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Suas acelerações estão representadas na figura abaixo.



Calcule a intensidade das forças em cada corpo?

**Ex.2:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Agora há uma haste ideal que liga os corpos. As forças que o corpo atrator exerce em cada corpo está representada na figura abaixo.



Calcule a aceleração de cada corpo?

**Ex.2:** Os corpos A, B e C possuem massas iguais a 1 kg. Agora há uma haste ideal que liga os corpos. As forças que o corpo atrator exerce em cada corpo está representada na figura abaixo.



Calcule a aceleração de cada corpo?

Resposta:

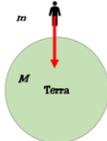
$$F_R = m_{\text{total}}a \rightarrow (3 + 2 + 1) = 3a \rightarrow a = 2 \text{ m/s}^2$$

Resposta: Qualquer sistema real (por exemplo, a Terra) **não é rígido** e, portanto, a ocorrência dessas forças internas, devidas à não uniformidade do campo gravitacional externo (por exemplo, devido ao Sol ou à Lua), dará origem a **deformações** do sistema (as **marés**).

## 2) As marés

i) Partícula

$$\vec{P} = \vec{F}_g = m\vec{g}$$

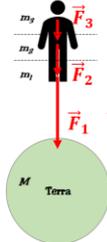


Fora de escala

ii) Corpo extenso

$$m_1 = m_2 = m_3 = m$$

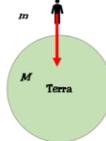
$$F_g = G \frac{Mm}{d^2}$$



## 2) As marés

i) Partícula

$$\vec{P} = \vec{F}_g = m\vec{g}$$

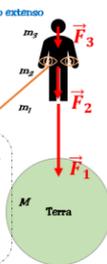


Fora de escala

ii) Corpo extenso

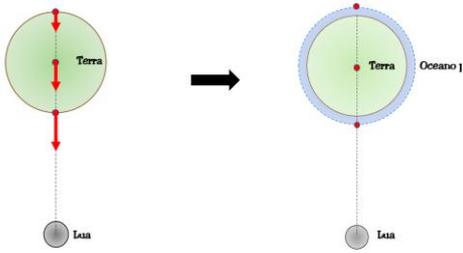
$$m_1 = m_2 = m_3 = m$$

$$F_g = G \frac{Mm}{d^2}$$

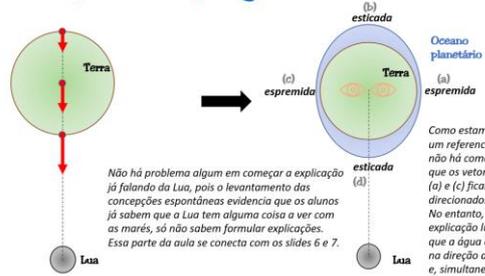


Situação lúdica e hipotética para entender a deformação: se o olho da pessoa fosse na barriga, ela observaria tanto o pé quando a cabeça se afastarem da barriga.

### A) Diferença das forças gravitacionais



### A) Diferença das forças gravitacionais

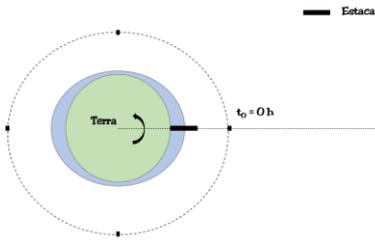


Fora de escala

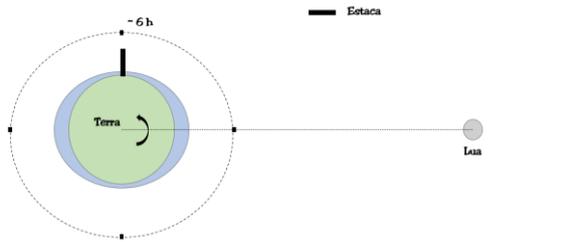
Não há problema algum em começar a explicação já falando da Lua, pois o levantamento das concepções espontâneas evidencia que os alunos já sabem que a Lua tem alguma coisa a ver com as marés, só não sabem formular explicações. Essa parte da aula se conecta com os slides 6 e 7.

Como estamos adotando um referencial inercial, não há como "provar" que os vetores nos pontos (a) e (c) ficam direcionados para a Terra. No entanto, adoto uma explicação lúdica dizendo que a água é "esticada" na direção da Lua (b) e (d) e, simultaneamente, "espremida" em (a) e (c).

### B) Periodicidade das marés

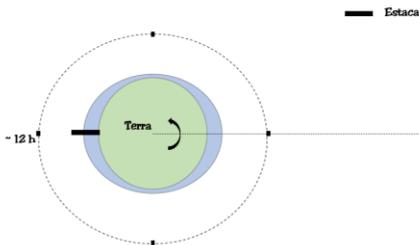


### B) Periodicidade das marés

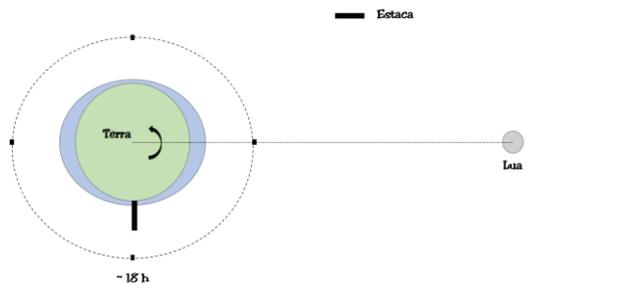


Fora de escala

### B) Periodicidade das marés

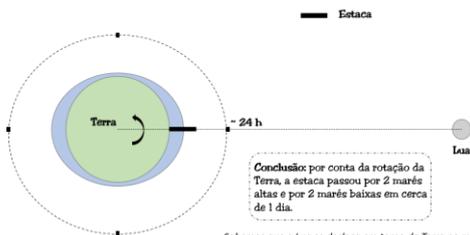


### B) Periodicidade das marés



Fora de escala

### B) Periodicidade das marés



Fora de escala

Conclusão: por conta da rotação da Terra, a estaca passou por 2 marés altas e por 2 marés baixas em cerca de 1 dia.

Sabemos que a Lua se desloca em torno da Terra no mesmo sentido de rotação diária da Terra, arrastando consigo as deformações oceânicas. Então, o intervalo de tempo entre duas marés altas consecutivas, por exemplo, será maior do que 12 h; mais precisamente, 12 h 26 min.

### C) Força gravitacional ?

Ex.: Consulte os seguintes valores na internet usando seu *smartphone* para calcularmos e compararmos os valores das forças gravitacionais que o Sol exerce na Terra e que o Sol exerce na Lua.

- $M_{Terra} = ?$
- $M_{Lua} = ?$
- $M_{Sol} = ?$
- $D_{TS} = ?$
- $D_{TL} = ?$
- $G = ?$
- $F_{ST} = ?$
- $F_{LT} = ?$

Agora, explicaremos que se a causa das marés fosse a força gravitacional em si, o Sol seria o maior contribuinte.

Ex.: Consulte os seguintes valores na internet usando seu *smartphone* para calcularmos e compararmos os valores das forças gravitacionais que o Sol exerce na Terra e que o Sol exerce na Lua.

Agora, explicaremos que se a causa das marés fosse a força gravitacional em si, o Sol seria o maior contribuinte.

- $M_{Terra} \cong 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
- $M_{Lua} \cong 7,36 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
- $M_{Sol} \cong 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- $D_{TS} \cong 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- $D_{TL} \cong 3,85 \cdot 10^8 \text{ m}$
- $G \cong 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$

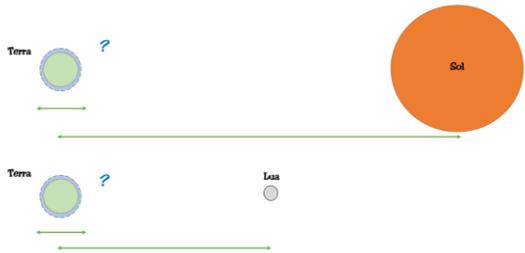
$$F_{ST} = G \frac{M_S M_T}{D_{TS}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,99 \cdot 10^{30} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{1,5 \cdot 10^{11} \cdot 1,5 \cdot 10^{11}} \cong 35,28 \cdot 10^{21} \text{ N}$$

$$F_{LT} = G \frac{M_S M_L}{D_{TL}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,99 \cdot 10^{30} \cdot 7,36 \cdot 10^{22}}{3,85 \cdot 10^8 \cdot 3,85 \cdot 10^8} \cong 19,80 \cdot 10^{19} \text{ N}$$

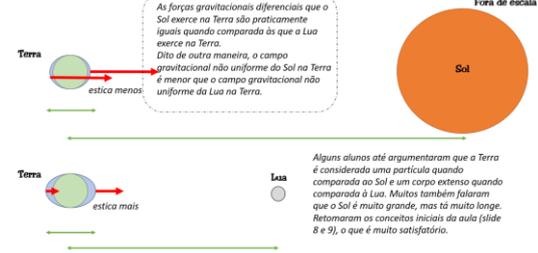
$$\frac{F_{ST}}{F_{LT}} = \frac{35,28 \cdot 10^{21}}{19,80 \cdot 10^{19}} \cong 170$$

Se o Sol exerce uma força na Terra quase 200 vezes maior que a Lua faz na Terra, por que não é o Sol que contribui mais nas marés?

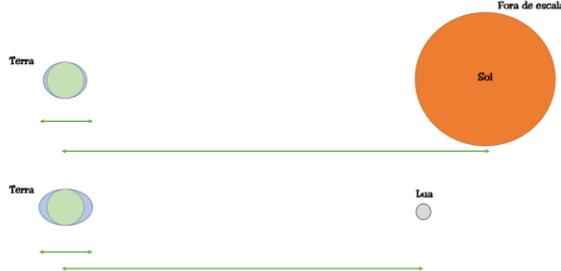
Ex.: Comparação entre as forças gravitacionais diferenciais entre Sol e Terra e Lua e Terra.



Ex.: Comparação entre as forças gravitacionais diferenciais entre Sol e Terra e Lua e Terra.

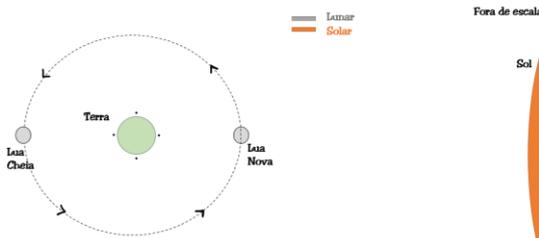


Ex.: Comparação entre as forças gravitacionais diferenciais entre Sol e Terra e Lua e Terra.

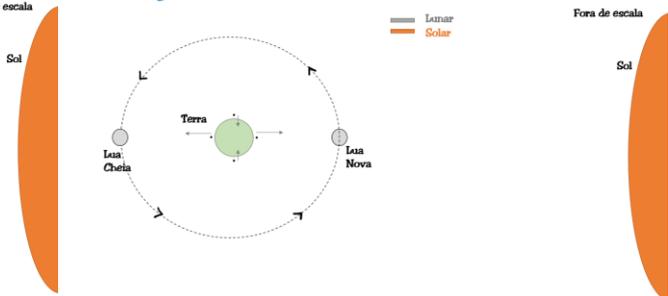


A atração do Sol é muito mais forte, mas as **diferenças** entre as atrações lunares são maiores do que as **diferenças** entre as correspondentes atrações solares. Assim, nossas marés se devem primariamente à Lua.

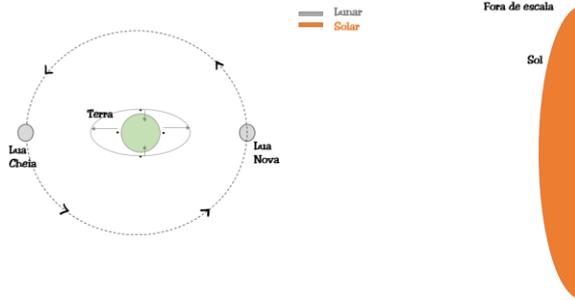
### D) Composição das forças de maré solares e lunares



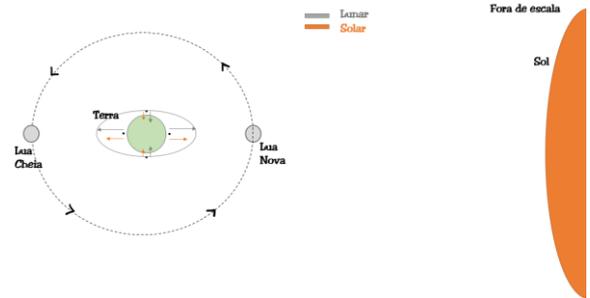
### D) Composição das forças de maré solares e lunares



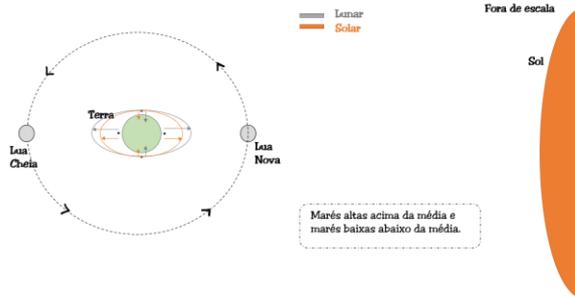
D) Composição das forças de maré solares e lunares



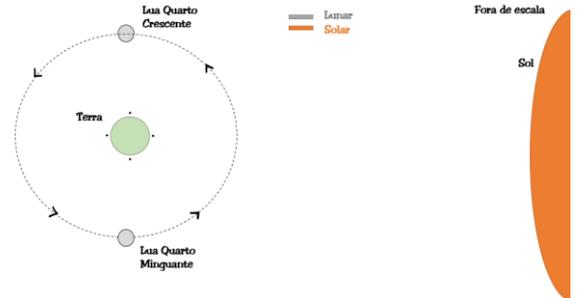
D) Composição das forças de maré solares e lunares



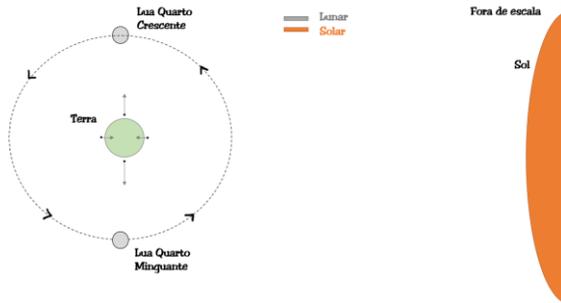
D) Composição das forças de maré solares e lunares



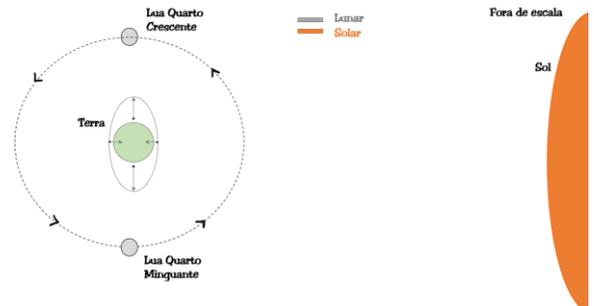
D) Composição das forças de maré solares e lunares



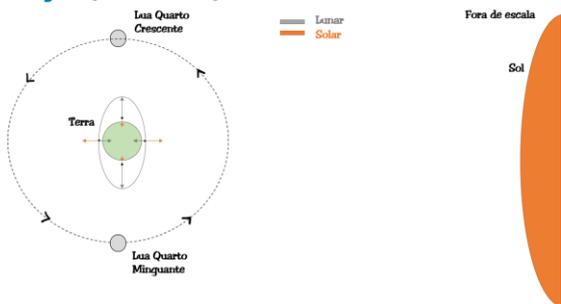
D) Composição das forças de maré solares e lunares



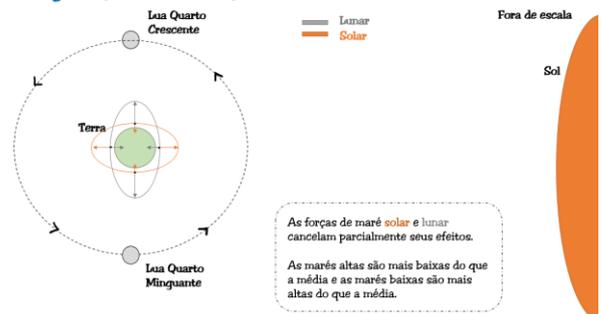
D) Composição das forças de maré solares e lunares



D) Composição das forças de maré solares e lunares



D) Composição das forças de maré solares e lunares



É possível ocorrer maré em um lago? (pergunta semelhante ao raciocínio da astróloga anônima).

*Resposta: Não, pois a força gravitacional diferencial no lago é desprezível.*

Até aqui vimos as marés oceânicas. No entanto, a Terra não é um sólido rígido; em sua maior parte, é rocha fundida coberta por uma crosta fina, sólida e flexível. Será que existe marés terrestres?

*Resposta: Sim, duas vezes a cada dia, a superfície sólida da Terra é elevada e abaixada ([...] em até 25 cm, de acordo com P. Hewitt)*

Faz sentido a seguinte frase?

*"terremotos e erupções vulcânicas têm probabilidade ligeiramente maior de ocorrência quando a Terra está experimentando as marés altas mais altas em sua crosta - ou seja, perto de uma lua cheia ou uma lua nova."*

*Resposta: Sim, tendo em vista as marés terrestres.*



<https://www.youtube.com/watch?v=GdrIHupGEQ>

Inspirado em: FERREIRA, Jean Coelho et al. Discutindo a Física das Marés como proposta para a crise de energia elétrica. 2016. Tese de Doutorado.

Após a cena do casal, há um jornal televisivo noticiando uma catástrofe provocada por uma atividade lunar incomum. Faz sentido essa hipótese levantada?

*Resposta: Sim, pois como a Lua se aproximou, as forças gravitacionais diferenciais aumentariam, induzindo marés mais intensas.*



A cena do filme Interestelar, mostra uma onda gigante. O que poderia estar provocando-a?

*Resposta: O filme mostra que perto do planeta de água, Miller, há um buraco negro, Gargantua.*



*Buracos negros são corpos supermassivos e superdensos. Assim, sua força gravitacional diferencial no planeta Miller induz marés muito intensas. Aliás, se alguém se aproximasse de um buraco negro sem a devida velocidade de escape, seria "espaquetificado".*

<b>Conteúdo da unidade de ensino</b>		
<b>Conteúdo</b>	<b>Atividades</b>	<b>Tempo (aproximado)</b>
Pré-teste	Estimular as concepções prévias dos estudantes.	15 min
Pergunta motivadora	Confrontar conhecimento popular com conhecimento científico.	5 min
Sistema de três corpos de mesma massa submetidos a um campo gravitacional não uniforme	Relembrar conceitos prévios (referencial, partícula x corpo extenso, leis de Newton, estados da matéria, etc.) Introduzir o conceito básico de deformação e campo gravitacional não uniforme.	5 min
A causa das marés	Aplicar novo conceito em uma situação lúdica e hipotética.	10 min
Diferença das forças gravitacionais	Aplicar novo conceito no sistema Terra-Lua.	15 min
Periodicidade das marés	Analisar a quantidade de marés por dia.	5 min
Força gravitacional?	Calcular a força gravitacional lunar e solar sobre a Terra.	15 min
Composição das forças de maré solares e lunares	Considerar a ação lunar e solar sobre as marés na Terra.	15 min
Marés terrestres e Buracos negros	Aplicar o conhecimento de forças de maré em novos contextos.	15 min

O pós-teste é aplicado em uma aula seguinte levando 15 min.

## **Apêndice C**

### **Teste Múltipla-Escolha de Forças de Marés para o Ensino Médio**

**1.** Em relação às áreas litorâneas, o fenômeno das marés oceânicas pode ser mais bem descrito como um movimento de

- (A) ressaca dos mares.
- (B) avanço e recuo do mar.
- (C) mudanças nas correntes marinhas.
- (D) rebentações intensas na beira das praias.

**2.** As fotos a seguir foram tiradas no mesmo local, praia do Forte, Cabo Frio, RJ, em diferentes horários, no mesmo dia. A figura da esquerda mostra a água cobrindo quase toda a faixa de areia, enquanto a figura da direita mostra a água mais recuada.



Qual é a causa principal para o fenômeno ilustrado?

- (A) Ventos fortes.
- (B) Atração gravitacional.
- (C) Mudanças climáticas.
- (D) Pequenos maremotos.

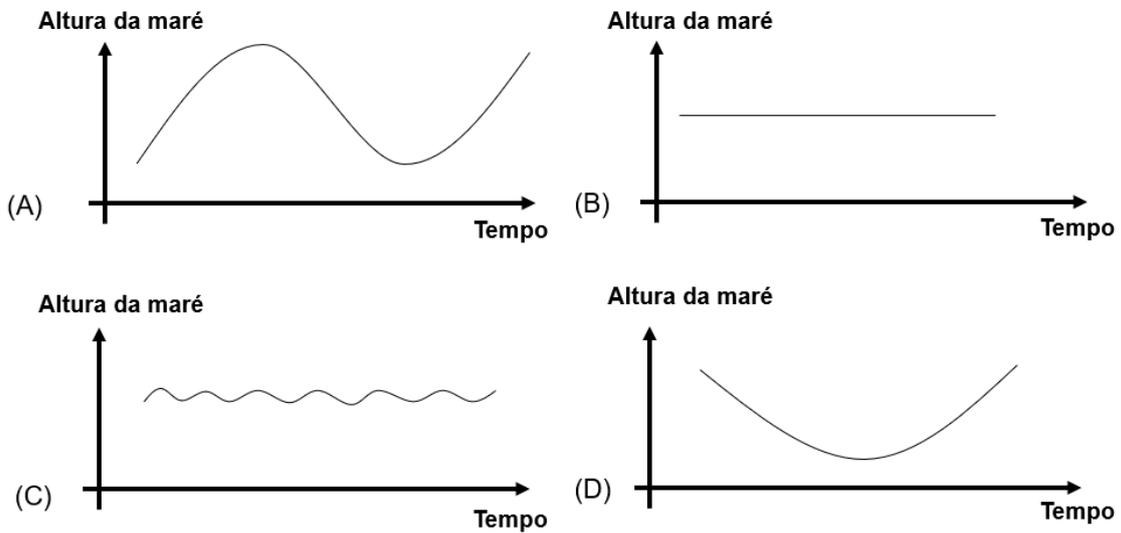
**3.** A principal força responsável pelas marés é a

- (A) de impacto entre as placas tectônicas.
- (B) das ondas se encontrando.
- (C) de gravidade.
- (D) dos ventos.

4. De maneira geral, quantas marés altas ocorrem por dia?

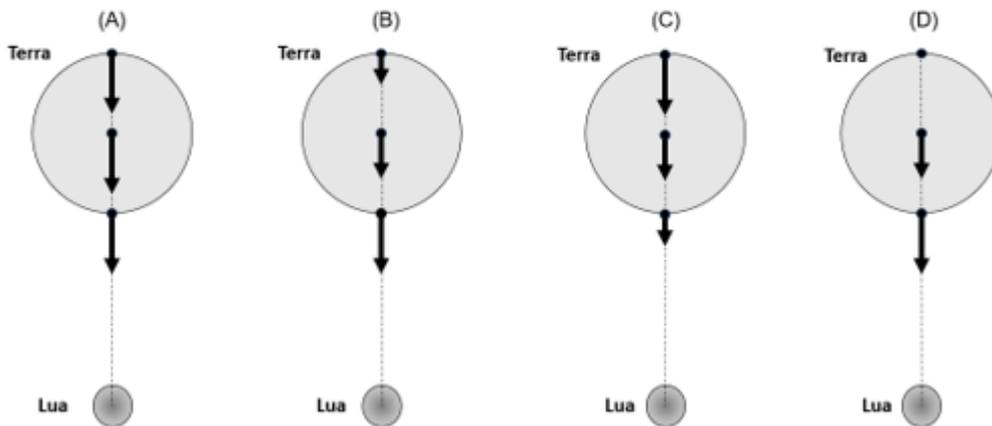
- (A) 1
- (B) 2
- (C) 3
- (D) 4

5. De maneira geral, qual gráfico que melhor representa a altura da maré ao longo de um dia?



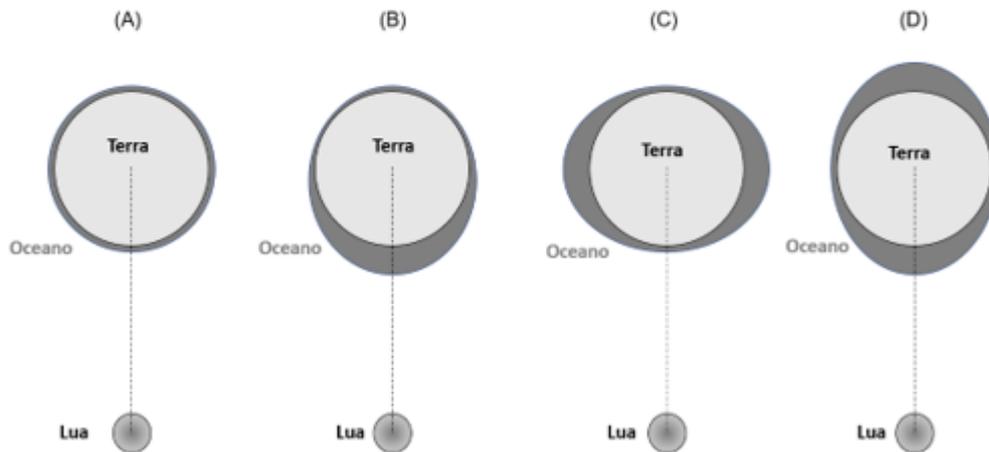
6. Qual das seguintes configurações Terra-Lua melhor corresponde à intensidade da força (representada pelas setas) que a Lua exerce em cada ponto representado na Terra?

**Dados:** as figuras estão fora de escala.



7. Qual das seguintes configurações Terra-Lua melhor corresponde ao perfil de marés oceânicas na Terra?

**Dados:** as figuras estão fora de escala.



8. De maneira geral, quando ocorrem as marés altas mais altas?

- (A) Durante as fases de Lua Nova e Cheia.
- (B) Durante as fases Quarto Crescente e Cheia.
- (C) Durante as fases Quarto Minguante e Lua Nova.
- (D) Durante as fases Quarto Crescente e Quarto Minguante.

9. De maneira geral, quando ocorrem as marés baixas mais baixas?

- (A) Durante as fases de Lua Nova e Cheia.
- (B) Durante as fases Quarto Crescente e Cheia.
- (C) Durante as fases Quarto Minguante e Lua Nova.
- (D) Durante as fases Quarto Crescente e Quarto Minguante.

10. Qual é a relação entre as forças de marés solares e lunares na Terra?

- (A) O Sol não exerce força de maré na Terra.
- (B) O Sol exerce uma força de maré maior que a Lua.
- (C) O Sol exerce uma força de maré menor que a Lua.
- (D) O Sol e a Lua exercem forças de maré iguais na Terra.

11. Se o Sol for levado em conta, qual será o novo perfil de marés dentre as opções apresentadas?

**Dados:**

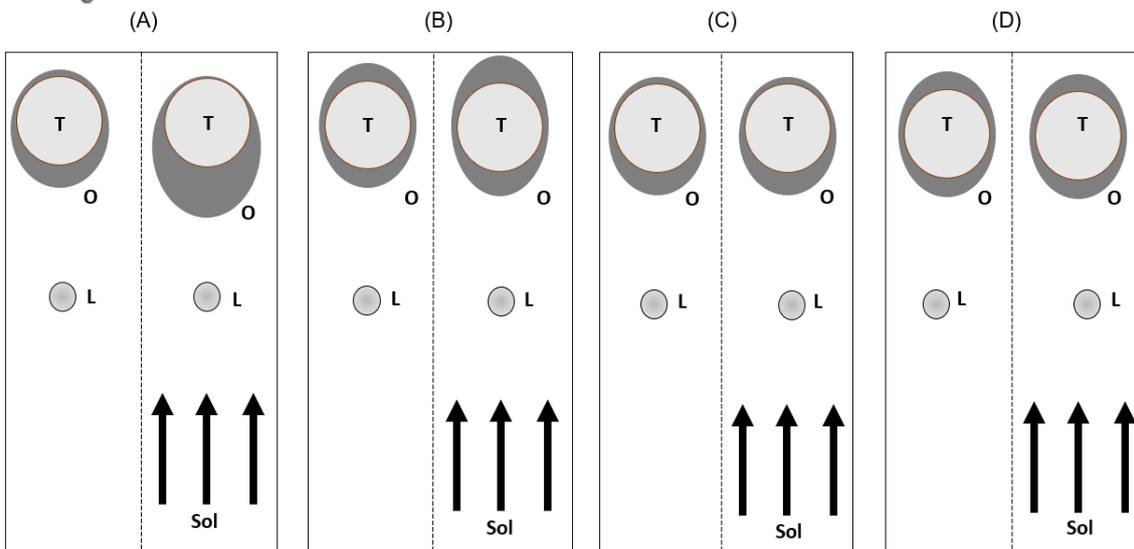
- T: Terra.

- O: oceano.

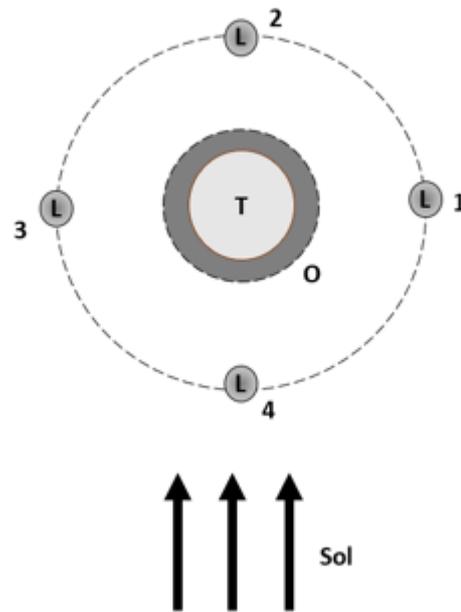
- L: Lua.

- **Setas:** raios solares.

- As figuras estão fora de escala.



12. Indique as posições em que a Lua se encontra durante as marés baixas mais baixas.



**Dados:**

- T: Terra.

- O: oceano.

- L: Lua.

- As figuras estão fora de escala.

- Os bojos de marés não foram representados para não influenciar na resposta.

(A) 1 e 2.

(B) 2 e 3.

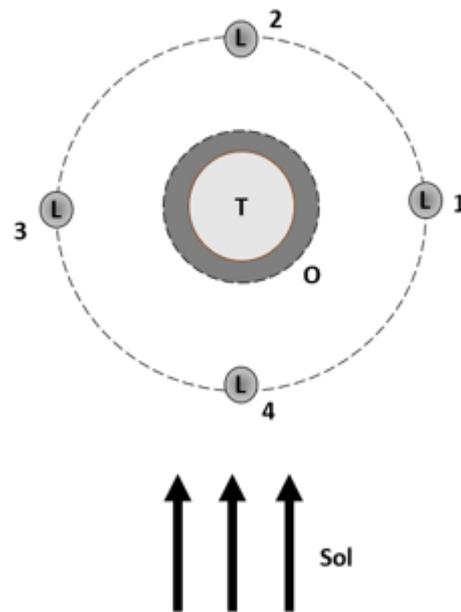
(C) 3 e 4.

(D) 4 e 1.

(E) 1 e 3.

(F) 2 e 4.

13. Indique as posições em que a Lua se encontra durante as marés altas mais altas.



**Dados:**

- T: Terra.

- O: oceano.

- L: Lua.

- As figuras estão fora de escala.

- Os bojos de marés não foram representados para não influenciar na resposta.

(A) 1 e 2.

(B) 2 e 3.

(C) 3 e 4.

(D) 4 e 1.

(E) 1 e 3.

(F) 2 e 4.

## **Apêndice D**

### **Livreto sobre a História das Principais Teorias das Marés**

Esse livreto não conterà apenas a explicação da teoria newtoniana das marés (teoria estática das marés, a qual serve de base para construir a proposta de aula e passível de ser lecionada ao público do EM), mas um resgate histórico sobre as diversas teorias sobre esse fenômeno ao longo dos anos, citando alguns dos principais cientistas que se preocuparam de alguma forma em apresentar explicações sobre esse fenômeno. Tentou-se ao máximo seguir a linha cronológica das ideias sobre as marés. A essa consideração, ainda aditamos que tal resgate estará seguramente respaldado em diversos artigos e livros (Ekman, 1993; Marmer, 1922; Aiton, 1954; Cartwright, 1999; Mariconda, 2011; Woodworth, 2023; Bonelli e Russo, 1996, dentre outros). Através de uma revisão bibliográfica, diversos artigos já existentes sobre esse tema foram reunidos para arrumar as informações em uma linha cronológica que faça sentido para o professor-leitor. A contribuição deste trabalho consiste em uma organização sistemática das teorias sobre as marés propostas ao longo da história, desde as explicações antigas até as modernas. Dessa forma, não tivemos a pretensão de fazer um trabalho historiográfico (ver a respeito Martins, 2001, p.37-40, *apud* Martins, 2005, p.306), sendo reservado esse tipo de trabalho árduo para futuras pesquisas. A ideia, essencialmente, é motivar os professores da Educação Básica a estudarem as referências aqui fornecidas, buscando contribuir mais nesse campo da História e Filosofia da Ciência. Ao final do livreto, o leitor terá um panorama das diversas abordagens teóricas desse fenômeno, permitindo sua melhor compreensão e fornecendo uma base para futuras investigações. Em suma, esse trabalho fornece uma visão geral das explicações das marés, organizando e sistematizando informações já existentes para uma melhor compreensão das teorias propostas ao longo do tempo. Ao longo de toda a descrição que será apresentada, perceber-se-á as descrições mecânicas, matemáticas, geométricas, quantitativas e qualitativas das marés. Por fim, uma última ressalva quanto ao termo “principais” no título desse livreto. Ao usar o termo "principal" para descrever várias teorias elaboradas em torno de um conceito, é importante ter cuidado para não desconsiderar ou minimizar a importância de outras abordagens. Cada teoria pode fornecer uma perspectiva única e valiosa sobre o assunto em questão e todas elas devem ser consideradas em conjunto para uma compreensão completa. Além disso, é importante reconhecer que as teorias evoluem ao longo do tempo e o que é considerado "principal" hoje pode ser substituído por novas ideias no futuro. Portanto, ao discutir teorias em torno de um conceito, é essencial manter uma mente aberta e ser cuidadoso ao usar termos que possam sugerir uma hierarquia de importância entre elas. Durante o

tempo dedicado ao programa, consegui reunir informações acessíveis sobre a história das marés. Por isso, ao usar o termo "principal", devo deixar claro que isso se refere apenas a essa perspectiva, sem desmerecer outros cientistas ou trabalhos que não foram encontrados e estudados por mim.

Antes de mais nada, é válido ressaltar que durante o quinto milênio antes da nossa era, o aparecimento da agricultura e da criação de gado permitem, no vale do Nilo e na Mesopotâmia, uma melhoria do nível de vida. A quantidade de víveres aumenta. Certos indivíduos podem então libertar todo o seu tempo da necessidade de procurar comida. Alguns fabricam instrumentos, armas; os ofícios especializam-se. Outros consagram-se a funções de direção e administração ou a funções religiosas. Uma parte da população, até então nômade, sedentariza-se. Aparecem cidades. As tribos, que anteriormente produziam quase inteiramente a totalidade da sua subsistência, trocam os produtos cultivados e fabricados. Mais tarde agrupam-se. A necessidade de grandes trabalhos, principalmente os de irrigação, está na base da constituição de grandes impérios, política e administrativamente muito centralizados. Foi assim na Suméria e no Egito, durante o quarto milênio, na China no terceiro e na Índia no segundo. Isso permite compreender que as técnicas de caça, pesca, recoleção, etc., permitem ao homem, em certas regiões, separar uma parte da alimentação, anteriormente consumida de forma integral pela tribo, para plantar, depois para criar animais domésticos (Rosmorduc, 1983). Em particular, a preocupação com o comportamento do mar e a necessidade de entendê-lo tem relação com a pré-história, e isso leva à conclusão de que a importância da compreensão das marés também é mais antiga do que os registros escritos podem nos confirmar (Soares, 2019).

Desde a antiguidade, o fenômeno das marés tem sido objeto de análise. Segundo Ekman (1993) e Marmer (1922), os registros históricos mais antigos remontam a cerca de 330 a.C. Adicionalmente, McCully (2006) e Mariconda (1999) relatam que Alexandre, o Grande (356-323 a.C.) e sua tropa foram surpreendidos por um rápido aumento do nível do mar em uma região próxima ao hoje chamado Rio Indu, no Paquistão. Alexandre, conhecido por suas habilidades estratégicas, não tinha conhecimento sobre o fenômeno das marés e nunca havia ouvido falar que o oceano poderia subir e descer duas vezes por dia. Seu tutor, Aristóteles, um dos mais sábios homens da época, aparentemente também não havia lhe ensinado sobre o assunto<sup>59</sup>.

---

<sup>59</sup> Apesar disso, conseguimos encontrar algumas informações de Aristóteles sobre as marés em um livro relativamente significativo no contexto da historiografia, como veremos a seguir.

Parece que a Antiguidade greco-latina não deu grande importância às marés. Não há estudos específicos sobre o fenômeno nas obras dos grandes filósofos da época, como Platão e Aristóteles. A razão para isso pode ser devido ao fato de que as navegações antigas estavam concentradas no mar Mediterrâneo, onde as marés são quase inexistentes. O mar Mediterrâneo é um local de extrema importância histórica, tendo sido o berço de diversas culturas da Antiguidade Clássica. Contudo, é notável que o movimento de maré neste mar é quase inexistente. Devido ao fato de ser um mar interno, com apenas uma pequena ligação com o Atlântico através do estreito de Gibraltar, a amplitude de maré é muito pequena. Isto pode ter sido uma das razões pelas quais o fenômeno das marés não tenha sido tão desafiador para essas culturas antigas. (Mariconda, 1999, 2004, 2005, 2007 e 2011). Por outro lado, a jornada para compreender as marés é longa e foi marcada por muitas descobertas e teorias. Desde os primórdios da história humana, o fenômeno das marés tem sido objeto de estudo e observação. Um exemplo do resultado dessa observação é o conhecimento muito detalhado da relação entre a Lua e marés obtido por vários povos marítimos, especialmente na periodicidade de longo prazo de acordo com as fases da Lua e estações do ano, que já tinha sido obtido, entre outros povos, pelas civilizações da antiga Índia, pelos fenícios e pelo povo da antiga Cária (Wolfschmidt, 2008).

O desenvolvimento do conceito de força na ciência grega é o título do capítulo 3 do livro *Conceitos de força*, de Max Jammer, onde podemos encontrar informações a respeito de Tales, Anaximandro, Anaxímenes, dentre outros, mas especialmente, **Aristóteles (385 – 323 a.C.)**, dando suas contribuições para conceituar o que é essa grandeza que hoje chamamos de força. No Livro VII da *Física*, Aristóteles resume suas leis da força. Jammer (2011) descreve que força, como ação à distância, não tinha lugar no esquema conceitual aristotélico, e, assim, a explicação do movimento dos planetas e dos astros nos céus só podia ser fornecida pela suposição de um agente externo, um Primeiro Motor, uma inteligência astral, ou pela atribuição de vida própria aos astros. Na *Metafísica*, Aristóteles refere-se à concepção de uma vida astral ativa de cada esfera planetária na tentativa de dar uma explicação à regularidade dos movimentos celestes, referindo-se ao Primeiro Motor. Com isso, Jammer (2011) afirma que nenhum outro desenvolvimento importante do conceito de força ocorreu durante a época dos primórdios do Liceu ou da Academia. Pappus, o maior matemático do século III, e Arquimedes, o fundador da estática, pouco contribuíram para o desenvolvimento do conceito de força. Somente com os estoicos a história do conceito de força mostrou uma

nova guinada. O problema que deu início a esse novo avanço foi a busca de uma explicação para a ligação entre as marés e o movimento do Sol e da Lua. Era um problema antigo. Aristóteles, Dicearco e Píteia haviam tentado resolvê-lo (Jammer, 2011, p.64).

Aristóteles, para quem a ideia de ação a distância era uma impossibilidade, desenvolvera seu esquema de forças tracionadoras e repulsivas para fornecer uma explicação: supusera que o Sol movia os ventos e estes, ao caírem sobre o oceano, empurravam as águas do mar. No *Timeu*, os grandes rios que fluem para o oceano são tidos como a causa das marés (Jammer, 2011, p.64).<sup>60</sup>

**Píteia de Massália (380 – 310 a.C.)**, mercador, geógrafo, astrônomo, explorador, autor dos registros mais antigos sobre marés de que se tem conhecimento, decidiu embarcar em uma jornada pelo Mar Mediterrâneo. Partindo de sua colônia grega no Ocidente, ele navegou até as Ilhas Britânicas e, ao observar as marés oceânicas, fez uma descoberta que mudaria a forma como se entendia o movimento das marés. Píteia descobriu que a Lua controlava as marés, uma ideia inovadora para a época (Cartwright, 1999). Essa descoberta foi registrada em seu livro *Περί του Ωκεανου* (Sobre o Oceano), que infelizmente se perdeu com o tempo, mas foi citado por outros escritores antigos<sup>61</sup>. Além de descobrir que havia duas marés altas por dia lunar, Píteia também identificou que a amplitude dessas marés variava conforme as fases da Lua (Ekman, 1993, p.585).

**Seleuco de Selêucia (190 - 150 a.C.)** foi um seguidor de Aristarco (310 a.C. – 230 a.C.), que como este, sustentava a mobilidade terrestre (Irby-Massie; Keyser, 2001). Aparentemente, a teoria das marés de Seleuco consistia basicamente em considerar que, devido à rotação da Terra, o ar é posto em movimento e perturba as águas com uma agitação à qual se associa, para a produção das marés, uma ação perturbadora sobre o ar e deste sobre a água causada pela Lua em seu movimento em torno da Terra. Em outras palavras, Seleuco explica as marés pelo movimento da Lua, que se movia em direção oposta à rotação terrestre e agia sobre o ar intermediário, o qual, por sua vez exercia

---

<sup>60</sup> Uma explicação semelhante é dada por **Crates de Mallos (séc. II d.C.)**, que deduziu as marés a partir de certas correntes de águas oceânicas. Por falta de tempo para pesquisar mais sobre esse personagem, deixamos essa nota como menção honrosa.

<sup>61</sup> Em um escrito intitulado *Περί του Ωκεανου* (Sobre o Oceano), Píteia narrou suas viagens, embora apenas trechos tenham sobrevivido e sido citados e parafraçados por autores posteriores. Alguns desses autores, incluindo Políbio e Straborn, questionaram a veracidade das jornadas documentadas por Píteia, alegando que elas poderiam ter sido fictícias e financeiramente inviáveis. Para mais, consultar: Straborn, *Geographika*, Livro I, 4.3 e Straborn, *Geographika*, Livro II, 4.2.

uma pressão sobre a água, provocando movimentos ondulatórios (Jammer, 2011, p. 64). Logo, infere-se que as duas fontes de perturbação - a translação da Lua e a rotação da Terra - atuavam juntas para criar as marés. Além do caráter mecânico da explicação, é notável nessa teoria o reconhecimento de um vínculo entre o fenômeno das marés e o movimento da Lua.<sup>62</sup>

**Posidônio (135 - 51 a.C.)**, filósofo grego, distinguiu os três períodos diário, mensal e anual das marés, atribuindo-lhe a influência dos astros e, particularmente, a Lua como causa. Um extenso e aprofundado trabalho de Posidônio, elaborado no século I a.C., entretanto perdido e apenas conhecido a partir de citações antigas, permite concluir que a obra já continha a teoria lunissolar para a explicação dos efeitos diários e mensais da maré devido à ação mútua dos três corpos celestes (Russo, 2005). O trabalho de Posidônio é citado pelo geógrafo grego Straborn (63 a.C. - 25 d.C.) em seu livro *Geographika* (Geografia). Este livro surgiu no ano 23 d.C. e aqui pode-se ler os seguintes trechos:

“When the moon rises above the horizon to the extent of a zodiacal sign [30°], the sea begins to swell, and perceptibly invades the land until the moon is in the meridian; but when the heavenly body has begun to decline, the sea retreats again, little by little; then invades the land again until the moon reaches the meridian below the earth; then retreats until the moon, moving round towards her risings, is a sign distant from the horizon .... The flux and reflux become greatest about the time of the conjunction [new moon], and then diminish until the half-moon; and, again, they increase until the full moon and diminish again until the waning half-moon.

If the moon is in the equinoctial signs [zero declination], the behaviour of the tides is regular, but, in the solstitial signs [maximum declination], irregular, in respect both to amount and to speed, while, in each of the other signs, the relation is in proportion to the nearness of the moon's approach.” (Straborn, *apud* Ekman, 1993, p.586).

Straborn escreve ainda:

“There is a spring at the [temple of] Heracleium at Gades [Cadiz], with a descent of only a few steps to the water (which is good to drink), and the

---

<sup>62</sup> Todas as teorias antigas, de que temos notícia, reconhecem e popularizam uma conexão de algum tipo entre as marés e a Lua, embora se afastem da explicação mecânica de Seleuco, para adotar explicações de tipo qualitativista (Mariconda, 2011).

spring behaves inversely to the flux and reflux of the sea, since it fails at the time of the flood-tides and fills up at the time of the ebb-tides.” (Ibid., p.586).

Jammer (2011) afirma que Posidônio propôs uma abordagem completamente diferentes de Seleuco e Aristóteles. Ainda descreve que Posidônio viajou para Gades e ali passou 30 dias estudando o fenômeno das marés. Colheu todos os fatos e dados pertinentes. Não teve dúvida quanto à relação de periodicidades entre as marés e os corpos celestes. A população vizinha lhe informou que a altura do fluxo era maior durante o solstício de verão. Posidônio interpretou dinamicamente a doutrina de uma tensão universal, ou tonos, formulada por seu predecessor, Crísipo. A teoria crisipiana das ligações e tensões mútuas baseara-se, originalmente, numa suposta materialização dos conceitos e formas aristotélicos. Para Posidônio, o fenômeno das marés era uma manifestação de forças que permeavam todo o espaço, porém forças completamente diferentes da concepção aristotélica. Em Aristóteles, a força, apesar de ser uma emanção da substância, estava localizada no sujeito, no portador dela, e era independente, a princípio, do objeto no qual era exercida por contato. Posidônio, por outro lado, postulando a força como a ideia primária e mais fundamental de sua filosofia natural, concebeu-a como uma expressão que ligava os dois objetos que ela relacionava e era simultânea a eles. A força tornou-se uma correspondência recíproca da ação, uma “simpatia” na acepção original da palavra. O Universo tornou-se um todo único, pela interação de um sistema de forças (Jammer, 2011, p.64-65).<sup>63</sup>

**Quintus Curcius**, senador e historiador romano do **século I**, em *De rebus gestis Alexandri Magni* (Dos feitos guerreiros de Alexandre Magno), descreve o primeiro registro de um contato significativo com as marés, sendo fora do ambiente mediterrâneo. Ele relata as dificuldades enfrentadas pela armada de Alexandre, que foi surpreendida pelo movimento de maré de grande amplitude na foz do rio Indo

---

<sup>63</sup> Em Aristóteles, a continuidade era uma propriedade puramente geométrica da matéria; com os estoicos, ela se tornou um princípio físico, um agente responsável pela propagação de processos físicos no espaço. Por causa dessa ligação interna, manifesta como uma tensão [*tonos*] em seu estado ativo, as partes distantes do Universo seriam capazes de influir umas nas outras, transformando o cosmo em um único campo de ação. O vácuo – sendo incorpóreo e, portanto, desprovido de continuidade – impediria qualquer percepção sensorial; por isso não podia existir dentro do mundo (Cleomedes, "De motu circulari corporum caelestium libri duo", in J. A. B. Arnim (org.), *Stoicorum veterum fragmenta*, II, 546 (Leipzig, 1905), p.172 *apud* Jammer, 2009, p.47). Essa elaboração da ideia aristotélica – de tendências que permeiam o *plenum* contínuo – é uma generalização importante em dois aspectos: na variedade dos fenômenos contemplados e em sua extensão para além do mundo sublunar (como exemplo, a descoberta de Posidônio sobre a influência da Lua nas marés, que foi vista como uma prova da realidade desse agente transmissor que ligaria os fenômenos celestiais aos terrestres [Crísipo]). O alcance dessas tensões propagadoras se estende a todo o universo material [*holon*], o qual deve ser distinguido da “totalidade” [*pan*]. (Jammer, 2009, p.47 – **grifo nosso**).

(Mariconda, 2011). Na obra *De la vida y acciones de Alexandre el grande* (Da vida e ações de Alexandre, o Grande), traduzida para o espanhol, destaca-se um relato de Curcius, no que segue:

“[...] eles reconheceram no terceiro dia que a água do mar começou a se misturar com a do rio, e que a maré subiu novamente, o que os fez descer com maior dificuldade. (...) Ignorando os soldados, que este era o fluxo e refluxo do oceano, eles acreditavam, vendo-o de repente crescer e inundando os campos, o que era um sinal da indignação dos deuses, e da punição, que eles queriam dar a sua temeridade”. (*De la vida y acciones de Alexandre el grande*, tradução para o espanhol de Don Mateo Ibanez de Segovia, 1794, Madrid, Livro 9, p.435).

**Straborn (63 a.C. - 25 d.C.)**, geógrafo grego, escreveu o *Geographika* (Geografia) em 23 d.C., que apresentou uma síntese das observações das marés feitas até então. Segundo essa síntese, a posição da Lua no céu governa as marés aqui na Terra, e nas fases de Lua nova e Lua cheia, as marés são mais intensas. A variação da declinação da Lua no céu em relação à linha do Equador pode gerar marés regulares, quando ocorrem amplitudes iguais de maré num dia, ou irregulares, quando há desigualdades diurnas e marés altas de intensidades diferentes ocorrendo no mesmo dia. Além disso, há diferenças nas velocidades de aumento e de diminuição do nível de água, o que significa que o tempo para a maré subir difere do tempo para a maré descer. Portanto, as observações das marés feitas pelos gregos naquele momento sugeriam que as marés estavam diretamente relacionadas com a Lua e, de certa forma, com o Sol, se pensarmos na relação deste com as fases da Lua (Dantas, 2020).

**Plínio, O Velho (23 - 79 d.C.)**, contemporâneo de Curcius, em sua *História Natural*, desenvolve uma teoria na qual a causa das marés consiste em uma certa simpatia entre o elemento da água e a Lua (cf. Plínio, 1829). No segundo volume de sua obra citada, ele escreve:

“[...] muito já foi dito sobre a natureza das águas; mas a circunstância mais maravilhosa é o fluxo e refluxo alternativo das marés, que existe, de fato, sob várias formas, mas é causado pelo sol e pela lua. A maré flui duas vezes e sobe duas vezes entre cada dois nascimentos da lua, sempre no espaço de vinte e quatro horas”. (Plínio, *apud* Marmer, 1922, p.210).

Plínio era um conhecedor da importância da Lua na formação das marés. Ele tinha compreensão de que a Lua e o Sol atuavam juntos na produção deste fenômeno (Bonelli e Russo, 1996). Além disso, o autor destacou as variações nas amplitudes das marés ao longo dos dias, fruto das fases da Lua, e a cada três meses, consequência dos solstícios e equinócios consecutivos. Plínio também enfatizou a regularidade das marés, afirmando que após oito anos, ou cem revoluções da Lua, os períodos e alturas das marés retornam à mesma ordem inicial. Porém, ele destacou que as marés altas e baixas não ocorrem no mesmo horário dia após dia, ao longo de um mês, e que mesmo quando voltam a repetir o horário, as amplitudes não são as mesmas. Apenas após oito anos é que as marés retornam às mesmas condições iniciais (Soares, 2019).

**Cláudio Ptolomeu (90 - 168 d.C.)**, no *Tetrabiblos*, ofereceu uma visão astrológica sobre a relação entre o movimento da Lua e as marés. Ele acreditava que a influência celestial dos corpos celestes, incluindo a Lua, era o fator determinante das marés, e que essa relação era claramente visível através da observação e da experiência. Ptolomeu aplicou sua compreensão astrológica para explicar a conexão entre o movimento da Lua e o fenômeno das marés, oferecendo uma visão única e notável sobre esse tema.

“A Lua, por ser o astro mais próximo, distribui sobre a Terra o máximo de seu refluxo, pois a maioria das coisas animadas e inanimadas está em sintonia com a Lua e se modifica de acordo com ela. Os rios aumentam e reduzem seus fluxos devido à sua luminosidade; as marés são modificadas conforme seus nascimentos e ocultos; as plantas e os animais tornam-se maiores ou menores, totalmente ou em parte, em consonância com ela”. (Tradução comentada dos três primeiros capítulos do *Tetrabiblos* de Ptolomeu, Pinheiro; Machado. Cad. Hist. Fil. Ci., Campinas, Série 4, v. 1, n. 2, p. 301-332, jul.-dez. 2015. p.312).

Na Antiguidade, já havia uma compreensão básica dos fenômenos relacionados às marés e sua relação com a Lua. Primeiramente, as observações estabeleceram uma correlação entre as marés e o movimento da Lua. Em seguida, surgiram duas teorias explicativas que tentavam compreender o porquê da ocorrência das marés. Por um lado, temos a teoria "mecânica" de Seleuco, que sugere que a causa das marés é resultado da combinação dos movimentos da Terra e da Lua. Por outro lado, há as teorias "qualitativas", que atribuem o fluxo e refluxo do mar a algum tipo de atração ou

afinidade entre as águas e a Lua. Em conclusão, a Antiguidade é responsável pelo estabelecimento da relação entre as marés e a Lua e pela presença de duas teorias explicativas distintas que buscavam compreender esse fenômeno (Mariconda, 2011). Ao final desse resgate histórico será apresentada uma tabela para ilustrar a presença dessas teorias e seus principais defensores.

O conceito de “simpatia” também foi usado para dar respaldo lógico à astrologia. Por meio da “simpatia”, **Sexto Empírico (160 - 210)** explicou a influência da Lua nas marés, como fizera **Plotino (205 – 270)**, e sua influência nos seres vivos. Em oposição aos fiéis aristotélicos, que, como Ptolomeu, em seu *Tetrabiblos*, rejeitavam qualquer ação da distância e tentavam explicar as marés pelas forças de contato (correntes atmosféricas, calor e luz), Plotino reduziu as influências cósmicas e astrológicas à relação de “simpatia” que, a seu ver, existia entre todas as partes do Universo (Jammer, 2011, p.68).

**Beda, O Venerável (673 – 735)**, é um nome consagrado na história da Inglaterra. Conhecido como o pai da história inglesa, ele deixou sua marca na literatura com sua obra *Historia ecclesiastica gentis Anglorum* (A História Eclesiástica do Povo Inglês). Além disso, em seu livro *De Temporum Ratione* (Sobre a Contagem do Tempo), Beda abordou temas diversos, incluindo a influência do movimento da Lua nas marés. Explicou que o vento poderia adiantar ou atrasar a maré, e foi o primeiro a se referir ao estabelecimento de um porto, ou seja, o atraso na ocorrência da maré pode ser diferente em portos da mesma costa, pelo que seria conveniente que fosse tabulada, em separado, por porto - a região das cidades de Jarrow e Wearmouth, onde se situava o mosteiro em que vivia o bispo, a amplitude das marés eram acontecimento notável (Rosa, 2012, p.323; Wallis, 2004, p.82-85, 307-312). As anotações de Beda criaram técnicas de observação de amplitude das marés, que mesclavam leis gerais com particularidades locais, e que mais tarde foram adotadas como referência básica para a determinação do estabelecimento de um porto marítimo em todo o mundo. Beda, em seu Capítulo 29, abordou a operação das marés, revisando suas fontes clássicas e computacionais com cuidado e adicionando suas próprias observações e cálculos. A compreensão das marés na época era limitada pelo fato de que as variações nas marés no Mediterrâneo oriental eram muito pequenas. Embora a ligação entre a Lua e as marés fosse conhecida há muito tempo, muitas fontes de Beda, como Philippus Presbyter e as fontes irlandesas Pseudo-Agostinho e Pseudo-Isidoro, apresentavam a ideia de que as marés eram causadas por uma variação no volume de água nos oceanos, ocorrendo ao

mesmo tempo em todo o mundo. Por exemplo, Philippus Presbyter escreveu sobre um gêiser no mar causando as marés (Wallis, 1999, p.307-312; Benison, 2000). No entanto, Beda mostrou sua habilidade de questionar e corrigir suas fontes. Em sua passagem, ele argumenta contra a afirmação de Philippus sobre o ocorrer de uma enorme enxurrada do oceano em todas as regiões e terras ao mesmo tempo. Beda, com base em suas observações ao longo da costa do Mar Britânico, afirmou que onde a maré subia em um lugar, ela baixava em outro ao mesmo tempo. Portanto, ele concluiu que a onda viajava de um lugar para outro, e não havia uma variação geral do volume de água nos oceanos. (Benison, 2000). Beda mostra sua prontidão para questionar e corrigir suas fontes na seguinte passagem:

“So let him who is capable, see if what Philip says is true or no: There are those who claim and affirm that an enormous outpouring of the ocean takes place in all the streams of every region and land at one and the same time. But we who live at various places along the coastline of the British Sea know that where the tide begins to run in one place, it will start to ebb at another at the same time. Hence it appears to some that the wave, while retreating from one place, is coming back somewhere else; then leaving behind the territory where it was, it swiftly seeks again the region where it first began. Therefore at a given time a greater malina deserts these shores in order to be able all the more to flood other [shores] when it arrives there.” (Wallis, 1999, p.85).

Na Europa medieval, o entendimento do fenômeno das marés foi essencialmente baseado na astronomia islâmica, sendo a visão europeia profundamente influenciada pelos trabalhos dos astrônomos islâmicos, que a partir do século XII foram sendo disponibilizados através de traduções para latim (Tolmacheva, 2004; Glick, 2005). **Abu Ma'shar (787 - 886)**, na sua obra *Introductorium in astronomiam* (Introdução à astronomia), ensinava que a subida e descida da maré eram fenômenos causados pela Lua (confirmando Beda (f. 736) que na Europa também tinha deduzido que a Lua estaria envolvida no ciclo da maré). Abu Ma'shar discutiu na sua obra os efeitos do vento e das fases da Lua em relação ao Sol sobre as marés. Jammer (2011) relata que Abu Ma'shar procurou mostrar que as marés eram causadas por influências astrológicas, mas sem especificar o tipo e o caráter das influências que tinha em mente. Embora soubesse, por exemplo, que a luz da Lua era irrelevante para explicar as marés, que se produziam tanto na Lua Cheia quanto na Lua Nova, ele não fez nenhuma afirmação

positiva sobre a natureza física das influências ou forças envolvidas (Jammer, 2011, p.84). No século XII, o filósofo andaluzino **Alpetrágio (f. c. 1204)** contribuiu com a noção das marés serem causadas pela circulação geral dos astros (Tolmacheva, 2004; Glick, 2005).

Até aqui, percebe-se que os diversos estudiosos mencionados anteriormente, acreditavam que a Lua e o Sol influenciavam as marés. Contudo, o mecanismo exato pelo qual esses corpos celestes causavam esse fenômeno ainda não era totalmente compreendido. **Zakariya al Qazwini (1203 - 1283)**, poeta, cosmógrafo e geógrafo persa, de ascendência árabe, em sua obra *'Aja'ib al-Makhlūqat wa Ghara'ib al-Mawjudat* (As Maravilhas das Criaturas e as Maravilhas da Criação), em 1235, afirma que o fluxo da maré é causado pelo Sol e pela Lua que aquecem as águas, fazendo com que elas se expandam. Ele descreve isso da seguinte maneira no caso do Sol:

“As to the rising of the waters, it is supposed that when the Sun acts on them it rarefies them, and they expand and seek a space ampler than that wherein they were before, and the one part repels the other in the five directions eastwards, westwards, southwards, northwards and upwards.” (Ekman, 1993, p.586).

Apesar das observações relacionadas ao movimento da Lua no céu e ao fato de suas fases estarem em consonância, de alguma forma, com as marés na Terra, algumas teorias dispensavam a presença da Lua para haver marés. Ao norte da Europa, mais precisamente na costa norte de onde hoje chamamos de Noruega, há relatos da presença de um grande turbilhão de águas em forma de vórtices (redemoinhos). A tal fenômeno, chamado pelos nativos como Maelstrom, palavra de origem nórdica, atribuíam-se a causa das marés. Quando a maré estava baixa, isso significaria que parte da água do mar teria entrado neste redemoinho, e quando a maré estava alta, a água teria saído do vórtice. Hoje, sabemos que as formações desses vórtices acontecem devido à conjunção de fortes correntezas que atravessam os limites do continente, em estreitos (canais marítimos que separam duas massas de terra), e à grande diferença de alturas das marés no local. Isto é, esses vórtices são, na verdade, influenciados pelas marés, e não a causa delas (Dantas, 2020).

No século XIV, **Jacopo Dondi dell’Orologio (1290 - 1359)**, pai de Giovanni de Dondi dell’Orologio, publicou a obra *De fluxu et refluxu maris* (Sobre o fluxo e refluxo

dos mares), provavelmente inspirado por fontes greco-bizantinas (Dondi *apud* Revelli, 1912). Nesta obra explica-se a existência de duas marés diárias com base na atração da Lua.

**Federico Chrisogono (1472 - 1538)**, um membro da nobreza de Zara, estava preocupado principalmente com a medicina e a astrologia, ensinando essas disciplinas em Pádua de 1495 a 1498. Seu livreto sobre as marés, *Tractatus de occulta causa fluxus et refluxus marts* (Tratado sobre a causa oculta do fluxo e refluxo das marés), foi impresso, juntamente com outras obras suas, em Veneza em 1528. O livreto é muito curto, tendo apenas oito páginas. A obra, embora prolixa e repetitiva, apesar de sua brevidade, é de grande interesse porque contém, pela primeira vez, uma explicação efetiva dos principais ciclos das marés baseada exclusivamente nas posições da Lua e do Sol (Bonelli e Russo, 1996).

Chrisogono observou que o Sol e a Lua fazem com que o mar atinja seu nível mais alto onde estão no zênite ou no nadir<sup>64</sup> e afundem até seu nível mais baixo onde estão no horizonte, produzindo quatro protuberâncias pontiagudas na água. A partir dessas premissas, Chrisogono deduziu que as marés são influenciadas pelos efeitos combinados do Sol e da Lua, sendo somados durante a Lua Cheia e a Lua Nova e sendo subtraídos um do outro durante a quadratura (Bonelli e Russo, 1996). No entanto, sua teoria difere da teoria moderna das marés em um aspecto: ele considerou que durante a quadratura, a influência das marés é cancelada, o que não é observável na realidade. Chrisogono também deduziu o ciclo anual das marés a partir dos mesmos pressupostos, mas deixou de considerar a diferença entre as duas marés diárias. O livro de Chrisogono era acompanhado por um conjunto de discos de cartão concêntricos para calcular as posições relativas da Terra, Lua e Sol (Bonelli e Russo, 1996).

Bonelli e Russo (1996) relatam que as ideias de Chrisogono sobre marés foram amplamente adotadas por muitos autores, principalmente venezianos, que utilizaram suas teorias em seus próprios trabalhos. Autores como **Federico Delfino (1477 - 1547)**, **Ludovico Boccaferri (1482 - 1545)** e **Girolamo Cardano (1501 - 1576)** se basearam

---

<sup>64</sup> Em astronomia, "nadir" é o ponto do céu diretamente abaixo de um observador. É o oposto do "zênite", que é o ponto mais alto do céu diretamente acima do observador. O nadir é geralmente usado como um ponto de referência na astronomia para localizar objetos celestes ou para determinar a altitude de um observador em relação ao nível do mar. O nadir é o ponto onde uma linha vertical traçada a partir do observador se encontra com a superfície da Terra, e é o ponto mais distante da esfera celeste que pode ser visto a partir de uma determinada posição na Terra (Saraiva, 2004).

explicitamente nas teorias de Chrisogono em suas próprias obras sobre marés. O trabalho de Chrisogono foi reproduzido na íntegra por **Giovanni Paolo Galluccio (1538 - 1621)** e sua teoria foi adotada em Veneza por **Annibale Raimondo (1505 - 1591)** e na França por **Claude Duret (1570 - 1611)**. Todos esses autores explicaram os fenômenos das marés com base na posição do Sol e da Lua. Por fim, **Florido Ambrosio Patavani**, em 1613, também explica as marés com base nas teorias de Chrisogono (Bonelli e Russo, 1996, p.390).<sup>65</sup>

Apesar de todos esses trabalhos, as ideias expostas por Chrisogono não foram facilmente aceitas. Por exemplo, Simon Stevin<sup>66</sup>, o qual refutava sua teoria das marés. Evidentemente, o conhecimento possuído por Chrisogono era muito difícil de ser alcançado por meios puramente científicos. Nem mesmo Galileu, que estava interessado em explicar as coisas de uma maneira diferente, conseguiu explicar o que Chrisogono sabia. Além disso, Stevin também falhou em estabelecer uma teoria científica das marés baseada nas mesmas premissas de Chrisogono (Bonelli e Russo, 1996).

**Júlio César Scaliger (1484 - 1558)**, cientista italiano, depois da (re)descoberta da América, apresentou uma nova teoria sobre as causas das marés. Em 1557, ele sugeriu que não só a Lua, mas também a oscilação da água do mar entre as costas da América e Europa eram responsáveis pelo fluxo das marés. A origem dessa teoria pode

---

<sup>65</sup> Decidimos não analisar de forma detalhada cada uma dessas obras se não o capítulo ficaria muito extenso. No entanto, segue o nome de cada uma das obras para o leitor curioso e estudioso:

Federico Delfino, *De fluxu et refluxu aquae marts*, Venice, 1559. Uma segunda edição dessa obra foi impressa em Basileia no ano de 1577.

Ludovico Boccaferri, *Lectiones...in secundum ac tertium meteorum Aristotelis*, Venice, 1570. Teoria de Chrisogono é apresentada nas folhas 14v e seguintes.

Girolamo Cardano, *De rerum varietate*, Basel, 1587.

Giovanni Paolo Galluccio, *Theatrum mundi et temporis*, Venice, 1588, ch. 12, 70-82.

Annibale Raimondo, *Trattato utilissimo e particolarissimo del flusso e del riflusso del mare*, Venice, 1589, folhas. 3r-7v.

Claude Duret, *Discour de la ve'rite des causes et effects des divers cours, mouvements, flux, reflux et saleure de la mer oce'ane, mer Me'diterrannee et autres mers de la terre*, Paris, 1600. Duret simplesmente plagiou o trabalho de Delfino citado anteriormente; veja Duhem, op. cit. (2), 368.

Florido Ambrosio, *Dialogismus de natura universa marts ac eius genesi et de causa fluxus et refluxus eiusdem...*, Padua, 1613.

<sup>66</sup> Falaremos dele mais para frente.

ser encontrada nos fenômenos de ressonância que ocorriam em alguns dos grandes lagos da Suíça na época (Woodworth, 2023).

**Andreas Cesalpino (1519 - 1603)**, médico, que também foi professor na Universidade de Pisa na época em que Galileu aí estudou - e Galileu se refere às ideias de Cesalpino no Diálogo (Mariconda, 2011, p.790, 823, 844, 847) - propôs uma explicação, na qual o fluxo e refluxo do mar seria um movimento libratório<sup>67</sup> causado pela Terra, e não diretamente pelo fluido. Essa explicação era surpreendentemente inovadora e mecânica, mas baseada em ideias astronômicas tradicionais. Para explicar a precessão dos equinócios e a trepidação imaginária, Cesalpino atribuiu à própria Terra um movimento libratório irregular, que produziria as marés como efeito observável. Alguns estudiosos e intérpretes (cf. Ellis, 1876; Shea, 1992) consideraram que a teoria de Cesalpino antecipou a de Galileu em certo sentido (Mariconda, 2011, p.844-845). Andrea Cesalpino escreveu *Quaestiones peripateticae*, Veneza, em 1571. A 'Quaestio V no livro III desta obra é intitulada '*Maris fluxum, et refluxum ex motu terrae non lunae fieri*' (As marés acontecem por causa do movimento da Terra, não da Lua). Sosio (1970, p. lxxviii) observa que o título promete mais do que entrega. Cesalpino, que não era de orientação copernicana, na verdade não se refere nem à rotação nem à revolução da Terra, mas a um estranho pequeno movimento comunicado à Terra pelo movimento dos céus. Estamos lidando, portanto, com uma tentativa de explicar as marés por meio de movimentos da Terra por um autor que difere dos outros citados por não ter motivo para acreditar nos movimentos da Terra e introduzir um “*ad hoc*”. Que melhor confirmação de que a associação entre as marés e os movimentos da Terra foi sugerida a diferentes autores não por terem argumentos em comum, mas por terem lido recursos em comum? (Bonelli e Russo, 1996).<sup>68</sup>

**Girolamo Borro (1512 - 1592)**, que também foi professor na Universidade de Pisa na época em que Galileu foi aluno, em seu *Del Flusso e Reflusso del Mare e dell'inundatione Del Nilo* (Do Fluxo e Refluxo do Mar e da Inundação do Nilo), em 1577, fez relações das marés com a Lua, mas justifica a ação lunar a partir de sua

---

<sup>67</sup> Libratório: em que há oscilação. Fonte: <https://aulete.com.br/librat%C3%B3rio>. Acesso em 19/04/2023. Dicionários bem respeitados como Aulete e Sacconi definem esse verbete dessa forma. O Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa (VOLP), 6ª edição, que tem poder de lei, reconhece tal palavra.

<sup>68</sup> Esta indagação sugere que a similaridade nos argumentos usados por diferentes autores para explicar as marés pode ser explicada pela influência de um conjunto comum de recursos de leitura, em vez de uma conexão direta entre suas ideias. Em vez de terem chegado a essas ideias independentemente, os cientistas podem ter sido influenciados por fontes de informação semelhantes.

luminosidade, que provocaria o aquecimento das águas causando o fluxo e o refluxo do mar.

“Depois das primeiras seis horas do dia, chegam as seis seguintes, a lua ambulante entra no segundo quarto do mundo e começa a ferir o primeiro quarto à esquerda, deles novamente fugindo. (...) E à medida que o calor mais quente as incha, a hora menos quente as esvazia e as condensa: condensadas e esvaziadas, elas são baixadas. E quanto mais a lua do primeiro quarto se aproxima do oeste de seu horizonte (...) o refluxo no primeiro quarto acaba, e as águas muito altas que estavam naquele primeiro quarto, agora são muito baixas; aquelas do segundo quarto, que já começam a subir, são muito altas (...). Seguido pelo terceiro quarto do dia, a lua ambulante entra no terceiro quarto do mundo e infla os hemisférios dos Antípodas, iniciando um novo fluxo neles. (...) Enquanto a Lua eleva as águas deste terceiro quarto, ela abaixa as do segundo, pelas razões que agora são ditas. A quarta parte do dia vem, e a Lua continua sua jornada, começa a controlar as águas do mar no terceiro quarto, com seus raios um tanto transversais, portanto o calor diminui, e as águas condensadas novamente se esvaziam, e assim, quanto a Lua chega no final das últimas seis horas do dia e do último quarto do caminho, então novamente as águas retornam muito baixas no terceiro quarto passado, e muito altas no último quarto presente. Deste modo, o que você ouviu é feito um fluxo e refluxo perpétuo no mar de seis em seis horas, que é o que se diz sobre o assunto proposto ao nosso raciocínio”. (Borro. *Del Flusso e Reflusso del Mare e dell'inundatione Del Nilo*, p. 146; citado por Soares, 2019, p.16).

Borro afirmou que o fluxo das marés ocorreria tempos depois da passagem da Lua pelo zênite. Entretanto, com a utilização de marégrafos, instrumentos que registram continuamente o nível do mar, é possível observar que há uma diferença de cerca de 3 h entre a passagem da Lua pelo zênite e a subida da maré, contradizendo a teoria de Borro (Soares, 2019).

**Simon Stevin (1548 - 1620)**, em 1590, atribuiu a causa das marés à atração da Lua sobre a massa de água. Stevin, considerado um dos maiores cientistas de sua época, 80 anos depois que o livreto de Chrisogono foi publicado, em sua obra *Van de Spiegheling der Ebbenvloet* (Sobre o espelho das marés), publicada em Leiden em 1608 como parte de seus *Wisconstighe Ghedachtenissen* (Memórias científicas)<sup>69</sup>, visava ao

---

<sup>69</sup> A obra, com uma tradução em inglês, pode ser encontrada em *The Principal Works of S. Stevin*, 5 vols., Amsterdam, 1961, iii, p.323-357.

mesmo objetivo de Chrisogono: uma explicação das principais características das marés baseada em pressupostos sobre a relação entre as marés e a posição dos corpos astrais. Stevin não aceitou a teoria de Chrisogono, uma vez que não mencionava nenhum papel do Sol na afetação das marés, nem, como consequência, podia oferecer qualquer explicação para o ciclo mensal observável, embora o reconhecesse (Bonelli e Russo, 1996). Na sua obra, apresentou uma teorização do fenómeno da subida e descida da maré, refutando muitos conceitos errados que ao tempo existiam em torno do fenómeno das marés. Stevin defendeu a ideia de ser a atração da Lua a força responsável pelo ciclo de maré e explicitou, em termos claros, os conceitos de enchente, vazante e preamar e clarificou os conceitos de maré viva e maré morta, reafirmando a necessidade de mais investigação sobre o assunto (Palmerino, 2010, p.200).

**Paolo Sarpi (1552 – 1623)**, polímata italiano, descreve dois argumentos em defesa da teoria copernicana que, à primeira vista, guardam uma semelhança superficial com argumentos que foram posteriormente apresentados por Galileu no *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo), uma característica que levou um número considerável de historiadores a concluir que as ideias originais devem ter sido de Galileu. Um exemplo, datado de 1592, diz respeito à possibilidade de extrusão de objetos de uma Terra em rotação. Este argumento é, no entanto, bastante diferente daquele apresentado posteriormente por Galileu no Diálogo. Outra é sua teoria das marés e, embora Galileu tenha publicado posteriormente uma teoria semelhante à encontrada no *Pensieri Naturali, Metafisici e Matematici* (Pensamentos Naturais, Metafísicos e Matemáticos)<sup>70</sup>, ela é significativamente diferente da de Sarpi e não é tão diretamente baseada na teoria de Copérnico quanto a original de Sarpi. Essa teoria, registrada nos *pensieri* (568–571), baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra como sendo um círculo excêntrico onde o Sol não está em seu centro, enquanto no Diálogo a órbita da Terra é considerada um círculo com o Sol em seu centro<sup>71</sup>. (Naylor, 2014, p.661-662 – **grifo nosso**).

---

<sup>70</sup> A obra analisada por Naylor (2014) foi: *Pensieri naturali, metafisici e matematici* / Paolo Sarpi; *Manoscritto dell'iride e del calore, Arte di ben pensare, Pensieri medico morali, Pensieri sulla religione, Fabulae, Massime e altri scritti*; edizione critica integrale commentata a cura di Luisa Cozzi e Libero Sosio, 1996.

<sup>71</sup> Paulo Sarpi, *Pensieri Naturali, Metafisici e Matematici* (ed. Luisa Cozzi and Libero Sosio), Milan: Riccardi, 1996, *pensieri* 568–571, pp. 423–426.

Embora ao longo do século XVI tenha existido uma ampla gama de teorias, essa nova teoria foi uma ruptura marcante com as explicações anteriores, pois explicava a origem das marés usando uma explicação baseada na experiência com um argumento diretamente sustentado na teoria copernicana, pois nesses *pensieri* a explicação das marés é fornecida apenas em termos do duplo movimento da Terra – sua rotação diária e seu movimento orbital anual. É ousado, mas muito direto e uma explicação totalmente bidimensional. A ideia de que os movimentos da Terra estariam relacionados com as marés já havia sido sugerida por outros e há duas notas no *Pensieri* que revelam que Sarpi havia adotado essa ideia em 1591 – quatro anos antes de registrar a teoria das marés e um ano antes da chegada de Galileu em Veneza (Sarpi *apud* Cozzi e Sosio, 1996, *pensieri* 568-571, p.423-426 – **grifo nosso**). Na última década do século, mais de uma pessoa apresentou a visão de que poderia haver uma ligação entre o movimento da Terra e as marés. Por exemplo, Andreas Cesalpino<sup>72</sup> sustentava que o movimento da Terra produzia as marés (Cesalpino, 1571)<sup>73</sup>. Mas a teoria do *Pensieri* de Sarpi é a tentativa mais antiga conhecida de fornecer uma demonstração física do movimento da Terra e foi vista por Drake e muitos outros como diretamente relacionada à aceitação do copernicanismo por Galileu (Naylor, 2014, p. 662).

Os *pensieri* de Sarpi descrevendo a teoria das marés, embora extremamente abreviados, fornecem uma explicação básica de um ciclo de maré diário e anual com base na teoria de Copérnico.

**Note 568:** “The diameter of the Earth in the orbit of the annual motion subtends just less than 6 minutes [at the Sun] so that the [Earth’s] centre moving less than 60 [minutes per day] in its upper part of the daily motion in 30 minutes advances 1/5, and in the other 30 of the lower is as much retarded. The upper is the night, the lower the day, so that every point of the surface is now fast, now middling, now slow, as with the Moon” (Sarpi, op. cit. (2), *pensiero* 568, p. 423 *apud* Naylor, 2014, p.662).

Naylor (2014), afirma a existência de argumentos copernicanos nessa nota 568, a saber: a composição dos dois movimentos atribuídos à Terra, seu movimento orbital e

---

<sup>72</sup> Suas contribuições serão apresentadas mais para frente desse capítulo.

<sup>73</sup> Segue a referência completa: Andrea Cesalpino, *Quaestionum peripateticarum libri V*, Venice: Iuntas, 1571, 70r–71v.

seu movimento rotacional. Em notas posteriores, Sarpi explica o fenômeno das marés. A observação final de Sarpi identifica a semelhança entre a mudança cíclica na velocidade do movimento da Lua em relação ao Sol e a da superfície da Terra. O movimento da Lua é máximo quando seu movimento orbital em torno da Terra está na mesma direção que o movimento orbital da Terra e mínimo quando quinze dias depois ela está se movendo na direção oposta. A similaridade dos dois conjuntos de combinações nos movimentos da Terra e da Lua é declarada de forma tão enigmática que seu significado foi negligenciado:

**Note 569:** “Any water carried in a basin, at the commencement of its movement remains behind and rises at the rear, as it has not yet fully received the motion, and when stopped it continues to be moved by the received motion and rises at the front. The seas are waters in basins, so that the annual motion of the Earth has the effect that it is now swift, now slow and then average by the diurnal motion, which is seen in the diverse movement of the basin. And if the seas are so large that they have a quarter [sphere] so that part is in the swift, part in the average, there will be a greater difference, and yet more if they have a half-sphere, so that part is in the swift and part in the slow.” (Ibid., p. 663).

**Note 570:** “Therefore it is manifest that lakes and small seas do not produce this effect being insensible basins. It is also manifest that the variation of the eccentricity, varying the ratio of the diurnal to the annual motion, equalizes the augmentations and the decrements. Also it is manifest, how the different positions of the shores may cause variation, if their length is along or across the motion. Finally it is manifest how the motion of the seasons, carrying the shores now to one site and now to another, makes an annual variation of the augmentations and decrements.” (Ibid., p. 663).

A nota 570, embora muito resumida, descreve as diferentes maneiras pelas quais a magnitude da ação da causa primária pode afetar a maré. Ele afirma que há três maneiras pelas quais a magnitude da ação da causa primária é alterada, incluindo a redução direta do efeito da rotação da Terra pelo tamanho do mar ou lago, a orientação do mar e a mudança na razão entre a rotação diurna e a velocidade orbital da Terra à medida que ela se move ao longo de sua órbita. O texto também sugere que a magnitude das marés está relacionada às estações. Cada uma das quatro frases se refere a uma consequência diferente da teoria (Naylor, 2014, p.663-664).

As notas discutem a teoria de Sarpi sobre a mudança na magnitude das marés devido à alteração na proporção entre a velocidade da superfície da Terra produzida pela rotação diurna e a velocidade orbital da Terra. A teoria de Sarpi sugere que essa proporção é afetada pela excentricidade da órbita da Terra, o que causa um ciclo anual de variação nas marés. A segunda frase é considerada enigmática, mas indica que a variação na velocidade orbital da Terra produzida pela excentricidade da órbita é responsável pela variação cíclica das marés. A conclusão de Sarpi é resumida em sua declaração: "*It is also manifest that the variation of the eccentricity, varying the ratio of the diurnal to the annual motion, equalizes the augmentations and the decrements*" (Naylor, 2014, p.664).

Assim, esta teoria das marés é fundada na suposição básica da teoria de Copérnico de que a Terra se move em uma órbita excêntrica em torno do Sol e que sua velocidade orbital muda ciclicamente ao longo do ano. Nesse aspecto, é totalmente diferente da teoria posterior de Galileu. De fato, a causa única e fundamental da variação das marés na visão de Sarpi é a mudança contínua na velocidade orbital da Terra postulada por Copérnico. Isso ocorre porque acredita-se que o efeito mecânico total seja proporcional à razão entre a velocidade do movimento diurno da Terra e seu movimento orbital. No entanto, essa suposição crucial está implícita e, embora não declarada, é o fundamento da teoria de Sarpi. Este conceito é uma ideia totalmente ausente do primeiro relato de Galileu sobre sua própria teoria das marés, que apareceu em seu *Discorso del flusso e reflusso del mare* (Discurso sobre as marés), em 1616 (Naylor, 2014, p.664).

Em suma, para Naylor (2004), Paolo Sarpi, apesar de suas responsabilidades religiosas, esteve ativamente envolvido na ciência entre 1578 e 1598, conforme indicado em seu livro *Pensieri*. A partir de 1585, ele estudou a teoria de Copérnico e registrou argumentos a favor dela. Em 1595, ele esboçou uma teoria copernicana das marés semelhante à do Diálogo de Galileu, que se tornou bem conhecida. No entanto, uma análise detalhada revela que a teoria de Sarpi é diferente daquela de Galileu em vários aspectos importantes. Além disso, é possível afirmar que Sarpi era um copernicano em 1592, enquanto Galileu ainda não havia se convertido à teoria de Copérnico. A análise da teoria das marés de Sarpi e do trabalho de Galileu na época indica que a teoria registrada por Sarpi em 1595 era originalmente de sua autoria. Isso implica que a contribuição de Sarpi para a Revolução Científica é mais significativa do que se pensava anteriormente. Além disso, algumas das características mais

significativas da teoria das marés publicada por Galileu no Diálogo foram, na verdade, de Sarpi, e provaram ser de valor duradouro.

No Livro XXVIII de sua *Pancosmia*, **Francesco Patrizi (1529 - 1597)**, livro este inserido dentro de sua obra maior, *Nova de universis philosophia* (Nova filosofia no universo) (50 livros), datado de 1591, Patrizi fornecera uma história pormenorizada das teorias sobre as causas das marés, citando, em particular, Frederico Chrysogonos, que havia estudado com mais exatidão a relação temporal entre as marés e movimento da Lua, concluindo que havia uma coincidência temporal entre elas e certas posições lunares. Em decorrência dessas investigações, relatara Patrizi, Chrysogonos, Frederico Delphino, Agostino Cesareo e, por fim, Telésio haviam formulado a teoria de que a Lua causava as marés (Jammer, 2011, p.114-115). Em suma, Francesco Patrizi, no Nova filosofia do universo, desenvolve uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam (cf. Rossi, 1989; Rees, 1996b; Mariconda, 2007, p.507).

**Johannes Kepler (1571 – 1630)**, esboçou a teoria gravitacional das marés na introdução de seu livro *Astronomia Nova*, publicado em 1609 (Aiton, 1954). Ele descreveu a gravidade como uma "afeição corpórea mútua entre corpos cognatos" semelhante à propriedade magnética, e sugeriu que essa influência era proporcional à massa (moles) dos corpos. Já em 1596, em seu livro *Mysterium Cosmographicum* (Mistério cosmográfico), Kepler assumiu, embora sem apresentar qualquer evidência de apoio, que a gravidade da Terra se estendia até a Lua (Aiton, 1955, p.206; Voelkel, 2002, p.72), enquanto em uma carta a Herwart von Hohenburg escrita em 1607, ele identificou a atração da Lua, que causou as marés, com a gravidade da Terra. Kepler escreveu a Herwart:

"The sea is thus attracted to the moon, as all heavy bodies, including the sea itself, are attracted to the earth." (Aiton, 1955, p.206).

O conteúdo dessa carta nos auxilia a compreendermos o contexto histórico em que Kepler chegou à sua concepção de força. Nessa carta, Kepler referiu-se a Francesco Patrizi e sua discussão sobre as marés. Kepler concordou com os defensores<sup>74</sup> da teoria

---

<sup>74</sup> São eles: Patrizi, Chrysogonos, Delphino, Cesareo e Telésio, já citados anteriormente.

lunar, mas generalizou suas descobertas num sentido importante: os oceanos eram atraídos pela Lua tal como todos os objetos pesados, inclusive os próprios oceanos, eram atraídos pela Terra (Kepler *apud* Jammer, 2011, p.115).<sup>75</sup> Segundo o próprio Kepler, isso foi só uma especulação, como se ele pretendesse dizer que a atração lunar funcionava de maneira análoga à gravitação terrestre. Mesmo assim, se a considerarmos no contexto de seus outros trabalhos, parece que ele já havia concebido o caráter universal da atração, ideia geralmente atribuída a Newton (Jammer, 2011, p.115).

Kepler acreditava que esta força era algum tipo de magnetismo, influenciado pela recente descoberta de William Gilbert sobre o campo magnético da Terra.

"The sphere of influence of the attraction which is in the moon, extends as far as the earth, and incites the water up from the torrid zone, in whatever place it stands in the zenith, insensibly in contined seas, sensibly in those places where the cavities of the ocean are widest and the freedom from restraint of the reciprocation is greatest.

The moon passing swiftly over the zenith, though the waters cannot follow as quickly, causes a westward flow in the torrid zone, until impinging upon the opposite shores, it is deflected; the assembly of the waters is dissolved by the departure of the moon, ..., because deserted by the attraction which had caused it, ..., as in water vases, it returns and leaps against its shores, concealing them." (Aiton, 1954).

Todorov (2016) ainda destaca a seguinte passagem:

"If the earth ceased to attract the waters of the sea, the seas would rise and flow into the moon ... If the attractive force of the moon reaches down to the earth, it follows that the attractive force of the earth, all the more, extends to the moon and even farther..." (Todorov, 2016).

Recomenda-se a exposição emocional bem documentada das seitas. 6.8-10, p.334-343, do livro de Koestler onde essas citações são colocadas em contexto.

---

<sup>75</sup> "*Aliquamulta de hac re in Francisco Patricio inveniuntur: quamvis perperam is Lunam (si bene memini) excludere conatur a consideratione causarum. Ex illo Germano authore nata mihi est haec speculation: a Luna maria sic attrahi, ut gravia omnia, ipsaque maria, attrahuntur a terra.*" Kepler, *Gesammelte Werke*, v.15, p.387, *apud* Jammer, 2011, p.124.

Harris (1898) menciona que Kepler estava fazendo objeções às ideias de maré de Galileu já em 1598. Em seu *De Fundamentis Astrologiae Certioribus* (Sobre os mais certos fundamentos da astrologia) de 1601, Kepler observou que

“all things swell up with the waxing Moon and subside when she is waning” (Woodworth, 2023. p.9).

Neste livro, Kepler fez o que se acredita ser a primeira menção de uma variação de 19 anos nas marés (ver Tese 47 na tradução de Brackenridge e Rossi, 1979). No último livro de Kepler, um romance chamado *Somnium* (*Sonho*), publicado postumamente em 1634, mas na verdade escrito em 1608, ele especulou que:

“the causes of the ocean tides seem to be the bodies of the Sun and Moon attracting the ocean waters by a certain force similar to magnetism. Of course, the body of the Earth likewise attracts its own waters, an attraction which we call ‘gravity’.” (Woodworth, 2023. p.9).

Um ano depois, os axiomas de Kepler para uma “verdadeira teoria da gravidade” em sua *Astronomia Nova* de 1609 incluíam a necessidade de atração entre a Terra e a Lua. Para isso, procurou uma forma de atração magnética, tendo-se inspirado na publicação de William Gilbert em 1600 sobre o campo magnético da Terra (Ekman, 1993; Fara, 1996; Hecht, 2019). Quanto às marés, afirmou:

“If the Earth ceased to attract (to itself) the waters of the sea, they would rise and pour themselves over the body of the Moon.” (Woodworth, 2023, p.9).

Como resultado, ele afirmou que:

“insensibly in enclosed seas, but sensibly where there are broad beds of the ocean.” (Ibid., p.9-10).

A interpretação de Kepler posteriormente deu um passo aparentemente para trás quando a expressão de suas visões astrológicas no *Harmonices Mundi* (Harmonia do Mundo), de 1619, o levou a interpretar as marés em termos da respiração mística dos

animais terrestres e especialmente a respiração dos peixes. O *Complete Dictionary of Scientific Biography* (CDSB, 2008) afirma que nessa época

“swept on by his fantasy, Kepler found animistic analogies everywhere” (Woodworth, 2023, p.10).

Além disso, a *Scientific American* (1858) relatou que Kepler

“believed that the earth was a real living animal, that the tides were due to its respirations, and that men and beasts were like insects feeding on its back” (Woodworth, 2023, p.10),

mas ignorou seu apoio anterior para uma atração como o magnetismo. No entanto, isso não significa que Kepler tenha renunciado as suas visões anteriores de atração magnética ou gravitacional (Harris, 1898).

Com base em antigas observações e correlações, Kepler já tinha interpretado corretamente, embora apenas de forma qualitativa, a razão pela qual as marés apresentam amplitude diferente consoante a fase da Lua e se comportam de forma diferente em diferentes costas conforme a posição relativa da Lua, mas apenas conseguia explicar as situações em que ocorria um ciclo de maré por dia (Pugh, 1996, p.3). Este conhecimento fora originalmente mencionado na obra de Ptolomeu intitulada *Tetrabiblos* (Robbins, 1940) como sendo derivada de antigas observações.<sup>76</sup>

Há muito mais a ser dito sobre Kepler. Revisões recentes de sua vida e obra podem ser encontradas em Hecht (2019). É importante perceber como foi difícil para outros pensadores lidar com a ideia de atração ou “ação à distância” por alguma força misteriosa como a proposta por Gilbert ou Kepler. Para alguns, quase cheirava ao ocultismo<sup>77</sup>. Em particular, a ideia foi ridicularizada por Galileu, que a considerou

---

<sup>76</sup> Ptolomeu com Frank E. Robbins, trans., *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Book 1, chapter 2. From chapter 2: "A Lua também, como o corpo celeste mais próximo da Terra, derrama a sua efluência de forma mais abundante sobre as coisas terreas, porque a maior parte delas, animadas ou inanimadas, são simpatéticas em relação a ela e mudam em companhia dela; os rios aumentam e diminuem a sua corrente com a sua luz, os mares mudam a suas próprias marés com a sua ascensão e ocaso, ...".

<sup>77</sup> “Oculto” é um termo aristotélico e moderno usado para distinguir qualidades que são evidentes aos sentidos daquelas que estão ocultas (Roos, 2001).

“to be a lamentable piece of mysticism which he read with regret in the writings of so renowned an author as Kepler” (Thomson, 1882).

Finalmente, ainda cabe um último comentário de Jammer (2011) sobre as razões que levaram Kepler a introduzir o conceito de força nas ciências exatas. Segundo Jammer, existem três razões circunstanciais e uma razão técnico-metodológica (que não vem ao caso desse trabalho). As razões circunstanciais incluem a revolução copernicana, que refutou a doutrina aristotélica dos lugares naturais e do absolutamente leve e pesado; o fenômeno das marés, que mostrou a influência mecânica direta da Lua na Terra; e a teoria de Gilbert, que ilustrou um possível *modus operandi* dessa força. Essas razões foram corroboradas pelas circunstâncias da época em que Kepler viveu (Jammer, 2011, p.122 – **grifo nosso**).

Em 1614, **Claude d'Abbeville (falecido em 1632)** publicou a obra *Histoire de la mission de pères capucins en l'Isle de Maragnan et terres circonvoisines* (História da missão dos padres capuchinhos na Ilha de Maragnan e terras vizinhas), onde mostrou que os Tupinambás já entendiam a relação da Lua com as marés antes da Europa. Na publicação, d'Abbeville narra suas observações do convívio por quatro meses com índios tupinambás, da família dos tupi-guarani, no Maranhão, localizados perto da Linha do Equador. Uma das anotações do missionário francês diz que “os tupinambás atribuem à lua o fluxo e o refluxo do mar e distinguem muito bem as duas marés cheias que se verificam na lua cheia e na lua nova ou poucos dias depois”. O que confirma o conhecimento por esses povos da relação entre as marés e as fases da lua muito antes das teorias de Galileu e de Newton (<https://mundogeo.com/2009/06/19/astrologia-indigena-preve-influencia-da-lua-sobre-as-mares-antes-de-galileu-e-newton/>)<sup>78</sup>.

**Marco Antonio de Dominis (1560 - 1624)**, bispo católico, embora envolvido com obras teológico-jurídicas, publicou dois artigos científicos: um sobre a explicação para o arco-íris e uma teoria sobre os telescópios e outro sobre as marés, em seu tratado *Euripus seu de fluxu et refluxu marts sententia* (Euripus, ou sobre o fluxo e refluxo do

---

<sup>78</sup> Fonte: Astronomia indígena prevê influência da lua sobre as marés antes de Galileu e Newton. Disponível em: <https://mundogeo.com/2009/06/19/astrologia-indigena-preve-influencia-da-lua-sobre-as-mares-antes-de-galileu-e-newton/>. Acesso em 02/04/2023.

mar)<sup>79</sup>, publicado em Roma em 1624 (Bonelli e Russo, 1996). O tratado em questão apresenta duas afirmações essenciais sobre as marés: (1) elas são causadas pela interação do Sol e da Lua, exercendo um efeito similar ao magnetismo; (2) a ação das duas luminárias está no máximo não apenas onde estão no zênite, mas também no ponto antipodal. De Dominis deduziu os ciclos diários e quinzenais das marés a partir desses pontos, além de destacar outras características, como a variação geográfica na altura e as correntes de maré horizontais. O principal interesse de sua obra está na sua tentativa de conciliar teoria e observação, apresentando duas teorias de maré diferentes. A primeira é baseada na hipótese de que a ação do Sol e da Lua está no máximo onde estão no zênite e nadir, enquanto a segunda considera que essa ação se estende ao longo de todo o meridiano aos quais esses pontos pertencem. A segunda teoria parece ser a contribuição pessoal de de Dominis. No entanto, a objeção que levou o autor a abandonar a primeira teoria é mais interessante, pois argumenta que a diferença de altura entre as duas marés altas diárias deve estar no máximo durante o solstício e no mínimo durante o equinócio, o que não é observado na prática. De fato, em alguns mares, como o Mar Arábico, as marés seguem o padrão deduzido corretamente da teoria descartada (Bonelli e Russo, 1996).

Agora, *Euripus* compartilhou características importantes com o trabalho de Chrisogono sobre as marés. Ambos concordaram que a atração do Sol e da Lua causa um aumento máximo do nível do mar em dois pontos antipodais. No entanto, *Euripus* adicionou novos argumentos que não estavam presentes no trabalho de Chrisogono, como a causa da esfericidade da Terra e o ciclo anual das desigualdades entre as duas marés diárias. Além disso, há algumas inconsistências científicas no trabalho de de Dominis, como a incompatibilidade entre a teoria das marés e a esfericidade perfeita da Terra. De Dominis teve algumas ideias interessantes, mas acabou descartando-as mais tarde em seu trabalho. Essas ideias incluíam uma explicação correta para as desigualdades diárias das marés e a ideia de que as marés fazem os oceanos assumirem uma forma oval (Bonelli e Russo, 1996).

---

<sup>79</sup> O título refere-se às correntes de maré vistas no Estreito de Euripus entre a ilha de Eubéia e o continente grego. Bonelli e Russo (1996) sugerem que é provável que *Euripus* também tenha sido inspirado por um desejo de atacar a posição de Galileu.

Bonelli e Russo (1996) ainda discutem as possíveis fontes de inspiração para o trabalho de de Dominis sobre as marés. Embora as fontes diretas não sejam claras, é provável que ele tenha utilizado conhecimentos clássicos, como os de Seleucus da Babilônia. De Dominis elaborou uma teoria matemática sobre o ciclo anual das desigualdades diárias das marés, que contradiz a explicação de Strabo sobre o assunto. Isso sugere que de Dominis pode ter tido acesso a informações sobre os estudos helênicos das marés que não foram transmitidos por Strabo e Plínio. As considerações aplicadas à de Dominis também se aplicam à Chrisogono, pois ambos são ecléticos em sua abordagem, apresentando considerações contraditórias e seus interesses principais não são relacionados às marés. É possível que a similaridade entre suas obras seja explicada pelo fato de que as fontes usadas por de Dominis também eram conhecidas por Chrisogono. Destaca-se também que Chrisogono criticou Plínio, o Velho, por não ter registrado as causas dos ciclos das marés no livro II da *Naturalis historia*, o que sugere que Chrisogono acreditava que as informações necessárias estavam disponíveis nas fontes de Plínio (Bonelli e Russo, 1996). No entanto, há um possível precedente para as obras que estão sendo discutidas, que é um trabalho sobre as marés do século XIII de Jacopo Dondi. Esse trabalho apresenta um erro grosseiro<sup>80</sup> e uma explicação astronômica potencialmente correta que se torna claramente contrária à evidência. O autor também destaca que Dondi era de Pádua, assim como outros autores que escreveram sobre marés e astronomia, sugerindo uma possível origem geográfica comum. Assim, pode ter havido informações disponíveis desde o século XIII sobre uma teoria astronômica estática das marés que não foram completamente compreendidas (Bonelli e Russo, 1996).

Em suma, de Dominis expõe uma teoria, em grande medida correta, segundo a qual as marés são atribuídas a uma força, semelhante à do magnetismo, exercida pela Lua, e em menor medida pelo Sol, sobre as águas dos mares. Essas forças explicam os ciclos semidiurnos e mensais das marés de maneira bastante satisfatória. No entanto, o desenvolvimento da teoria às vezes parece apressado e pouco coerente; além disso, o autor se baseia em algumas considerações pouco justificáveis, como a prevalência de influências lunares devido à natureza úmida desse corpo celeste. Portanto, a obra não apresenta muita originalidade, muito provavelmente retomando textos mais antigos, mas

---

<sup>80</sup> A descrição desse erro não é muito detalhada em Bonelli e Russo (1996). Para compreendermos bem esse erro, deve-se acessar a obra original de Chrisogono. No entanto, não conseguimos acessá-la pela *internet*.

tem a vantagem de descartar todas as hipóteses substancialmente fictícias sem evidências verificáveis (redemoinhos subaquáticos, incêndios subaquáticos, atividade respiratória da Terra, etc.) ainda invocado no século XVII para explicar as marés. A teoria de Dominis, que essencialmente repropõe o que havia sido exposto séculos antes por Jacopo Dondi e Federico Chrisogono, pode derivar dos estudos de Seleuco da Babilônia. Dominis foi solenemente condenado pelo Santo Ofício, como herético reincidente, e seu corpo exumado foi queimado juntamente com seus escritos proibidos em *campo dei fiori*. (Para um perfil interessante de de Dominis e uma discussão dos métodos da Contrarreforma no pontificado de Urbano VIII, cf. Redondi, 1985, cap. 4).

**Francis Bacon (1561 – 1626)**, em 1611, publicou seu *De fluxu et refluxu maris* (Do fluxo e refluxo do mar), admitindo que a Lua poderia ser a responsável pelas marés, embora não afirmasse categoricamente. De todo o modo, toma uma posição contrária ao seu contemporâneo, Galileu. Bacon, diz que:

“[...] O exame das causas do fluxo e refluxo do mar, tentado pelos antigos e posteriormente deixado de lado, retomado pelos mais modernos e, contudo, mais enfraquecido que resolvido pela diversidade de opiniões, é vulgarmente, por conjectura ligeira, referido à Lua, devido a algum consenso desse movimento com o movimento da Lua.” (Bacon, *Do fluxo e refluxo do mar, scientiæ studia*, São Paulo, v.5, n.4, p.520-48, 2007, p.521 – **grifo nosso**).

Bacon também já sabia da periodicidade:

“Portanto, suprimido o movimento das correntes, deve-se dirigir [a investigação] para os outros quatro movimentos constantes: *o das 6 horas, o mensal, o quinzenal e o semestral*, dos quais somente no de *6 horas* se vê o fluxo do mar agir e mover-se; mas o mensal parece só determinar e restituir aquele das 6 horas e, por sua vez, o quinzenal e o semestral aumentá-lo e intensificá-lo. Com efeito, o fluxo e refluxo das águas inunda e esvazia os litorais em lugares determinados e varia segundo a variação das horas e a força e a quantidade das águas, daí que os três movimentos restantes se apresentem como visíveis.” (Ibid., p.525).

Bacon propõe duas possibilidades para a causa das marés: a primeira ele chama de aumento e diminuição das águas, e a segunda é dita progressão, cujo relato é o seguinte:

“Ora, o movimento de aumento e de diminuição julgamos ser tal qual se encontra na água fervente, que se eleva nas caldeiras e em seguida aquietasse. E o movimento de progressão é tal qual se encontra na água transportada em uma bacia, da qual a que deixa um lado dirige-se ao lado oposto.” (Ibid., p.525).

Bacon, em *Novo Organum* (1620), sua outra obra, estende suas análises quanto às marés<sup>81</sup> e, dentre as causas supracitadas, sugere três possibilidades para a ocorrência da primeira causa:

“É necessário que este movimento, graças ao qual as águas sobem e descem, sem o concurso do impulso das águas de outro mar, ocorra de uma dessas três maneiras seguintes. Que tal quantidade de água surja das entranhas da Terra e para elas de novo se recolha; ou que não haja qualquer quantidade maior de água, mas que as mesmas águas, sem aumentar a sua quantidade, dilatam-se ou rarifiquem-se a ponto de ocupar maior espaço e dimensão, e depois se contraíam para o volume inicial; ou que não haja aumento nem de quantidade e nem de extensão, mas que as mesmas águas (tal como são em quantidade, densidade e rarefação) subam e depois desçam em razão de uma força magnética que as atrai para o alto e por simpatia. Assim, deixando de lado os dois primeiros movimentos, vamos restringir a questão (se assim se desejar) a este último movimento, procurando investigar se há a elevação por consenso, simpatia ou força magnética”. (Bacon, *Novo Organum*, tradução - José Aluysio Reis de Andrade, 2002, p.202).

Soares (2019), resume essas possibilidades baconianas, da seguinte forma:

- 1º – há água dentro da Terra que escoar para o mar e faz a maré subir, e quando a maré baixa, essa água volta para dentro da Terra;
- 2º – a água do mar dilata e contrai, provocando as marés;
- 3º – existe uma atração que Bacon supõe ser magnética que faz a água subir e descer.<sup>82</sup>

---

<sup>81</sup> Inclusive criticando, em 1620, o *Discorso del flusso e riflusso del mare* (Discurso do fluxo e refluxo do mar), escrito por Galileu pouco antes da promulgação do édito de condenação de Copérnico em 1616 e que circulou em cópias manuscritas, das quais uma chegou até Bacon (Mariconda, 2007).

<sup>82</sup> Para uma análise mais detalhada dessas três investigações, consultar: Mariconda. *Francis Bacon e as marés: a concepção da natureza e o mecanicismo*. *Scientiae Studia*, v.5, p.5013-517, 2007.

Como o próprio Bacon diz na nota citada, ele só se dedica, nessa obra, à investigação da terceira.<sup>83</sup> A solução baconiana para o problema das marés, alinha-se ao estilo mecanicista da primeira metade do século XVII em sua negação da possibilidade de uma ação a distância por parte da Lua, muito embora defenda uma tese geocêntrica e geostática que se opõe ao copernicanismo (Mariconda, 2007, p.501).

“Dessa desigualdade fundamental da velocidade dos movimentos extrai Galileu a causa do fluxo e do refluxo do mar. Sendo a terra de rotação mais veloz que a água, deve surgir, segundo ele, a acumulação e a elevação das águas, e vice-versa, em sua descida, como acontece com um recipiente de água fortemente agitado. Mas tal opinião se fundamenta em uma hipótese arbitrária, isto é, que a Terra se move, isso sem ter bem observado o movimento regular de cada seis horas do oceano”. (Ibid. p.245 – **grifo nosso**).

Bacon iniciou seu ensaio de 1623, *On the Flux and Reflux of the Sea* (Sobre o Fluxo e Refluxo do Mar), reconhecendo os ciclos diários, quinzenais e mensais das marés, e um ciclo semestral com marés maiores nos equinócios do que nos solstícios (Shea, 1970). Ele sugeriu que a aparente variabilidade mensal e anual das marés seria semelhante em todos os lugares, o que é o caso. Ele também observou a natureza progressiva de onda das marés à medida que se propagam do sul para o norte ao longo da costa leste do Atlântico Norte, semelhante às observações de Beda ao longo da costa leste da Inglaterra. Ele argumentou a favor de observações em outros lugares. Galileu fez comentários semelhantes sobre a progressão das marés, embora acredite-se que Bacon tenha chegado a suas próprias conclusões antes que as notícias da teoria de Galileu chegassem até ele (Aiton, 1954). Aiton (1954) afirma:

“This idea that the tides depend on the progressive movement of water and not on any alteration of its physical state is the only positive contribution made by either Bacon or Galileo to the solution of the problem of the tides.” (Aiton, 1954 *apud* Woodworth, 2023, p.14).

---

<sup>83</sup> As marés não eram o tema central no *Novo Organum*, servindo como pano de fundo para o verdadeiro objetivo do autor: organizar a produção de conhecimento filosófico e científico na sua época (Soares, 2019).

Bacon, assim como Galileu, ignorou evidências dos ciclos das marés e o papel da Lua na elaboração de sua teoria. Bacon acreditava que o movimento das marés era semelhante ao movimento diurno da Terra e que as marés ocorriam como resultado da obstrução das correntes oceânicas pelos continentes. Ele não tinha explicação para as duas marés lunares observadas por dia, sugerindo que o período era determinado pelas dimensões do Atlântico em uma ressonância semelhante ao movimento de água que havia levado à teoria de Galileu. Essa ideia, todavia, não era nova, basta lembrarmos da contribuição de Julius Caesar Scaliger para a ideia de um mecanismo de ressonância transatlântica em relação às marés. Aiton (1954) fornece uma discussão das teorias de Bacon e Galileu e a controvérsia generalizada sobre elas na época. Por fim, Aiton (1954) fornece uma discussão sobre as teorias de Bacon e Galileu e a ampla controvérsia sobre elas na época. Ele aponta que, enquanto a teoria das marés de Galileu foi uma tentativa fracassada de provar, de uma vez por todas, a validade do sistema copernicano, a teoria de Bacon foi, em última análise, uma tentativa fracassada de fornecer evidências conclusivas para a perspectiva ptolomaica (ou aristotélica) (Woodworth, 2023, p.15).

O aspecto mais notável da tentativa baconiana de explicação das marés encontra-se, sem dúvida, em sua recusa de uma correspondência estrita ou causalmente eficiente entre o movimento da Lua e o movimento de fluxo e refluxo do mar. Essa recusa de aceitar qualquer tipo de influência ou ação a distância da Lua sobre as águas marinhas é tanto mais surpreendente quando consideramos que, durante todo o século XVI, com o advento e desenvolvimento das grandes navegações marítimas, tornaram-se sempre mais frequentes as viagens e as rotas marinhas, o que permitiu a acumulação de uma significativa quantidade de observações em apoio da “doutrina lunar”, isto é, de uma vinculação, certa e necessária, entre a Lua e as marés. Esses dados mostravam que as marés altas (os fluxos) não só pareciam estar ligadas à passagem da Lua pelo meridiano local, mas também mostravam um atraso diário equivalente àquele pelo qual a Lua passa pelo meridiano (cf. Mariconda, 2004, p, 798, nota 10). A "doutrina lunar" é uma referência a Francesco Patrizi, que, no *Nova filosofia do universo* (1591), obra que serve de fonte para Bacon, desenvolve uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam (cf. Rossi, 1989; Rees, 1996b).

O século XVII foi um período importante na história da compreensão das marés. Embora alguns autores antes desse período já tivessem identificado a relação da Lua com o movimento das águas, foi só nesse século que as causas mecânicas começaram a ser compreendidas. Nesse período, houve um claro domínio das teorias mecanicistas, como as de Francis Bacon, Galileu Galilei, René Descartes e Isaac Newton. As marés podem ser consideradas um exemplo típico do avanço da visão mecanicista do mundo durante a primeira metade do século XVII (Mariconda, 2011, p.845). O astrônomo e físico, **Galileu Galilei (1564 - 1642)**, em particular, posicionou-se contra as evidências e negou a ação da Lua e do Sol sobre as marés. Com base em Mariconda (2011, p.788), percebe-se que a teoria das marés de Galileu foi discutida na literatura muito mais extensivamente do que a maioria das teorias incorretas (por exemplo, Aiton, 1954; Burstyn, 1962; Clavelin, 1996, p.478-82; Finocchiaro, 1980, p.6-24 e 74-9; Marí (galileu, 1994, "introdução", p. lxi-lxvi); McMullin, 1988a, p.35-43; Pagnini, 1935, p.296-301; Popper, 1974, p.170-80; Shea, 1992, p.224-43; Sosio, 1970, p. lxxii-lxxxvi; Soufrin, 2000). Roos (2001) comentou que “existe uma indústria acadêmica virtual sobre Galileu e as marés”. Woodworth (2023) comenta que as muitas publicações são, sem dúvida, um reflexo das consideráveis conquistas científicas de Galileu. Desde então, a teoria foi categorizada, gentilmente, como uma “ideia fascinante” como resultado da necessidade primordial de fornecer evidências para o movimento da Terra (Einstein, 1954). Caso contrário, foi descrito como “o grande erro de Galileu” (Tyson, 2002).

Sua teoria originalmente desenvolvida para explicar o período diário das marés, foi refinada e expandida para incluir os períodos mensal e anual, como se pode perceber na seguinte passagem:

**“Salviati** – Afirmo, portanto, que três são os períodos que se observam nos fluxos e refluxos das águas marinhas. O primeiro e principal é este grande e conhecidíssimo, ou seja, o diurno, segundo o qual com intervalos de algumas horas as águas sobem e baixam; e esses intervalos são no Mediterrâneo, na sua maior parte, de aproximadamente 6 em 6 horas, ou seja, durante 6 horas as águas sobem e em outras 6 horas baixam. O segundo período é mensal, e parece ter origem no movimento da Lua; não que ela introduza outros movimentos, mas somente altera a grandeza dos já mencionados, com notável diferença conforme seja cheia, nova ou esteja em quadratura com o Sol. O terceiro período é anual, e mostra depender do Sol,

alterando tão somente os movimentos diurnos, ao fazê-los, nos solstícios, diferentes quanto à grandeza do que são nos equinócios.” (Mariconda, 2011, p.495).

O Diálogos sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano é um livro de Galileu Galilei publicado em 1632, de cujo trecho anterior foi retirado, e que representa um importante marco na história da ciência. Nele, Galileu utiliza a forma de diálogo entre três personagens para discutir os sistemas astronômicos ptolomaico e copernicano e defender suas teorias sobre a mobilidade terrestre e o sistema heliocêntrico. As três personagens do livro, Salviati, Simplicio e Sagredo, representam diferentes perspectivas e posturas em relação às teorias astronômicas. Salviati representa Galileu e é defensor das teorias copernicanas, Simplicio é um defensor das ideias aristotélicas e Sagredo é uma personagem imparcial e equilibrada. As homenagens a Filippo Salviati, Simplicio de Cilícia e Giovanfrancesco Sagredo<sup>84</sup>, respectivamente, destacam a importância dessas pessoas na vida e carreira científica de Galileu. Uma das partes mais importantes do livro é a Quarta Jornada, onde Salviati discute a relação da Lua e do Sol com as marés e apresenta uma explicação mecânica para o fenômeno. Galileu utiliza esse exemplo para justificar suas teorias heliocêntricas e da mobilidade terrestre, pois explica o fluxo e refluxo dos mares a partir dos movimentos da Terra ao redor de seu eixo e ao redor do Sol, como se lê nos seguintes trechos:

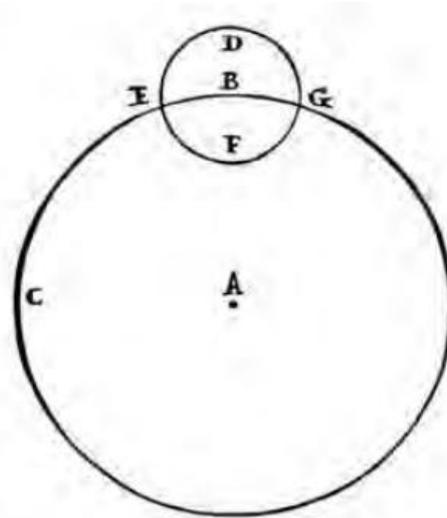
“**Salviati** - Portanto, Sr. Simplicio, já que, para fazer o fluxo e refluxo do mar, é necessário introduzir o milagre, façamos milagrosamente mover a Terra, para que com o seu movimento mova-se depois naturalmente o mar [...]” (Ibid., p.498).

“**Salviati** – [...] Dissemos que dois são os movimentos atribuídos ao globo terrestre: o primeiro anual feito com seu centro pela circunferência do orbe magno na eclíptica segundo a ordem dos signos, ou seja, de ocidente para oriente; o outro, feito pelo mesmo globo que gira em torno de seu próprio centro em vinte e quatro horas, e este igualmente de ocidente para oriente, ainda que em torno de um eixo um pouco inclinado e não equidistante àquele

---

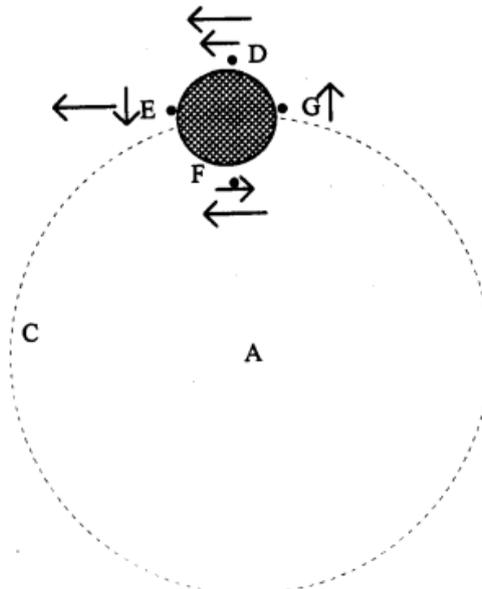
<sup>84</sup> Filippo Salviati (1582 – 1614), florentino, cuja casa, em 1611, fora usada para algumas reuniões de Galileu com outros intelectuais a fim de debater assuntos científicos. Simplicio de Cilícia (500 - 549), filósofo grego da Idade Média, profundo comentador das obras aristotélicas. Giovanfrancesco Sagredo (1571 - 1620), colega de estudos de Galileu, a quem este recorreria quando tinha necessidades financeiras.

da revolução anual. Da composição desses dois movimentos, cada um por si mesmo uniforme, afirmo que resulta um movimento disforme nas partes da Terra: o que, para que se compreenda mais facilmente, mostrarei traçando uma figura”. (Ibid., p.502-503).



**Figura 1.** Teoria das marés de Galileu. Fonte: Mariconda. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano*. 2011, p.503.

Essa figura é aproveitada por Martins (1994) com algumas observações importantes, no que segue:



**Figura 2.** Teoria galileiana das marés. Fonte: Martins. Galileu e a rotação da Terra. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 11, n. 3, p.207, 1994.

Galileu investiga a possibilidade de dar conta das marés por causas mecânicas. Apresenta então sua proposta, sob a forma de uma comparação: “Se tomarmos um recipiente com água e se ele for agitado para um lado e para o outro, a água não se manterá nivelada e horizontal, mas oscilará, subindo de um lado e descendo do outro”. Galileu utiliza como exemplo um barco navegando, mas cheio de água: “se ele for acelerado repentinamente, a água irá para trás e subirá nessa parte, descendo, pelo contrário, na proa. Se o navio for retardado ou parado bruscamente, a água subirá na proa e descerá na popa.” (Galileu *apud* Martins, 1994).

Galileu compara esse fenômeno ao que ocorre no Mediterrâneo, afirmando que as partes da Terra também se aceleram e retardam periodicamente. Martins descreve de forma traduzida e adaptada o raciocínio empregado por Galileu para defender seu argumento:

“A Terra tem dois movimentos principais, no sistema de Copérnico: em tomo de seu eixo e em tomo do Sol. A associação desses dois movimentos faz com que alguns pontos da Terra tenham maior velocidade resultante e outros uma menor velocidade, como se vê pelo diagrama acima: no ponto **D**, as velocidades de rotação e de translação se somam; em **F**, elas se subtraem. Ora, como cada parte da Terra está em certos instantes na posição **F** (ao meio-dia) e em outros instantes nas posições **G**, **D** e **E** (ao anoitecer, meia-noite e ao amanhecer, respectivamente), cada parte da Terra é sucessivamente acelerada e retardada: "(...) na associação desse movimento diário com o anual, resulta um movimento absoluto das partes da superfície terrestre, ora acelerado, ora retardado (...)" (Ibid., p.207).

Assim, infere-se que a composição dos dois movimentos (rotação e translação) produz acelerações e retardamento nos movimentos de cada parte da Terra:

“Concluamos portanto que, assim como é verdade que o movimento de todo o globo e de cada uma de suas partes seria constante e uniforme se ela tivesse um só movimento, fosse apenas o anual ou apenas o diário, é igualmente necessário que, mesclando esses dois movimentos, resultem movimentos não uniformes para as partes do globo, ora acelerados e ora retardados, mediante as adições ou subtrações da rotação diária à circulação anual.” (Ibid., p.207-208).

Assim como no barco a aceleração ou retardamento fazem oscilar a água para um lado ou para o outro, da mesma forma o movimento irregular das partes da Terra produz, segundo Galileu, as marés. Portanto, a existência das marés é, para o cientista, uma indicação empírica de que a Terra tem dois tipos de movimento (Martins, 1994).

Galileu já havia divulgado sua teoria das marés anteriormente, numa carta que enviou ao Cardeal Orsino, em 8 de janeiro de 1616. Nesta carta, ele critica várias explicações anteriores das marés, incluindo a de Marcantonio de Dominis. Conforme visto anteriormente, a ideia de uma força lunar influenciando as marés já existia há muito tempo, baseada em observações de correlação entre as fases da Lua e as marés. No entanto, Galileu não concordava com essas concepções astrológicas. No final de seu livro, Galileu critica Kepler, admirando-se de que ele,

"Salviati – [...] com seu engenho livre e agudo e conhecendo os movimentos atribuídos à Terra, tenha dado ouvidos e concordado com o domínio da Lua sobre a água, e com propriedades ocultas e outras infantilidades semelhantes" (Mariconda, 2011, p.536).<sup>85</sup>

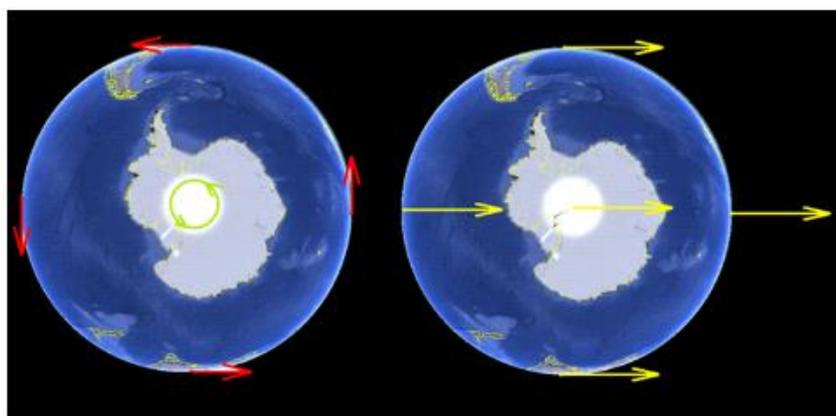
Galileu, portanto, estava convicto de que as marés eram resultado do movimento da Terra, e que as teorias antigas sobre a influência lunar eram inadequadas. Contudo, a explicação de Galileu, apresentada anteriormente, é, sem dúvida, corajosa e engenhosa, mas é inconsistente com as evidências e inadmissível de acordo com a mecânica do próprio Galileu<sup>86</sup>. Tratar-se-á aqui apenas do primeiro caso, ou seja, a inconsistências da teoria galileana das marés com as evidências. A teoria das marés de Galileu, apresenta

---

<sup>85</sup> Mariconda (2011, p.826), explica que devemos “nos manter no âmbito das razões apresentadas por Galileu nesta passagem do Diálogo, sem ajuizá-las como verdadeiras ou melhores, mas limitando-nos apenas ao seu fundo de coerência”, pois “parece evidente que, para Galileu, são inaceitáveis os próprios termos em que estão expressas as passagens de Kepler; ou seja, termos como ‘força animal’, ‘potência animal’, ‘corpo aparentado’, que estão profundamente enraizados em uma metafísica especulativa de tipo renascentista, para a qual o mundo é um imenso organismo composto por forças, poderes e entidades ocultas. Por isso, Galileu acusa Kepler respeitosamente de aderir ‘a propriedades ocultas e a semelhantes infantilidades’.” Mariconda adita que “essa crítica é compatível com as críticas movidas por Galileu ao misticismo pitagórico (Primeira Jornada, [35] e a nota 11) e à astrologia e à alquimia (Segunda Jornada, [135]-[136] e as notas 11 e 13).” Por fim, Mariconda nos provoca a entender o juízo retrospectivo de Galileu, formulado quatro anos após a morte de Kepler, na carta a Fulgenzio Micanzio de 19 de novembro de 1634: "( ... ) eu sempre estimei Kepler pelo seu engenho livre (e talvez muito) e agudo, mas o meu filosofar é diferentíssimo do seu; e pode acontecer que, escrevendo sobre as mesma matérias, e particularmente acerca dos movimentos celestes, tenhamos por vezes chegado a algum conceito similar, se bem que poucos, de modo que tenhamos atribuído a algum efeito verdadeiro a mesma razão verdadeira; mas isso não se verificará em um por cento de meus pensamentos" (Mariconda, 2011, p. 826).

<sup>86</sup> Martins (1994) explora mais sobre esse aspecto.

somente uma maré alta e uma baixa ao longo de um dia, mas já era bem sabido à época que ocorrem duas marés altas e duas baixas por dia. A teoria, portanto, falhou em dois pontos principais, como havia sido apontado a Galileu por Kepler. Galileu deixou esses problemas de lado. Cartwright (1999) explicou que Galileu não estava convencido da evidência de duas marés por dia (lunar) na maioria dos locais, ignorando assim as descobertas de Possidônio e outros, e em vez disso poderia ter sido influenciado pela maré em Veneza tendo um forte componente diurna. Polli (1952) lista as amplitudes dos constituintes  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  e  $O_1$  na Ponta della Salute como 23, 13, 16 e 5 cm, dando um fator de forma para a maré de Veneza de 0,58, o que implica um regime de maré “*mista, principalmente semidiurno*”<sup>87</sup> (Pugh; Woodworth, 2014). Continuando a explicação dos erros cometidos por Galileu em sua teoria, a maré alta deveria corresponder a uma hora fixa do dia, pois depende da posição do ponto considerado em relação ao Sol, e, no entanto, observa-se que seu horário varia, conforme se pode ver a nas figuras 3 e 4:

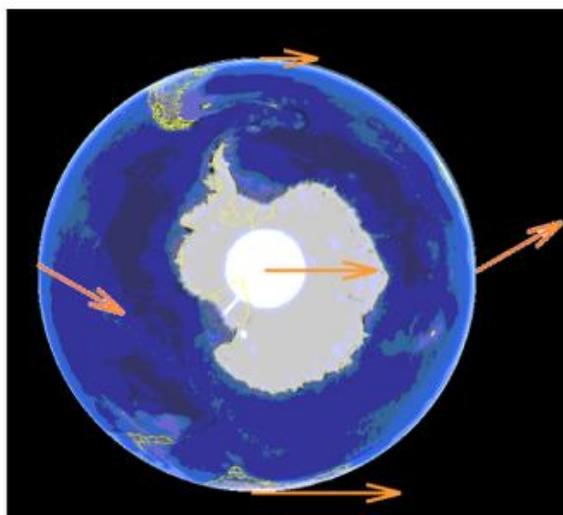


**Figura 3.** Devido ao movimento de rotação e de translação da Terra pontos diferentes do planeta apresentam diferentes velocidades lineares. Fonte:

<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=galileu-e-a-teoria-de-mares-uma-mare-alta-por-dia>. Acesso em: 30/03/2023.

---

<sup>87</sup> Isso significa que se trata de uma mistura de marés de alta e baixa duas vezes por dia, mas com uma pequena influência de marés de uma vez por dia.



**Figura 4.** A soma vetorial das velocidades em cada ponto da Terra resulta em velocidades com diferentes valores e orientações. Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=galileu-e-a-teoria-de-mares-uma-mare-alta-por-dia>. Acesso em: 30/03/2023.

Galileu observou que as águas dos oceanos apresentavam uma velocidade variável devido à superposição de dois movimentos, resultando em uma agitação semelhante ao movimento de água em uma bacia que é chacoalhada. Ele concluiu que esse movimento causaria uma maré alta e uma maré baixa a cada 24 h em cada ponto da Terra. O raciocínio galileano envolvendo as figuras anteriores não é correto, pois a aceleração que resulta do movimento de rotação com o movimento de translação é uma aceleração radial ou centrípeta.

Em contrarresposta a isso, Galileu (ou Salviati) diz o seguinte:

“**Salviati** – [...] Mas como os acidentes particulares, que se observam em lugares e tempos diferentes, são múltiplos e variados, é necessário que eles dependam de outras causas concomitantes diferentes, ainda que todas devam ter conexão com a primária; por isso se faz mister propor e examinar todos os diversos acidentes que possam ser causas desses diversos efeitos”. (Mariconda, 2011, p.504).

Pode se perceber, pois, que seu modelo é razoavelmente complexo, envolvendo, na verdade, duas causas: uma causa *primária*, correspondente à aceleração e retardamento das partes da Terra e que depende da composição dos dois movimentos anual e diurno da Terra, causa esta apresentada e explicada anteriormente; e uma causa

*secundária* (concomitantes), que reside na própria gravidade da água, a qual, tendo recebido o impulso que lhe é comunicado pelo recipiente, procura conduzi-la ao equilíbrio com alternâncias sucessivas (Mariconda, 1999, p. 48).

Bacon<sup>88</sup> talvez tenha feito uma das principais críticas a causa primária do modelo galileano (cf. Bacon, 1973, II, § 46) afirmando que o fluxo e refluxo não deveria se produzir mais que uma vez por dia, porque, obviamente, isso se demonstra contrariamente às evidências empíricas como já explicado também. Só que a resposta de Galileu consiste em afirmar que o período diário não depende apenas da causa primária, mas também da secundária, a qual está ligada, basicamente, às condições locais em que se realiza a propagação da “onda” produzida pela causa primária: tipo de costa marinha, tamanho e orientação do recipiente, profundidade do recipiente, etc. Galileu continua dizendo que isso tudo altera de tal modo o intervalo de 12 h entre os impulsos primários que o período diário dos fluxos e refluxos se reduz a 6 h, em média.<sup>89</sup>

Galileu ainda elabora uma explicação para o período mensal das marés. O problema consiste em encontrar uma causa de disformidade, com o período mensal, na disformidade cotidiana da Terra (aceleração ou retardamento). Para isso, Galileu utiliza uma analogia, baseada no princípio de correspondência entre o tempo de revolução de um planeta e o tamanho de sua órbita, que havia sido originalmente introduzido, em [144]-[145] da Segunda Jornada, no contexto da discussão a favor da rotação diurna da Terra. (Mariconda, 1999, 2004 e 2011) Em [474], segundo esse princípio, Galileu expressa:

“**Salviati** - [...] uma coisa verdadeira, natural e mesmo necessária, um mesmo móvel, que é girado por uma mesma virtude motriz, efetua seu percurso

---

<sup>88</sup> Trataremos de sua teoria das marés mais para frente.

<sup>89</sup> Para alguns intérpretes, a resposta de Galileu é evasiva e o acusam de má-fé. Para Mariconda (2011), Galileu esforça-se para tratar o fenômeno das marés em toda sua complexidade e considerando sua componente dinâmica para a explicação do período diário, tratada no conjunto das causas secundárias. Como lembra Mariconda e ainda se verá aqui na dissertação, essa componente dinâmica das marés terá um lugar bastante secundário na teoria de Descartes e desaparecerá da teoria de Newton, em que ambas as teorias tratarão essencialmente das condições estáticas do fenômeno com base em modelos simplificados e que eliminam as condições locais particulares. Um estudo recente mostra que as amplitudes de marés em muitos locais estão mudando consideravelmente devido a fatores não astronômicos. Vide: Haigh et al. The tides they are a-Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. e2018RG000636, 2020.

por um círculo maior num tempo mais longo que por um círculo menor.”  
(Ibid., p.524)<sup>90</sup>

No contexto da explicação das marés, o princípio será apoiado por dois exemplos a fim de estabelecer uma analogia entre o movimento do sistema Terra-Lua em torno do Sol: (i) o mecanismo de regulação do tempo nos grandes relógios a engrenagens e (ii) as oscilações do pêndulo.

Quanto ao primeiro exemplo, diz Galileu em [474]-[475]:

**"Salviati** – [...] Nos relógios de rodas, e particularmente nos grandes, para regular o tempo, os seus artífices instalam uma certa haste que gira horizontalmente e às suas extremidades adaptam dois pesos de chumbo; e, quando o tempo seja muito lento, basta aproximar um pouco os mencionados pesos ao centro da haste, tornando as suas vibrações mais frequentes; e, ao contrário, para retardá-lo, basta afastar os mesmos pesos em direção às extremidades, porque desse modo as vibrações se fazem mais lentas e, conseqüentemente, alongam-se os intervalos das horas. Aqui a virtude motriz é a mesma, ou seja, o contrapeso, os móveis são os mesmos pesos de chumbo, e suas vibrações são mais frequentes, quando estão mais perto do centro, ou seja, quando se movem por círculos menores" (Ibid., p.849 – **grifo nosso**).

Mariconda (2011) percebe que Galileu metaforiza o sistema planetário a uma máquina – o relógio (cf. Daumas, 1964, v.2. p.287-310; especialmente, p.296). No entanto, não se trata apenas de uma metáfora, mas, antes, uma referência das marés a um mecanismo subjacente.

Já no segundo exemplo, Galileu aprofunda a analogia, comparando o movimento do sistema Terra-Lua em torno do Sol ao movimento pendular. Nessa comparação, ele destaca que, da mesma forma que um objeto que se move em círculos menores realiza suas revoluções mais rapidamente, um mesmo peso, suspenso por cordas de comprimentos diferentes, realiza suas oscilações mais rapidamente quanto menor for a corda que o suspende. Essa analogia é importante para compreender como a variação da

---

<sup>90</sup> Esse princípio já havia sido confirmado, no contexto da discussão sobre o heliocentrismo das revoluções planetárias realizada na Terceira Jornada em [349]-[354], para a ordenação copernicana dos planetas no sistema solar, pois Saturno, cujo orbe é o maior, faz sua revolução em torno do Sol em 30 anos; Júpiter, em 12 anos; Marte, em 2 anos; a Terra, em 1 ano; Vênus, em 9 meses e Mercúrio, em 80 dias. O mesmo princípio é também confirmado pelas observações telescópicas do período de revolução das luas de Júpiter, pois, quanto mais próximo o planeta está de Júpiter, ou seja, quanto menor a sua órbita, menor é o tempo de sua revolução. (Mariconda, 2011, p. 849).

distância entre a Terra e a Lua afeta o movimento do sistema e, conseqüentemente, as marés (Mariconda, 2011, p.849).

Tendo consolidado a analogia entre o movimento do sistema Terra-Lua em torno do Sol e o movimento pendular, Galileu propõe sua explicação para o período mensal das marés. Essa explicação se baseia na hipótese de que a Terra apresenta uma desigualdade no movimento anual, cujo mecanismo seria o seguinte: enquanto a Terra mantém uma distância constante do Sol, a distância da Lua em relação ao Sol varia constantemente ao longo do mês, alcançando sua menor distância durante a Lua Nova e a maior distância durante a Lua Cheia. Conseqüentemente, o centro do sistema Terra-Lua fica mais próximo do Sol durante a Lua Nova do que durante a Lua Cheia. De acordo com a analogia do movimento pendular, isso significa que o movimento anual da Terra sofre variações mensais, acelerando-se durante a Lua Nova e retardando-se durante a Lua Cheia. Assim, a Lua atua como uma espécie de contrapeso, cuja posição é capaz de alterar a velocidade do sistema Terra-Lua em seu deslocamento em torno do Sol. Essa alteração de velocidade é responsável pelo período mensal das marés (Mariconda, 2011, p.848-852).

Galileu usou a analogia da mudança nos períodos dos pêndulos para explicar as variações da amplitude das marés. Ele considerou o Sol como o ponto de suspensão de um pêndulo, e a Terra e a Lua como pesos suspensos. Quando estamos na Lua Cheia, a ordem dos astros (Sol - Terra - Lua) faz com que o “pêndulo astronômico”<sup>91</sup> tenha um comprimento maior, logo um período maior, fazendo a Terra se mover mais lentamente em sua trajetória. Já na fase de Lua Nova, a ordem dos astros (Sol - Lua - Terra) torna o comprimento do pêndulo menor, diminuindo o período e fazendo a Terra se mover mais rápido ao redor do Sol. A variação da velocidade da Terra ao longo do mês, consequência dessas mudanças, ocasiona variações nas acelerações e desacelerações dos pontos na superfície da Terra, resultando em acúmulos de magnitudes diferentes de água (Soares, 2019). O trecho a seguir apresenta a explicação de Galileu:

“**Salviati** – [...] Mas voltando ao nosso primeiro propósito, onde estávamos expondo como nos corpos movidos circularmente por uma virtude motriz, que se conserva constantemente a mesma, os tempos das circulações eram prefixados e determinados, e impossíveis de serem alongados ou abreviados, tendo dado exemplos e apresentado experiências sensíveis e

---

<sup>91</sup> Este termo não foi usado por Galileu, e foi utilizado por Soares (2019) apenas para fins didáticos.

factíveis, podemos confirmar agora a mesma verdade com as experiências dos movimentos celestes dos planetas, nos quais se observa que se mantém a mesma regra: que aqueles que se movem por círculos maiores gastam mais tempo para percorrê-los. Podemos observar isso muito facilmente nos planetas mediceus, que em pouco tempo fazem suas revoluções em torno de Júpiter. De modo que não se deve pôr em dúvida, antes podemos ter como certo e seguro, que, quando, por exemplo, a Lua, continuando a ser movida pela mesma faculdade movente, fosse levada pouco a pouco por círculos menores, ela adquiriria uma disposição a abreviar os tempos dos seus períodos, tal como aquele pêndulo do qual, no curso de suas vibrações, encurtávamos a corda, ou seja, diminuíamos o semidiâmetro das circunferências por ele percorridas. Sabei agora que o que acabo de dizer, tomando a Lua como exemplo, acontece e verifica-se essencialmente de fato. Relembremo-nos de já termos concluído, juntamente com Copérnico, que não é possível separar a Lua da Terra, em torno da qual, [478] sem controvérsia, move-se em um mês: recordemo-nos igualmente que o globo terrestre, sempre acompanhado pela Lua, vai pela circunferência do orbe magno em torno do Sol em um ano, tempo durante o qual a Lua gira em torno da Terra quase 13 vezes; dessa circulação segue-se que a Lua ora se encontra próxima do Sol, ou seja, quando está entre o Sol e a Terra, ora bastante mais afastada, que é quando a Terra fica entre a Lua e o Sol: em suma, próxima, no tempo de sua conjunção e novilúnio; afastada, no plenilúnio e oposição; e a diferença entre o máximo afastamento e a máxima proximidade é igual ao diâmetro do orbe lunar. Ora, se é verdade que a virtude que move a Terra e a Lua em torno do Sol conserva sempre o mesmo vigor; e se é verdade que o mesmo móvel, movido pela mesma virtude, mas por círculos desiguais, percorre em tempos menores arcos similares aos círculos menores; devemos necessariamente afirmar que a Lua, quando está a uma distância menor do Sol, ou seja, no tempo da conjunção, percorre arcos maiores do orbe magno, que quando está num afastamento maior, ou seja, na oposição e plenilúnio: e é igualmente necessário que a Terra participe dessa desigualdade lunar. Pois, se imaginarmos uma linha reta traçada do centro do Sol pelo centro do globo terrestre e prolongada até o orbe lunar, esta linha será o semidiâmetro do orbe magno, no qual a Terra, quando estivesse só, mover-se-ia uniformemente; mas se no mesmo semidiâmetro colocamos um outro corpo a ser conduzido, colocando-o às vezes entre a Terra e o Sol, e outras vezes para além da Terra num afastamento maior do Sol, é preciso que, neste segundo caso, o movimento comum de ambos segundo a circunferência do orbe magno, devido ao afastamento da Lua, resulte um tanto mais lento que no outro caso, quando a Lua está entre a Terra e o Sol, ou seja, a uma distância menor: de modo que neste caso acontece exatamente o que acontece com o

tempo do relógio, se nos representarmos que a Lua é aquele pedaço de chumbo que se adapta ora mais afastado do centro, para diminuir a frequência das vibrações da haste, e ora mais próximo, para torná-las mais frequentes. Pode-se assim deixar evidente que o movimento anual da Terra pelo orbe magno e sob a eclíptica não é uniforme, e que a sua disformidade deriva da Lua e tem os seus períodos e restituições mensais. E como se tinha concluído que as alterações periódicas, mensais e anuais, dos fluxos e refluxos não podiam derivar de [479] outra causa além da alteração da proporção entre o movimento anual e os acréscimos e subtrações da rotação diurna; e tal alteração podia fazer-se de dois modos, a saber, alterando o movimento anual e mantendo constante a quantidade dos acréscimos, ou mudando a grandeza destes e mantendo a uniformidade do movimento anual; acabamos de encontrar o primeiro destes dois modos, fundado sobre a disformidade do movimento anual dependente da Lua, e que tem os seus períodos mensais: é, portanto, necessário que, por essa causa, os fluxos e refluxos tenham um período mensal, durante o qual se fazem maiores ou menores. Vedes agora como a causa do período mensal reside no movimento anual, e vedes ao mesmo tempo o que a Lua tem a ver com isso, e como ela faz sua parte sem ter nada a ver com os mares nem com as águas.” (Mariconda, 2011, p.527-528 – **grifo nosso**).

Mariconda (Diálogo, 2011, p.816) concorda com Pagnini (Galileu, 1935, v.3, p.277) que a comparação usada por Galileu sugere que, para este, a duração das revoluções dos planetas seguia as leis do pêndulo, ou seja, que assim como para os pêndulos os quadrados dos tempos dos períodos são proporcionais aos comprimentos, assim também para os planetas os quadrados dos tempos de revoluções seriam proporcionais às distâncias do Sol. Evidentemente a questão é mais complexa, pois Galileu pensa em Júpiter com seus satélites e na Terra com a Lua como constituindo sistemas pendulares em que os satélites – as estrelas mediceias para Júpiter e a Lua para a Terra – ora encurtam a distância do sistema ao Sol, ora a encompridam. Nada é dito dos planetas que não possuem satélites. De qualquer modo, Pagnini sugere que, se esta interpretação puder ser sustentada,

“este poderia ser outro argumento que explica a tenacidade de Galileu em não aceitar as leis keplerianas em manifesto contraste com esta suposição galileana falsa: de fato, a terceira lei de Kepler diz que os quadrados dos

tempos são proporcionais aos cubos dos grandes eixos” (Mariconda, 2011, p.816).<sup>92</sup>

O modelo proposto por Galileu para explicar o período mensal das marés é interessante do ponto de vista teórico, embora enfrente dificuldades empíricas. Mesmo com as marés de novilúnio (Lua Nova) e plenilúnio (Lua Cheia) apresentando pouca diferença, a ideia central da analogia é relevante: a Terra e a Lua são pesos ligados de alguma forma ao Sol. Embora exista uma diferença entre os exemplos do mecanismo de regulação do relógio e do pêndulo, onde há uma ligação material rígida, e o sistema Terra-Lua-Sol, cuja ligação é gravitacional, a analogia se revela significativa, uma vez que as diferentes posições da Lua em seu movimento exercem influência no movimento da Terra. É importante notar, no entanto, que Galileu não extraiu consequências dinâmicas do modelo, limitando-se apenas às variações de velocidade.

A explicação de Galileu para o período anual das marés, apesar de manter a unidade da teoria, é igualmente refutada pela observação empírica. Explicando de forma simplificada, seu modelo, baseado na variação da inclinação do eixo terrestre em relação à eclíptica (plano do orbe magno), prevê que as marés sejam maiores nos solstícios e menores nos equinócios. Porém, a observação mostra exatamente o oposto. Ainda assim, a ideia central de Galileu de que a causa das marés deve estar na composição dos movimentos diurno e anual é correta e pavimentou o caminho para as teorias futuras. O mecanismo é descrito de [482] a [485], a saber:

"considerando o plano da eclíptica, o equador terrestre o interceptará segundo uma elipse. Ora, a tangente ao orbe magno, que passa pelo centro da Terra, será interceptada em dois pontos pela projeção do equador terrestre; o comprimento do segmento resultante será diferente segundo a Terra se encontre nos solstícios ou nos equinócios; isso significa que, nos vários períodos do ano, haverá uma mudança na relação entre a velocidade do movimento diurno e a velocidade do movimento anual; donde a periodicidade anual do fenômeno" (Sosio, 1970, p. lxxxv).

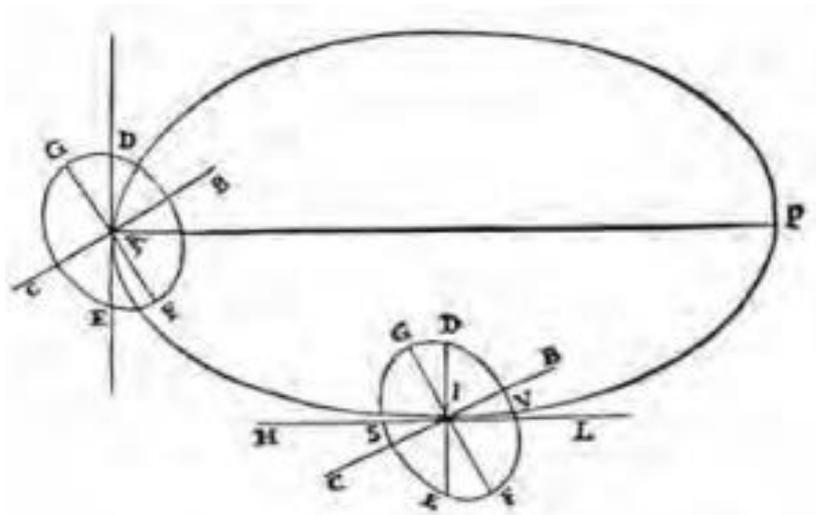
De acordo com isso, as marés deveriam ser maiores nos solstícios, quando os dois movimentos, anual e diurno, estão na mesma linha, de modo que sua combinação

---

<sup>92</sup> Para mais informações sobre a relação entre Galileu e Kepler, consulte a nota 79, e para uma notícia bibliográfica sobre Kepler, consulte a nota 207 da Segunda Jornada (Mariconda, 2011).

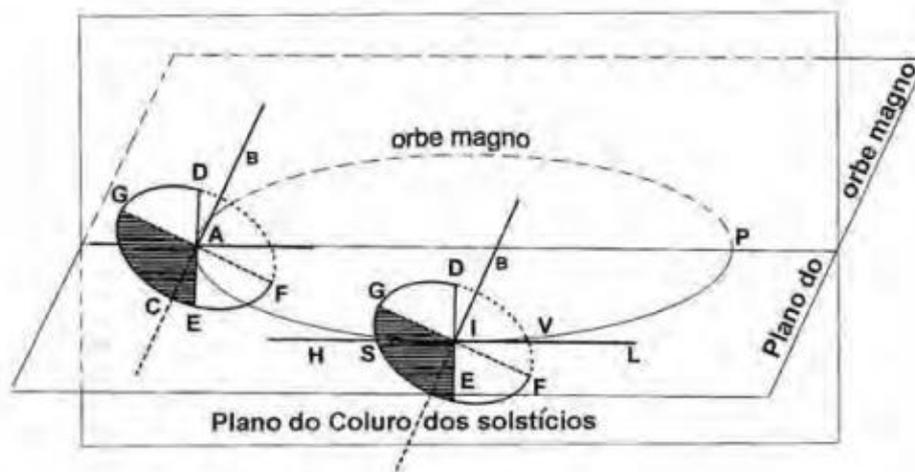
produziria a máxima aceleração e retardamento, do que nos equinócios, quando os dois movimentos estão em seu ângulo máximo de inclinação e o efeito de sua combinação é mínimo. De fato, Galileu extrai essa consequência que, entretanto, é contrária à observação que mostra as marés serem máximas nos equinócios e mínimas nos solstícios (Mariconda, 2011, p.850-851). Como mostraria Newton no *Principia*, Livro III, Proposição 24, recebem nesse momento os efeitos máximos da atração gravitacional do Sol. Como assinala Shea (Shea, 1992, p.239), o fato de que as marés são máximas nos equinócios era conhecido por Bacon e Riccioli, que criticam duramente a teoria de Galileu por essa inconsistência com os dados da observação (Mariconda, 2011, p.820, cf. Bacon, 2007).

Galileu até apresenta uma figura (figura 5) para esclarecer sua explicação:



**Figura 5.** Explicação de Galileu para o período anual das marés. Fonte: Mariconda, 2011, p.532.

Na figura 6, porém, podemos estudá-la melhor, pois Pagnini a aperfeiçoa (Galileu, 1935, v.3, p.285):



**Figura 6.** Pagnini aperfeiçoa o desenho para a explicação de Galileu para o período anual das marés. Fonte: Mariconda, 2011, p.820.

Como se descreve na nota 150 da Terceira Jornada, trata-se da projeção dos planos dos meridianos perpendiculares entre si. O coluro<sup>93</sup> dos solstícios passa pelos polos e pelos solstícios; o coluro dos equinócios passa pelos polos e pelos equinócios.

Mariconda (2011) aponta que a teoria das marés de Galileu apresenta um desafio metodológico que não deve ser subestimado. Embora a teoria não se adeque completamente aos dados empíricos, isso não significa que Galileu tenha negligenciado a observação em sua abordagem. Pelo contrário, os problemas de adequação empírica surgem em grande parte porque Galileu considera o fenômeno das marés em toda a sua complexidade, o que torna o ajuste da teoria aos dados bastante fluido. No entanto, a racionalidade da teoria de Galileu não pode ser limitada à exigência de que ela se ajuste aos dados empíricos. Existem outras razões importantes que intervêm na construção de seu modelo explicativo. Uma delas é a recusa teórica, e até mesmo metafísica, de qualquer influência externa, não mecânica, no "sistema da Terra". Galileu rejeita a ideia de uma influência da Lua sobre as marés, que era amplamente aceita em sua época. Essa recusa é metafísica porque a tese da influência lunar é considerada astrológica e afastada juntamente com todas as categorias qualitativas da filosofia natural renascentista, pois representa uma explicação que se baseia em uma causa oculta. A

<sup>93</sup> No *Trattato della sfera* (Tratado da esfera), Galileu define da seguinte maneira os coluros: "São imaginados sobre a esfera dois outros círculos máximos, os quais se cortam sobre os polos do plano equatorial em ângulos retos: um deles passa pelos pontos dos equinócios, o outro pelos solstícios; do que se segue a denominação de coluro dos solstícios para este e coluro dos equinócios para aquele. (. . .) Em suma, não se trata de nada mais que de dois meridianos" (EN, 2. p.232). Obviamente, os coluros dividem a esfera celeste em quatro partes iguais.

recusa da tese da influência lunar também conduz Galileu a um tratamento estritamente mecanicista das marés. Como bem o expressa Popper, Galileu

"trabalhava com um princípio de conservação do movimento para os movimentos rotacionais e isso parecia excluir as influências interplanetárias. Sem a tentativa de Galileu de explicar as marés nessa base bastante estrita, jamais poderíamos ter constatado que a base era muito estrita." (Popper, 1974, p.173-4).

A segunda razão é a ideia de que as marés são sempre ocasionadas por uma mesma causa, assimilável a um mecanismo subjacente de composição dos movimentos anual e diurno da Terra. Essa ideia é responsável pela unidade da representação teórica do modelo de Galileu. Dito de outra maneira, essa segunda razão é como uma forma de organizar as ideias da teoria de Galileu sobre as marés. Ele acreditava que a causa das marés era sempre a mesma, e que essa causa estava relacionada à maneira como a Terra se movia. Ele achava que a combinação dos movimentos anual e diário da Terra era a causa das marés. Essa ideia ajudou a manter uma explicação coerente sobre as marés em todos os períodos, o que tornou a teoria de Galileu mais fácil de entender e aceitar. Dessa forma, o valor e a racionalidade da teoria galileana das marés transcendem o confronto exclusivo com as observações. Galileu se baseia em princípios teóricos que vão além da simples adequação empírica e que levam em conta a complexidade do fenômeno estudado. A rejeição de influências externas e a busca por uma unidade teórica na explicação das marés são características fundamentais da abordagem galileana (Mariconda, 2011, p.851).

**René Descartes (1596 - 1650)**, difere das teorias baconiana e galileana em relação ao papel da Lua na produção das marés. Enquanto Bacon não atribui nenhum papel à Lua e Galileu considera seu papel bastante secundário, Descartes dá à Lua um papel central em sua explicação, afirmando que as marés são exclusivamente devidas à sua ação (Mariconda, 2011, p.851). A teoria cartesiana é apresentada originalmente no capítulo XII de *Le Monde ou Traité de la Lumière* (O Mundo ou Tratado da Luz), que nunca foi publicado devido à condenação de Galileu em 1633<sup>94</sup>. No entanto, uma

---

<sup>94</sup> A história dos processos e da condenação de Galileu pelo Tribunal do Santo Ofício ilustra como a separação das evidências empíricas das interpretações das sagradas escrituras defendida por Galileu não se dava. O reconhecimento da importância científica das teses de Galileu pela Igreja Católica, somente se deu no 350º aniversário da sua morte, em 31 de outubro de 1992. Isto aconteceu no bojo de uma decisão do Papa Wojtyla (João Paulo II), definindo as condições de diálogo entre a fé e o mundo contemporâneo e

explicação essencialmente igual pode ser encontrada em *Les Principes de la Philosophie* (Os Princípios da Filosofia), Parte IV, seções 49 a 56, publicado originalmente em latim em 1644. Essa diferença nas teorias reflete as concepções filosóficas de cada autor e suas respectivas visões sobre o papel da Lua e dos corpos celestes na produção dos fenômenos naturais. A teoria cartesiana das marés é um exemplo notável de como a concepção filosófica de um autor pode influenciar sua compreensão de fenômenos naturais. Sua teoria se apoia na sua concepção da matéria, que é entendida como uma "substância extensa em comprimento, largura e profundidade", isto é, "sua natureza consiste apenas em que ela é uma substância que tem extensão" (AT, 9, parte 2. seção 4, p.65), não existindo vazio em sua concepção de universo, contrariando, assim, os atomistas, que defendiam que as marés eram causadas pela atração da Lua ao vazio deixado pela água. Em vez disso, Descartes defende uma concepção plenista do universo, em que a matéria é contínua e preenche todo o espaço (Mariconda, 2011, p.852). Quanto ao movimento, Descartes concebe que ele existe apenas por contato, sendo governado pelas leis do choque entre corpos materiais. Isso também é fundamental para a sua explicação das marés, pois ele entende que o movimento da Lua, em seu giro ao redor da Terra, cria ondas na matéria que compõe o oceano, que então produzem as marés.

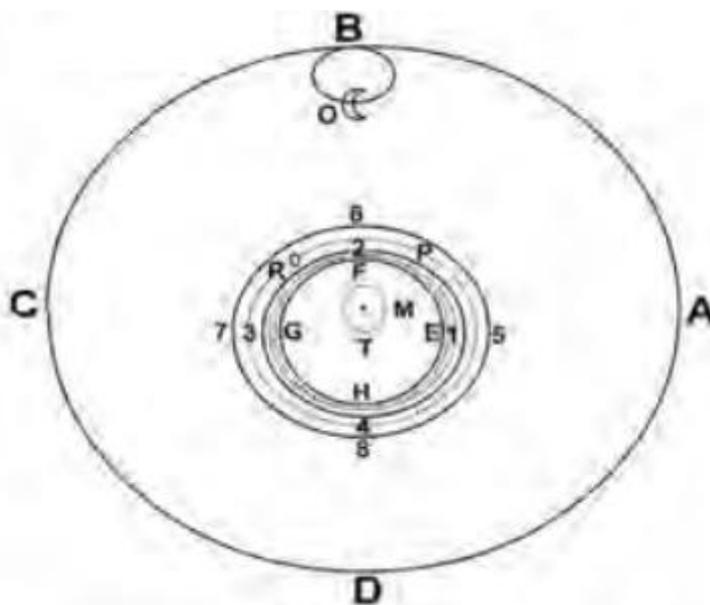
O mundo cartesiano é construído a partir de uma base conceitual que envolve os conceitos de matéria e movimento. Nesse mundo, o Sol ocupa o centro do sistema, e cada astro está contido em seu próprio céu particular. Esses céus são preenchidos completamente por matéria, que liga os astros mecanicamente através de movimentos causados apenas pelo contato entre os corpos. A Lua gira em torno da Terra dentro de seu próprio céu, movimentando-se juntamente com a matéria do céu que a envolve. É essa matéria do céu que carrega os astros com seu movimento circular, conhecidos como os turbilhões ou vórtices cartesianos. Para Descartes, essa teoria das marés está estreitamente ligada a essa concepção de matéria e movimento, que é uma parte fundamental do sistema filosófico e científico que ele construiu (Mariconda, 2011, p.852).

No que segue, ver-se-á que a teoria cartesiana está em conformidade com a ocorrência das duas marés altas e duas baixas por dia, e dá conta de explicar os

---

encaminhando os preparativos para o Jubileu de 2000, que foi antecedido de um grande ato de penitência da parte da Igreja Católica, com pedidos de perdão por sua omissão no caso do holocausto e da repressão política na América Latina. (Baiardi; dos Santos; Rodrigues. *Processos cavilosos, sentença vingativa e abjura humilhante: o caso Galileu*. **Cadernos de História da Ciência**, v. 8, n. 2, p.190, 2012).

intervalos entre as duas marés consecutivas<sup>95</sup>, embora ela não esteja de acordo com o posicionamento da Lua em relação ao estado da maré (alta ou baixa) em determinada região. A figura de Descartes (figura 7), que representa a Terra encerrada em seu céu, acompanhada da Lua, facilita a compreensão de sua teoria das marés. Essa imagem visual ajuda a ilustrar a ideia de que a Lua, em sua órbita em torno da Terra, move-se junto com a matéria do céu que a envolve, e é essa matéria que carrega os astros com seu movimento circular - os turbilhões ou vórtices cartesianos (cf. AT, 11, cap. 11, p.74).



**Figura 7.** Teoria cartesiana das marés. Fonte: *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano*, 2011, p.852.

Na figura anterior, o círculo **ABCD** é o que ele chama de primeiro céu, o qual a Lua está compreendida; o círculo que delimita o céu da Terra, ou seja, o vórtice em torno da Terra **EFGH**. O círculo mais achatado **5.6.7.8** representa o ar (ou a atmosfera); mais internamente está a Terra que está envolta pelo mar, representado pelo círculo **1.2.3.4**; por dentro da figura que representa a Terra, têm os pontos **EFGH** representando a superfície dela, além dos pontos **T** e **M**, que representam, respectivamente, o centro do planeta e o turbilhão sobre a superfície terrestre. Descartes insiste que a matéria do céu preenche não apenas todo o espaço que está entre os círculos **ABCD** e **5.6.7.8**, mas ainda “todos os pequenos intervalos que estão abaixo entre as partes do ar, da água e da Terra” (cf. AT, 11, cap. 11, p.74-75), de modo que toda a região **ABCD** constitui um

<sup>95</sup> Descartes explica de forma bem segura e didática o porquê de o real período entre duas marés altas consecutivas ser de 12 h 24 min (Soares, 2019).

*plenum* de matéria, onde não existem nem os grandes vazios entre os corpos celestes, nem os pequenos vazios intracorporais (Galileu *apud* Mariconda, 1999).

Segundo Descartes, na situação da figura, os pontos **2** e **4** do mar seriam de marés baixas e os pontos **1** e **3**, de marés altas. Isso porque, de acordo com ele, o ar e o mar sofrem mais pressão na direção da linha que passa pela Lua (por ação da mesma) e por isso os pontos **2** e **4** do mar teriam menor profundidade, assim como em **3** e **5** teriam maior profundidade. Sabemos hoje que nas regiões por onde a Lua “passa” ocorrem marés altas, bem como nas regiões diametralmente opostas no globo terrestre. (Soares, 2019, **grifos nossos**)<sup>96</sup>. Repete-se que o modelo cartesiano das marés explica por que existem, simultaneamente, duas marés altas em pontos diametralmente opostos e duas marés baixas nas mesmas condições. No entanto, contrariamente às evidências empíricas, sua explicação tem a consequência de que a maré alta ocorre na passagem da Lua pelo horizonte do lugar e a maré baixa ocorre na passagem da Lua pelo meridiano do lugar. Ainda assim, a explicação da periodicidade diária das marés é bem explicada por Descartes ao se considerar a rotação da Terra sobre seu próprio eixo:

“[...] considerando depois que a Terra gira, entretanto, em torno de seu centro [...] aquela parte de seu lado **F** que está agora em frente da Lua [...] deve encontrar-se em 6 horas em frente do céu marcado por **C**, onde essa água será mais alta, e em 12 horas em frente do lugar do céu **D**, onde a água será mais baixa.” (AT, 11, cap. 12, p.81-82 *apud* Mariconda, 2011, p.853 – **grifos nosso**).

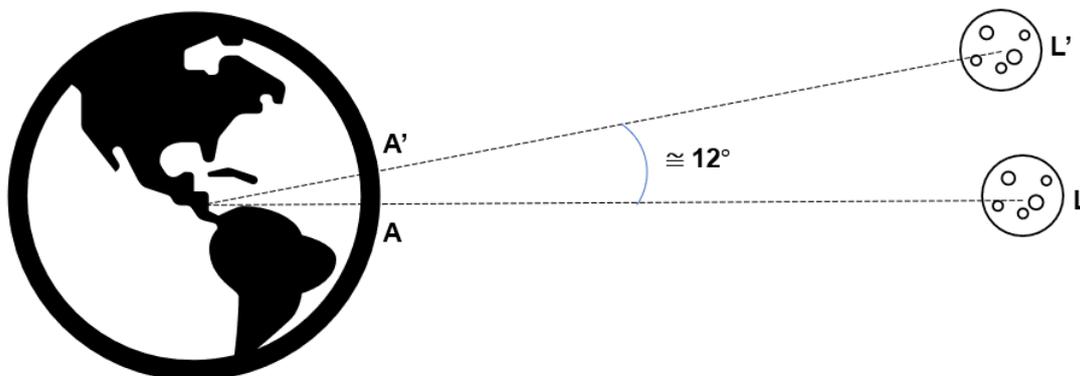
Quanto ao período mensal das marés, Descartes explica primeiro o retardamento na sucessão das marés, que ele considera ser de 12 min a cada 6 h, pelo movimento da Lua em torno da Terra:

“[...] e assim ela [Lua] faz avançar pouco a pouco para oriente os pontos **1**, **2**, **3** e **4** que marcam as marés mais altas e mais baixas, de modo que as marés não mudam precisamente de seis em seis horas, mas elas se retardam aproximadamente a quinta parte de uma hora a cada vez.” (AT, 11, cap. 12, p.82 *apud* Mariconda, 2011, p.853 – **grifos nosso**).

---

<sup>96</sup> Os grifos foram feitos por nós para dar ênfase às principais partes da explicação das causas das marés de acordo com o Descartes.

Para melhor compreensão do que acaba de ser apresentado na explicação de Descartes, segue a imagem da figura 8 em que se esquematiza o retardamento diário das marés:



**Figura 8.** Explicação de Descartes para o retardamento das marés (baseada em Mariconda, 2011). Fonte: autor, 2023.

Para compreender esse retardamento, deve-se levar em consideração o deslocamento angular da Lua a cada 24 h e o tempo necessário para que um ponto **A** sobre a superfície da Terra tenha de novo a Lua sobre seu meridiano. A distância angular percorrida pela Lua enquanto o ponto **A** realiza a revolução de 24 h é cerca de  $12^\circ$  ( $360^\circ$  em um pouco mais de 28 dias). Para que **A** tenha novamente a Lua em seu meridiano deve percorrer ainda a distância **AA'**, fazendo-o em cerca de 50 min. Como Descartes considera que o retardamento é de 12 min entre cada maré e como existem quatro marés diárias (duas altas e duas baixas), o retardamento diário vem a ser cerca de 48 min e, portanto, sua explicação para o retardamento é, em tese, correta (Mariconda, 1999).

Quanto à variação mensal na amplitude das marés, Descartes justifica pela forma oval do céu da Terra, que se estende mais em direção a **A** e **C** que em direção de **B** e **D**. Assim, quando a Lua está em **B** e **D**, sua velocidade é maior que em **C** e **A** e, conseqüentemente, as marés são proporcionalmente maiores (Mariconda, 1999).

Assim, para Descartes, a forma ovalada do céu da Terra é:

“[...] a causa de que os fluxos e refluxos do mar sejam bastante maiores, quando ela [a Lua] está em **B**, onde ela é cheia, e em **D**, onde ela é nova, que quando ela está em **A** e em **C**, onde ela é meio-cheia [quadraturas].” (AT, 11, cap. 12, p.83 *apud* Mariconda, 2011, p.854 – **grifos nosso**).

Quanto ao período anual das marés, Descartes não o menciona no *Le Monde*, mas o faz nos *Principies*, encontrando, assim, uma forma condizente com sua teoria de explicar por que nos solstícios as marés têm amplitudes maiores do que nos equinócios:

“É necessário também notar que a Lua está sempre bastante próxima do plano da eclíptica, enquanto a Terra gira sobre seu centro segundo o plano do equador, que lhe é bastante afastado, e que esses dois planos se interceptam nos lugares em que se fazem os equinócios, mas que eles são muito afastados um do outro naqueles [lugares] dos solstícios. Donde se segue que é no começo da primavera e do outono, ou seja, no tempo dos equinócios, que a Lua age mais diretamente contra a Terra e, assim, torna as marés maiores.” (AT, 9, parte 4, seção 52, p.229 *apud* Mariconda, 2011, p.854).

Como se percebe, Descartes sempre recorre exclusivamente à Lua para explicar as marés, embora momento algum ele mencione a ação conjunta do Sol. Pelos trechos acima, é possível observar que Descartes tem em mente a ideia de que a interceptação dos planos da órbita lunar e do plano equatorial terrestres explica esta questão, mas neste caso ele ignora que o Sol esteja atuando como agente causador das marés também. (Soares, 2019 – **grifos nossos**).

O texto fala sobre a explicação das marés com base no modelo simplificado de que a Terra é inteiramente coberta por água. Descartes acrescentou a consideração das condições locais, como a diferente situação das costas do mar e os ventos. Contudo, enquanto as condições locais são sumariamente introduzidas no *Le monde*, que se limita a afirmar laconicamente que as outras particularidades do fluxo e do refluxo

"dependem em parte da diferente situação das costas do mar e, em parte, dos ventos que reinam nos tempos e nos lugares em que são observados" (AT, 11, cap. 12, p.83 *apud* Mariconda, 2011, p.854),

seu tratamento é expandido nos *Principes*, onde descreve com maior detalhe o mecanismo que produz as "diferenças particulares dos fluxos e refluxos" (Mariconda, 2011, p. 854).

Ele descreveu que nas sizíguas, as águas que estão no meio do oceano são mais infladas às seis horas da tarde e da manhã, enquanto as águas das bordas são menos infladas ao meio-dia ou à meia-noite. Isso faz com que as águas do meio escorram para as bordas (fluxo) e as águas das bordas escorram para o meio (refluxo). Partindo, então,

dessa consequência geral de sua teoria que, como já dissemos, implica que a maré alta ocorre quando a Lua está no horizonte e a maré baixa, quando a Lua passa pelo meridiano do lugar, Descartes passa a considerar o efeito das condições locais, pois

"segundo essas costas sejam mais próximas ou mais afastadas, e que essas águas passem por caminhos mais ou menos retos e largos e profundos, elas chegam mais cedo ou mais tarde e em maior ou menor quantidade; e também, que os diferentes desvios desses caminhos, *causados pela interposição de ilhas, pelas diferentes profundidades do mar, pelo desaguamento de rios e pela irregularidade das bordas ou costas*, fazem frequentemente que as águas que vão para uma borda sejam encontradas por aquelas que vêm de uma outra, o que adianta ou retarda seus cursos de várias maneiras diferentes; e, enfim, que ela pode também ser adiantada ou retardada pelos ventos, algum dos quais sopram sempre regradamente em certos lugares, em certos tempos" (AT, 9, parte 4, seção 56, p.231 *apud* Mariconda, 2011, p.855).

Descartes também considerou o efeito das condições locais, como as causas secundárias concomitantes de Galileu, devidas à propagação da onda primária, e mesmo as causas terciárias, devidas ao regime dos ventos. Seu modelo foi influente e ensinado nas universidades inglesas do século XVII por muitos anos, mesmo após a publicação dos *Principia* de Newton, que chega à caracterização considerada correta da causa primária das marés (Mariconda, 2011, p.855).

**Nicolás Mascardi (1625 - 1673)**, padre jesuíta, missionário, cuja atuação, dentre outras, era a de realizar viagens exploratórias e de observações de fenômenos naturais, ao longo de 1650 até 1674, período em que esteve na América, entrou em contato com diversos grupos nativos, como os *Mapuches*, nas missões de *Arauco*, os *Hulliches* e os *Chonos*, em Chiloé e no Arquipélago dos *Chonos*, respectivamente, e com os *Poyas* e os *Puelches*, em *Nahuelhuapi* e arredores. Poucos são, no entanto, os trabalhos que têm se debruçado sobre os estudos de astronomia que Mascardi realizou, havendo, em razão disso, certo desconhecimento acerca das observações que fez de fenômenos como eclipses solares e lunares e, especialmente, das marés na Ilha de Chiloé (Fleck, 2014, p.106-107).<sup>97</sup>

---

<sup>97</sup> Ainda de acordo com o autor, as informações sobre estas atividades se encontram dispersas nas cartas que enviou ao Provincial da Companhia de Jesus ou nas endereçadas a companheiros da Ordem ou a cientistas leigos com os quais mantinha contato. (Dentre as poucas as obras que abordam a trajetória do jesuíta Mascardi como um homem de ciência, estão as escritas por Guillermo Furlong (1943 e 1963)).

Ao que tudo indica nos relatos históricos analisados por Fleck (2014), a geografia da região e a necessidade de atender espiritualmente os nativos nas diversas ilhas que compunham o arquipélago contribuíram para o interesse que Mascardi demonstrou ter nas marés. É interessante notar que Mascardi, apesar de ter vivenciado situações bastante distintas na Europa em relação ao que enfrentava no arquipélago, não deixou de se aprofundar nos estudos sobre as marés, buscando compreender as teorias astronômicas e comparando o fenômeno próprio da região com o que ocorria em outras ilhas. Considerando que Nicolas Mascardi dedicou-se, especificamente, ao estudo de ciências naturais entre 1640 e 1642, sob a orientação do padre Athanasius Kircher, no Colégio de Roma, acredita-se que tenha podido conhecer as publicações de Francis Bacon, Galileu Galilei e René Descartes e, até mesmo, discutir as teorias que estes homens de ciência defendiam. Dado o seu martírio em 1674, ele não pôde posicionar-se em relação à teoria da gravitação universal, formulada por Newton somente em 1687 (Fleck, 2014, p.119-120). Nas cartas que Mascardi enviou ao seu mestre em Roma, constata-se sua adesão às explicações que Nicolau Copérnico dava aos fluxos e refluxos das águas marinhas. De acordo com Furlong (1963), as cartas enviadas por Mascardi a Kircher revelariam que

“Lejos ya de Aristóteles, vibra en sus escritos el sonido de las campanas de plata de Copérnico, en concordancia con las lecciones que en Roma había recibido de uno de los más grandes geógrafos de su época, Athanasius Kircher. Por eso nos habla del sol en el solsticio de invierno y de su apogeo, y Kircher y Riccioli, ambos jesuitas y eximios matemáticos son sus autores preferidos. El postrero de ellos, es verdad, sostenía la inmovilidad de la tierra, pero no nos consta que Mascardi se ladeara a él en este punto” (Furlong, 1963, p.70).

Como se percebe, as observações de Mascardi afastam-no da teoria de Bacon, que adotava o sistema geocêntrico, e da teoria de Descartes, que possuía uma interpretação muito particular, com um céu próprio para cada planeta e uma matéria com extensão entre os astros. Mascardi se aproximava mais da proposição de influência lunar formulada por Descartes, embora também não tenha caracterizado as marés quanto a sua intensidade, como propôs Galileu. Por fim, Mascardi referiu-se à

---

Nelas, encontramos não apenas registros das observações astronômicas que realizou, mas também sua percepção sobre as explicações que os indígenas davam a certos fenômenos naturais e à origem dos astros (Fleck, 2014, p.107-108).

interferência de especificidades locais em suas observações, embora não tenha confirmado o intervalo de seis horas entre as marés diárias. É possível perceber, portanto, que Mascardi desenvolveu uma investigação minuciosa sobre as marés, levando em conta as teorias científicas da época e as particularidades da região em que vivia.

Talvez seja surpreendente, de uma perspectiva moderna, encontrar o magnetismo, em vez da gravidade, tão discutido no contexto da história das marés, e descobrir que Gilbert e depois Kepler, entre outros, foram inspirados a propor o magnetismo como um mecanismo para eles. No entanto, Fara (1996) explica como o *De Magnete*, de Gilbert, foi amplamente adotado como uma “filosofia magnética” que era uma parte central do pensamento do século XVII. Além disso, Athanasius Kircher (discutido posteriormente) era um especialista em muitos aspectos filosóficos (e aparentemente mágicos) do magnetismo, incluindo um mapa magnético do mundo (Glassie, 2012; Udías, 2020). Os escritos de Newton incluíam apenas referências passageiras ao magnetismo, e ainda assim ele estava interessado o suficiente para possuir um anel de sinete magnético montado com um poderoso *chip* de magnetita. Em um nível mais prático, no século XVIII encontramos William Hutchinson, o estivador de Liverpool, defendendo melhores ímãs em bússolas para negociar as marés (Hutchinson, 1777).

É interessante que, depois de todo esse corpo de trabalho e apenas algumas décadas antes da publicação dos *Principia* de Newton, investigadores respeitados (em alguns lugares) ainda apresentassem o que agora são vistos como ideias absurdas para as marés. Em seu livro, Cartwright (1999) observa que seria “desnecessário [para ele] ampliar algumas teorias não científicas das marés”. No entanto, omiti-los completamente apresentaria uma perspectiva de investigação naquela época através de um filtro de percepção moderna. Portanto, vale a pena mencionar aqui alguns deles que tinham seguidores na época.

**Athanasius Kircher (1602 - 1680)** foi descrito como “um mestre de cem artes” em sua própria opinião, ou “mais um charlatão do que um erudito” na opinião de Descartes (Brauen, 1982; Findlen, 2004; Glassie, 2012). De qualquer forma, ele era um personagem fascinante e influente com interesses em muitas coisas, especialmente geologia, extremamente lido e um escritor prolífico com mais de 30 livros, fazendo uso de uma enorme quantidade de evidências científicas (reais ou fabricadas) enviado a ele em Roma por outros jesuítas ao redor do mundo. Alinhado com a doutrina religiosa da

época, ele se opôs à proposição heliocêntrica copernicana e sua assunção na obra astronômica de Gilbert e Kepler. Ele considerou suas falácias científicas

“perniciosas para a República Cristã e perigosas para a fé da igreja”  
(Baldwin, 1985).

No entanto, ele se comunicou com um grande número dos mais importantes cientistas de meados do século XVII por meio do que foi chamado de República das Letras. Seu nome está amplamente esquecido hoje, provavelmente porque, é preciso dizer, a maioria de suas ideias eram ridículas (Woodworth, 2023, p.16).

No *Mundus Subterraneus (Mundo Subterrâneo)*<sup>98</sup> de 1665, Kircher cobriu uma vasta gama de ciência e pseudociência renascentista, buscando causas racionais para vários fenômenos por meio de uma compreensão das leis naturais derivadas de observações em vez de explicações milagrosas (Woodworth, 2023, p.16). O redemoinho mítico de Charybdis no Estreito de Messina perto da rocha Scylla na Calábria, mencionado pela primeira vez por Homero, é discutido no final do Livro 2 (de 12) em termos de ventos conduzindo a água através de um canal subterrâneo que liga os dois lados da Sicília em que são aquecidos pelo Monte Etna. O Livro 3 de 12 trata de aspectos mais amplos da hidrografia. A Seção 1 discute as propriedades gerais do oceano, incluindo seu movimento geral de leste a oeste. As marés são abordadas na Seção 2, na qual fica claro que Kircher apreciou a astronomia básica da Lua retornando à sua posição aparente após cerca de 25 h e os papéis combinados da Lua e do Sol no ciclo das Luas Nova, Crescente e Cheia. Ele sabia que as marés tinham um caráter diurno e mensal (do que se entende hoje por semidiurnas e quinzenais) e estava ciente das grandes marés fora do Mediterrâneo, como as experimentadas por Alexandre, o Grande. Ele sugeriu que as marés eram causadas pelo efeito da Lua sobre a luz do Sol. A luz pura do Sol seria infectada com uma “qualidade nitrosa” ao ser refletida na Lua e, passando para a Terra, causa turbulência e elevação do nível do mar. Como resultado, os “eflúvios nitrosos da Lua” fazem com que a água seja empurrada e puxada através de uma rede global de “passagens ocultas e secretas” (um tópico principal do *Mundus Subterraneus* discutido longamente no *Pyrographicus* do Livro 4). A seção 2 do livro 3 também apresenta descrições de diversas marés em diferentes locais, incluindo as marés altas de Londres, que são habilmente descritas como resultado das marés do Atlântico

---

<sup>98</sup> Esta publicação ricamente ilustrada pode ser inspecionada no Internet Archive (2022).

que são restringidas pela passagem através do Canal da Mancha. Acredita-se que Kircher provavelmente obteve suas informações sobre as marés de Londres de Sir Robert Southwell (um diplomata, mais tarde presidente da Royal Society) ou de um visitante inglês anterior a Roma, como o diarista John Evelyn, outro dos fundadores da Royal Society (Brauen, 1982; Reilly, 1974). Além disso, ele se refere ao vórtice de maré (*maelstrom*) na costa norte da Noruega, localizado adjacente a outra suposta passagem subterrânea abaixo da Escandinávia, conectando o Atlântico ao Golfo de Bótnia (Woodworth, 2023, p.16-17).

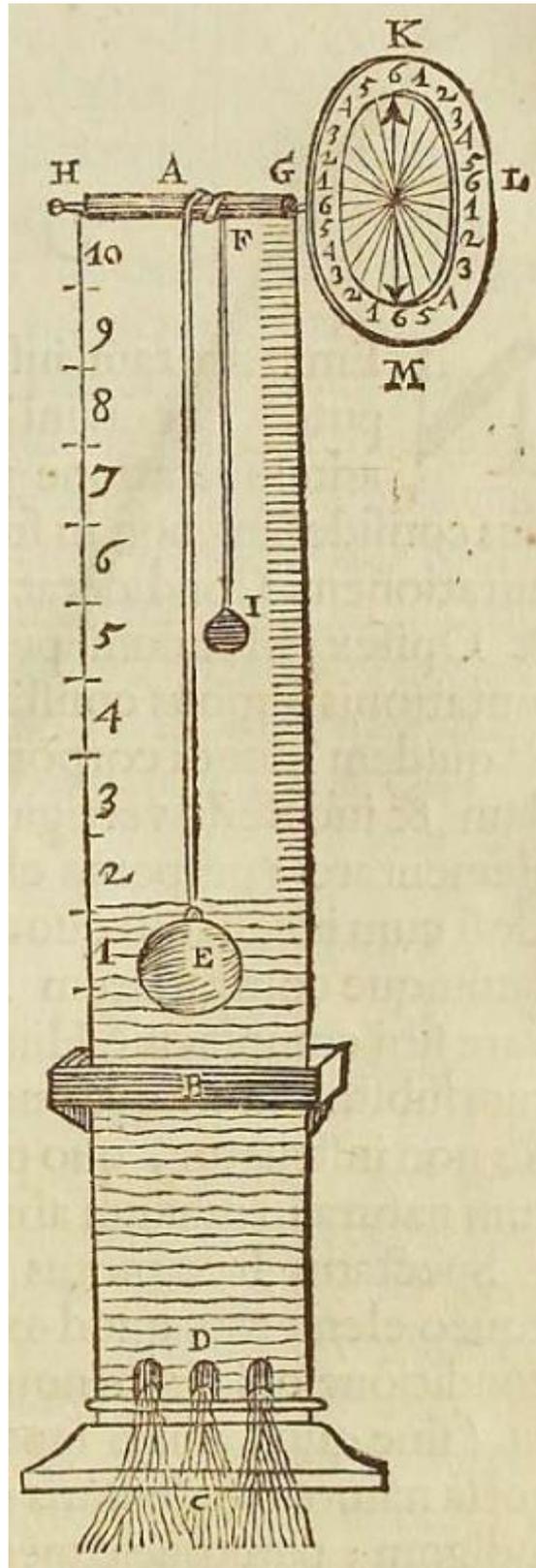
Ele sustentou que a prova de tudo isso poderia ser demonstrada pela observação da “qualidade nitrosa” da Lua em um pequeno experimento de bancada envolvendo a Lua brilhando em uma bacia de sal amoníaco (cloreto de amônio). Ele alegou que uma infusão desse sal volátil

“placed obliquely to receive the Influence of the Moon ... did Increase and Decrease as it held of an equal Correspondence, by an uninterrupted Chain of Atoms, with the Flowings and Ebbings of the Marine waters.” (Woodworth, 2023, p.17).

Além disso, o efeito seria mais forte em uma noite de luar, quando Sol e Lua estivessem em conjunção ou oposição. Roos (2001) sugere que por trás de sua ideia pode estar o fato de que o cloreto de amônio é higroscópico. No entanto, o experimento foi tentado na Royal Society por Henry Oldenburg (seu primeiro secretário e primeiro editor do *Philosophical Transactions*) e Robert Boyle (um dos fundadores da química moderna), com a visita de **Sir Robert Moray (1609 - 1673)** (um dos fundadores da Sociedade) para ver o seu sucesso (Reilly, 1974; Glassie, 2012; Roos, 2001). Moray havia dissolvido uma onça de “Bay Salt” e outra de nitro (salitre) em dois litros e meio de água e, depois de olhar para ela por meia hora, foi recompensado com apenas algumas bolhas. Boyle então fez seu assistente repetir o experimento por duas noites inteiras, sem êxito novamente. Moray disse a Oldenburg que ele não deveria se preocupar em comunicar tais resultados experimentais negativos para as *Philosophical Transactions* “sabendo que seus momentos podem ser melhor empregados”, enquanto Oldenburg concluiu que, este primeiro experimento de Kircher tendo sido um fracasso, era provável que todos os outros em *Mundus Subterraneus* também seriam (Woodworth, 2023, p.17).

Uma ideia semelhante foi proposta pelo poeta e escritor inglês **Thomas Philipot (falecido em 1682)**. Sua ideia pode ser considerada independente da de Kircher, e Philipot provavelmente desconhecia os experimentos da Royal Society. Ele produziu seu ensaio de 1673 sobre uma teoria química das marés, em parte como uma crítica (justificável) de Galileu e Kepler e da maioria das outras teorias que precederam Newton. O ensaio incluiu uma revisão das muitas ideias concorrentes na época. Ele propôs que o “fluxo da maré” (sua subida) era devido a sais voláteis “sal ou espírito amoniacal, que é envolto nas entranhas do mar” que foram liberados pelas “impressões do sol e da lua”. Para o “refluxo da maré” (sua queda), ele invocou a ação da “nascente do ar”, que era o termo de Boyle para a pressão do ar. Deve-se ler Roos (2001) para uma explicação das justificativas de sua teoria no contexto da época. Seus argumentos podem ser considerados como uma contribuição para o então interesse geral na química dos sais envolvendo Boyle e outros, e, como o próprio Philipot observou, sua teoria das marés não era menos absurda do que a respiração animal de Kepler. (Woodworth, 2023, p.18).

Mas, voltando a Kircher, um aspecto das marés pelo qual ele merece crédito é sua sugestão do uso de uma boia e um poço calmante para medições das marés, uma tecnologia simples que continua em uso em muitos locais ao redor do mundo (Woodworth, 2022). Um desenho pode ser encontrado no Livro 3 do *Mundus Subterraneus* (figura 9).



**Figura 9.** Um diagrama de um medidor de maré flutuante e de poço de calma na página 157 do Livro 3 do *Mundus Subterraneus* de Athanasius Kircher (Kircher, 1665). Disponível em: WDB - Wolfenbütteler Digitale Bibliothek - drucke/na-2f-3-1 (hab.de). Acesso em 24/04/2023.

A mesma sugestão foi feita quase ao mesmo tempo por Sir Robert Moray em um artigo que também foi publicado no primeiro volume de *Philosophical Transactions* (Moray, 1666). Moray geralmente recebe o crédito pela ideia, mas as duas sugestões podem não ter sido uma coincidência. Moray é conhecido por ter lido o livro de Kircher de 1641, *Magnes Sive de Arte Magnetica* (A Lodestone, ou a Arte Magnética), enquanto era prisioneiro do Duque da Baviera em 1643 - 1645. Glassie (2012) afirma que isso deu início a um conjunto de correspondência entre Moray e Kircher que durou décadas. Por exemplo, as observações de Moray sobre as marés nas Hébridias, publicadas no mesmo primeiro volume das *Philosophical Transactions* (Moray, 1665), são mencionadas no Livro 3 do *Mundus Subterraneus*. Portanto, é bem possível que eles tenham se correspondido sobre a ideia do poço.

Lalande menciona o medidor de marés de Moray e as instruções para seu uso (Lalande, 1781). Lalande também menciona um instrumento similar que havia sido descrito em um jornal italiano em 1675.<sup>99</sup> Este foi o primeiro periódico acadêmico na Europa, iniciado em janeiro de 1665, pouco antes das *Philosophical Transactions* em março.

Moray (1665) foi o primeiro artigo sobre marés, publicado em um periódico científico (figura 10), enquanto Wallis (1666) poderia ser considerado o primeiro artigo sobre teoria das marés (Woodworth, 2023, p.19 – **grifo nosso**).

---

<sup>99</sup> Um resumo e diagrama derivados desse relatório podem ser encontrados no *Journal des Sçavans* de 22 de abril de 1675 (página 118, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56526h/f107.item>)

# PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

Munday, June 5. 1665.

## The Contents.

*A Relation of some extraordinary Tydes in the West-Isles of Scotland, by Sr. Robert Moray. The judgment of Monsieur Auzout, touching the Apertures of Object-glasses, and their proportions in respect of the severall lengths of Telescopes; together with a Table thereof. Considerations of the same Person upon Mr. Hook's New Engine for grinding of Optick-glasses. Mr. Hook's Thoughts thereupon. Of a means to illuminate an Object in what proportion one pleaseth; and of the distances, that are requisite to burn Bodies by the Sun. A further account by Monsieur Auzout of Signior Campani's Answer thereunto; and Mr. Auzout's Animadversions upon that Answer. An account of Mr. Lower's newly published Vindication of Dr. Willis's Diatriba de Febribus.*

*A Relation of some extraordinary Tydes in the West-Isles of Scotland, as it was communicated by Sr. Robert Moray.*

**I**N that Tract of Isles, on the West of Scotland, called by the Inhabitants, the *Long-Island*, as being about 100. miles long from North to South, there is a multitude of small Islands, scituated in a *Fretum*, or *Frith*, that passes between the Island of *Eust*, and the *Herris*; amongst which, there is one called *Berneray*, some three miles long, and more than a mile broad, the length running from East to West, as the *Frith* lyes. At the *East* end of this *Island*, where I stayed some 16. or 17. daies, I observed a very strange Reciprocation of the Flux and Re-flux of the Sea, and heard of another, no less remarkable.

Upon the *West* side of the *Long Island*, the Tides, which came

H

f.

**Figura 10.** Primeira página de Moray (1665), o primeiro artigo sobre marés em uma revista científica. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/>. Acesso em 24/04/2023.

Moray (1665) apontou as correntes de maré entre as ilhas Hebrides, observadas por ele e por pescadores locais, sendo diurnas em um regime de maré semidiurno, um aspecto que não foi totalmente compreendido até recentemente (veja o Capítulo 13 de Cartwright, 1999).

Na mecânica clássica moderna, a teoria das marés envolve duas forças: as gravitacionais do Sol e da Lua, e as forças inerciais causadas pela aceleração da Terra (tomada como referencial acelerado). Enquanto as explicações de Chrisogono e de Dominis antecipam as forças gravitacionais, eles não oferecem uma explicação para as forças inerciais. Esta é a razão pela qual eles foram obrigados a postular que a ação do Sol e da Lua se estende da região em que parecem estar no zênite até a região antipodal correspondente, sem oferecer qualquer explicação para uma característica tão estranha. Por outro lado, Galileu é considerado o representante mais ilustre de uma segunda linha de pensamento que preparou o terreno para a consideração dessas forças inerciais (Bonelli e Russo, 1996).

Já estudamos a Quarta Jornada, em que Galileu, afirma que acredita ter demonstrado que as marés são um efeito dos movimentos da Terra. Já vimos também que o raciocínio de Galileu (no qual ele trata como "infantil" a ideia de que a Lua poderia ter um papel na criação das marés) estava repleto de inconsistências. Já vimos também que a ideia de que o movimento da Terra poderia explicar as marés não era original de Galileu, tendo sido proposta por outros cientistas, como **Calcagnini (1479 - 1541)**<sup>100</sup>, Cesalpino e Sarpi, no século XVI. No entanto, como também já vimos, a origem dessa ideia remonta a tempos antigos, com Seleucus sendo famoso por apoiar Aristarchus na suposição de uma rotação axial da Terra, relacionando-a com sua teoria das marés. Embora as fontes não permitam concluir que Seleucus se referiu à rotação da Terra, a declaração de Plutarco (Plutarco, *Platonicae quaestiones*, VIII, i (= *Moralia*, 1006C) *apud* Bonelli e Russo, 1996) não deixa dúvidas de que Seleucus foi precursor de Galileu na tentativa de demonstrar a existência de movimentos da Terra. No século XVI, o conhecimento de Plutarco e Aetius era essencial para quem se interessasse pelos movimentos da Terra, o que levou muitos estudiosos a tentarem reconstruir a prova, incluindo Calcagnini, Sarpi, Cesalpino e Galileu (Bonelli e Russo, 1996). A teoria

---

<sup>100</sup> A afirmação de que as marés são causadas por variações nos movimentos da Terra pode ser encontrada na obra *Quod caehim stet, terra moveatur, vel de perenni motu terrae*, publicada postumamente em *Caelii Calcagnini Ferrarensis opera aliquot*, Basel, 1544. Por falta de tempo para estudarmos mais sobre a teoria de marés desse cientista, deixamos apenas essa observação como menção honrosa.

galileana das marés, por mais imprecisa que seja, acabou, por outro lado, contribuindo para a teoria moderna das marés e para mecânica moderna através dos trabalhos posteriores de Pierre Gassendi (Gassendi, *De motu impresso a motore traslato*, Paris, 1641) e **Giambattista Baliani (1582 - 1666)**. Já vimos que o limite mais óbvio da explicação galileana era sua incapacidade de explicar o ciclo mensal das marés. Baliani, pois, tentou resolvê-la adicionando um terceiro movimento da Terra (de período mensal), além da rotação e revolução, em torno da Lua. Essa tentativa de Baliani, apesar de parecer uma curiosidade, foi adotada por John Wallis (apresentado em breve), que propôs a noção de que o movimento de dois corpos interagindo deve ser calculado em torno do centro de massa do sistema, que mais tarde se tornaria parte da mecânica clássica.<sup>101</sup>

**John Wallis (1616 – 1703)**, um matemático inglês, professor de geometria em Oxford, elabora, em 1666, uma versão estendida da teoria de Galileu. Wallis, sugeriu que as oscilações das marés resultaram da rotação da Terra combinada, não apenas com o movimento da Terra ao redor do Sol, mas também com seu movimento ao redor do centro de gravidade do sistema Terra-Lua. Assim, Wallis tentou incluir a influência da Lua na teoria. Harris (1898) aponta que, para ser justo, Galileu estava cogitando um tratado sobre a teoria das marés, mas que a perseguição religiosa da época não o teria possibilitado continuar com seu trabalho científico. Portanto, tem de se esperar até 1666, para se obter uma versão estendida da teoria de Galileu, proposta por Wallis (Deacon, 1971). Wallis estava preocupado com a falta de associação das marés com a Lua na teoria de Galileu. Ele observou corretamente que era o centro de gravidade do sistema Terra-Lua que orbita o Sol. Como consequência, as marés resultam da rotação da Terra combinada, não só com o movimento da Terra em torno do Sol, mas também com a rotação em torno do centro de gravidade. A sugestão de Wallis assim inferiu uma maré por dia lunar, uma melhoria em relação à uma maré por dia solar de Galileu, mas ainda não duas marés.

Para conectarmos as ideias, na verdade, segundo Wallis, a Terra tem na verdade um movimento mensal causado pela Lua, como afirmado por Baliani, mas com a Terra se movendo em torno do baricentro do sistema Terra-Lua (e não apenas a Lua), explicando assim o ciclo mensal das marés. Não é difícil reconhecer importantes

---

<sup>101</sup> A teoria de Baliani, que ele não publicou, chegou ao conhecimento de Wallis por meio de um relatório de **Giovanni Battista Riccioli (1598 - 1671)** em seu *Almagestum novum*, Bolonha, 1651; veja Wallis, *Philosophical Transactions* (1666), p. 270 *apud* Bonelli e Russo, 1996, p.386.

anteriores da teoria moderna das marés nessa ideia de Wallis: a existência do que viria a ser chamado de forças inerciais em relação à aceleração da Terra devido à interação com a Lua. Para chegar à teoria moderna, o próximo passo seria entender que o argumento de Wallis não deveria ser colocado em oposição às explicações de Chrisogono e de Dominis, mas seria complementar a elas, reconhecendo que as marés são criadas a partir da combinação de dois tipos de forças: aquelas devidas à interação gravitacional direta com o Sol e a Lua, e as forças inerciais devido aos movimentos da Terra (Bonelli e Russo, 1996).

Alguns anos depois, em 1651, foi publicada, em latim, postumamente,<sup>102</sup> a teoria das marés de **William Gilbert (1544 – 1603)**, em *A New Philosophy of Our Sub-Lunar World* (Uma Nova Filosofia do Nosso Mundo Sublunar). Gilbert já havia proposto que a Terra age como um grande ímã, conforme publicado em *De Magnete* em 1600 (Fara, 1996). Ele agora sugeria que as órbitas dos planetas e as marés eram determinadas pelo magnetismo e, da mesma forma,

“The Moon produces the movements of the waters and the tides of the sea...” (Ekman, 1993; Hecht, 2019; Woodworth, 2023).

Bryant (1920) afirma que Gilbert não sugeriu explicitamente que havia uma atração entre a Lua e a água, mas vagamente que

“subterranean spirits and humors, rising in sympathy with the Moon, cause the sea also to rise and flow to the shores and up rivers.” (Woodworth, 2023, p.15).

Embora a conexão lunar, em vez da solar, tenha sido reconhecida aqui, o caráter duas vezes ao dia das marés permaneceu inexplicado.

Alguns dos investigadores mencionados anteriormente perceberam que, para haver progresso, seriam necessárias mais medições das marés. Vários dos mais importantes associados à Royal Society em Londres e pela Académie Royale des Sciences em Paris são descritos no Capítulo 6 de Cartwright (1999). Por exemplo, Wallis não conseguiu ver por que as marés deveriam ser maiores nos equinócios, uma característica das marés que parece óbvia agora. Em vez disso, ele persistiu com relatos

---

<sup>102</sup> Por isso, inserimo-la aqui para respeitar a ordem cronológica dos fatos.

de que eram maiores em fevereiro e novembro. Essa controvérsia após sua publicação em 1666 levou a um apelo para mais medições de alturas de água altas e baixas ao longo do ano em portos o mais próximo possível do mar aberto (Deacon, 1971). Uma série de outros relatórios foram inconclusivos, em grande parte devido à dificuldade de separar as marés dos efeitos dos ventos e do escoamento do rio em conjuntos de medições curtas e imprecisos. Em particular, a publicação de Joshua Childrey (1670) rejeitou a afirmação de Wallis de que as marés eram maiores em fevereiro e novembro, sugerindo também que essas observações foram o efeito dos ventos e não das marés. Ele afirmou que os marinheiros ingleses geralmente acreditavam que as maiores marés ocorriam nos equinócios. Além disso, ele foi o primeiro a observar que as marés altas também tendem a ocorrer quando a Lua está próxima do perigeu, além da *spring-neap periodicity* (período de alternância entre maré de sizígia e de quadratura), resultando em “marés vivas perigeanas” (Childrey, 1670, p.2068).

As primeiras observações sistemáticas das marés para fins científicos no Reino Unido, precedendo aquelas associadas à Royal Society, foram provavelmente as de **Jeremiah Horrocks (1618 - 1641)** em Toxteth, perto de Liverpool. Acredita-se que suas medições de maré abrangeram várias semanas em 1640, com a esperança de coletar um registro muito mais longo. Isso foi evitado por sua morte em 1641, e seus registros de maré não sobreviveram à Guerra Civil (Woodworth, 2023, p.22).

Cartwright (1999) refere-se a alguns desses indivíduos (mas não a Horrocks) como “primeiros observadores amadores”, embora suas observações fossem tão importantes em retrospecto quanto as dos ilustres cientistas da época. A agitação causada na Royal Society pela publicação de Wallis levou a Sociedade a encarregar William Brouncker (seu primeiro presidente) e Moray de organizar um programa de medições em tantos locais quanto possível, como no Tâmis e no Canal de Bristol, onde as marés são grandes. Essa campanha de medição em si nunca aconteceu. No entanto, os padrões de medição que Moray estabeleceu e suas sugestões para o uso de poços de atenuação (mencionado anteriormente) lançaram as bases para medições futuras (Woodworth, 2023, p.22).

Quanto à previsão das marés, **Henry Philips** fez uma modificação na previsão do momento das marés altas em Londres através do ciclo de sizígia e quadratura,

introduzindo uma adição ao aumento familiar de 48 minutos por dia, devido a um termo cosseno com período de 15 dias e amplitude de 45 minutos (Woodworth, 2023, p.22).<sup>103</sup>

Uma visão sobre a natureza e qualidade das previsões de maré naquela época é apresentada por Henry Phillips (1668):

“... this time of the Tides, though it be a very necessary thing to be known, yet is very rudely and slightly reckoned up by most seamen and astronomers; most of them reckoning, as if the moon being upon such a set point of the compass (as the seaman calls it) or so many hours past the Meridian (as the Almanack-Makers reckon) it were high-tide in such and such a port at all times of the moon”. (Rossiter, 1972, p.16).

Phillips sabia melhor:

“Now this is true indeed at the new and full moon, but not at other times of the moon, which few take any notice of: only Mr Booker had wont to give this caveat, that about the first and last quarters of the moon, the neap-tides did not flow so long as the spring-tides by one point of the compass; but he gives no rule to proportion the difference.” (Rossiter, 1972, p.16).

De fato, a partir de suas próprias observações em Londres, ele descobriu que a mudança no ciclo de maré de sizígia e quadratura era em "proporção circular".

**John Flamsteed (1646 - 1719)**, o primeiro Astrônomo Real, utilizou medições dos horários das marés altas em Tower-Wharfe no final de 1661 e em Tower-Wharfe e Greenwich no verão de 1682, juntamente com seus conhecimentos astronômicos sobre as órbitas da Lua e do Sol, para produzir uma tabela de marés para os horários das marés de Londres para 1683-88 e, por meio de ajustes simples, horários (um tanto imprecisos) das marés em outros lugares (Woodworth, 2023, p.22)

Como vimos, até esse ponto havia poucas restrições ao avanço de teorias sobre as marés que conflitassem com evidências bem estabelecidas. Todas as teorias tendiam a ser descritivas e careciam de rigor matemático. De fato, como aponta Glassie (2012), embora a Europa tivesse muitos dos chamados professores de matemática (Kircher era um deles), os matemáticos eram tradicionalmente vistos com condescendência por

---

<sup>103</sup> Para ver na íntegra uma de suas tabelas, consulte: Philips. A letter written to Dr. John Wallis by Mr. Henry Philips, containing his observations about true time of the tides. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 3, n. 34, p.656-659.

filósofos naturais e teólogos. Na opinião deles, a matemática podia ser usada para medir e descrever e tinha algumas aplicações práticas, mas não tinha nada a dizer sobre as causas ou a natureza das coisas. Tudo isso iria mudar, como demonstrado pela Restauração na Inglaterra que levou à fundação da Royal Society em 1660 como um “*College for the Promoting of Physico Mathematical Experimental Learning*” (Colégio para a Promoção da Aprendizagem Experimental Físico-Matemática) (Woodworth, 2023, p.23).

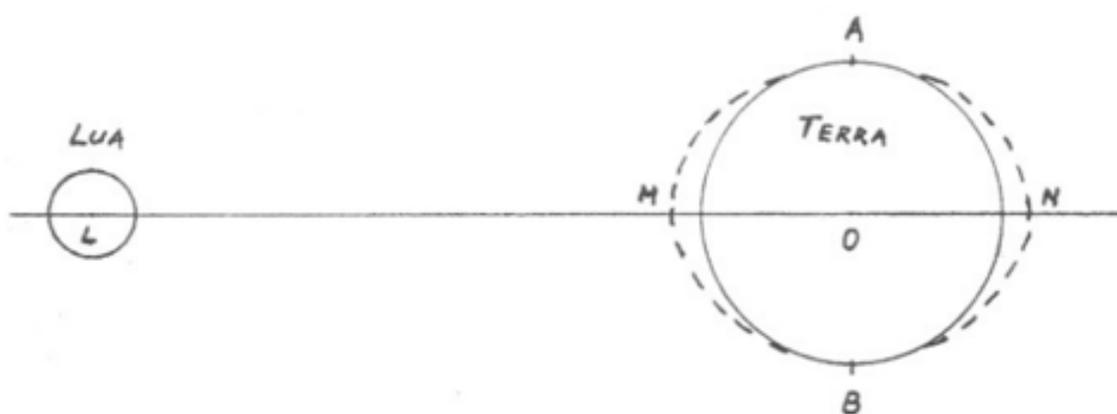
A atenção às evidências científicas e o uso do poder da matemática foram as duas chaves para o triunfo do *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural) de **Isaac Newton (1642 - 1727)**, publicado em 1687. Como observou Cartwright (1999), as medições científicas forneceriam a base sobre a qual as ideias teóricas seriam construídas. Newton afirmou mais tarde: “Em vez das conjecturas e probabilidades que estão sendo espalhadas por toda parte, devemos finalmente alcançar uma ciência natural apoiada pela maior evidência”. Harper (2011) descreve em detalhes a “filosofia experimental” de Newton ou o que agora seria chamado de seu “método científico” aplicado aos seus argumentos para a gravidade universal. Central para esse método é a necessidade de testar hipóteses usando observações de quaisquer consequências que fluam delas. A matemática foi essencial para Newton chegar às conclusões dos *Principia*, tendo sido obtida por meio de seu “cálculo infinitesimal”, embora para sua publicação Newton tivesse retrabalhado seus argumentos na linguagem mais amplamente compreendida da geometria. Newton desenvolve sua teoria das marés principalmente em três preposições do Livro III do *Principia*, a saber, as Proposições 24; 36 e 37, as quais são, de certo modo, consequências dos Corolários 19 e 20 da Proposição 66 do Livro I (cf. Cohen, 1999, p.238-246). Em particular, a explicação das marés teve uma tal importância na época que Edmond Halley (1656-1742) a escolheu como tema principal de sua apresentação dos *Principia* ao rei da Inglaterra no Discurso ao Rei sobre as Marés no mesmo ano de 1687.<sup>104</sup>

A partir daqui, apresentar-se-á a explicação newtoniana para as marés com base no que é descrito em Mariconda (Mariconda, 2011, p.856-860). Esquemáticamente, as marés são uma consequência da gravitação universal e do princípio de ação e reação.

---

<sup>104</sup> Devemos agradecer a Edmond Halley por pagar pela publicação dos *Principia*, pois as finanças da Royal Society foram prejudicadas pelo fracasso da publicação de *History of Fishes*, de Francis Willughby (Woodworth, 2023, p.24).

Supondo-se que a Terra esteja inteiramente recoberta pela água, a forma que a superfície dessa água terá no equilíbrio sob o efeito da atração gravitacional de um astro perturbador, será a de um esferoide de revolução, cujo eixo passa pelo centro **O** da Terra e pelo centro **L** do astro perturbador, no caso, a Lua. Como mostra a figura 10, a superfície da água, sob a ação da massa da Lua, incha-se nos dois pontos diametralmente opostos, **M** e **N**, da reta que une os centros da Lua e da Terra e esse inchaço, ou seja, as suas cristas de onda da maré, será depois transportado pela superfície terrestre por efeito do movimento diurno da Terra, produzindo o fluxo e refluxo do mar.



**Figura 10.** Teoria do equilíbrio das marés descrita por Newton em seu *Principia*.

Fonte: Cad. Hist. Fil. Ci. Campinas. Série 3, v. 9, n.1-2, p.33-71, jan-dez. 1999.

Para entender como acontece esse duplo inchaço da superfície da água é preciso, primeiro, considerar que todos os pontos da Terra estão sujeitos simultaneamente à força da gravitação terrestre e lunar, porque, pelo terceiro princípio da dinâmica newtoniana, a cada ação contrapõe-se uma reação igual e contrária: por isso, assim como a Lua atrai a Terra, esta atrai a Lua. Em segundo lugar, a ação constante de uma força, como é o caso da força gravitacional que age constantemente, traduz-se na produção de uma aceleração. Tomemos agora, na figura, os pontos **M**, **N** e **O** da Terra sobre a linha reta que une os centros da Terra e da Lua e sejam eles tais que **M** esteja voltado para a Lua, **N** seja diametralmente oposto e **O** seja, como já foi dito, o centro da Terra. Chamando  $g$  a aceleração devida à atração terrestre, ela será em **M** de  $+g$ , em **O**, de zero, em **N**, de  $-g$ . Entretanto, sobre esses três pontos age ainda a Lua, provocando, por reação da Terra, uma aceleração que será  $-y$  para o centro **O**,  $-(\Psi + \Delta\Psi)$  para o ponto **M** e  $-(\Psi - \Delta\Psi)$  para **N**, em que  $\Delta\Psi$  é a variação da atração lunar  $\Psi$ , que se exerce

no centro da Terra; evidentemente, a aceleração é maior em **M**, porque ele está mais próximo da Lua que o centro **O**, e menor em **N**, porque ele está mais afastado da Lua que o centro **O** da Terra. Mas a aceleração lunar  $+\Psi$  age sobre todos os pontos da Terra rígida e age, portanto, igualmente em **M**, **N** e **O**. Assim, cada um desses três pontos está submetido à resultante das três acelerações:

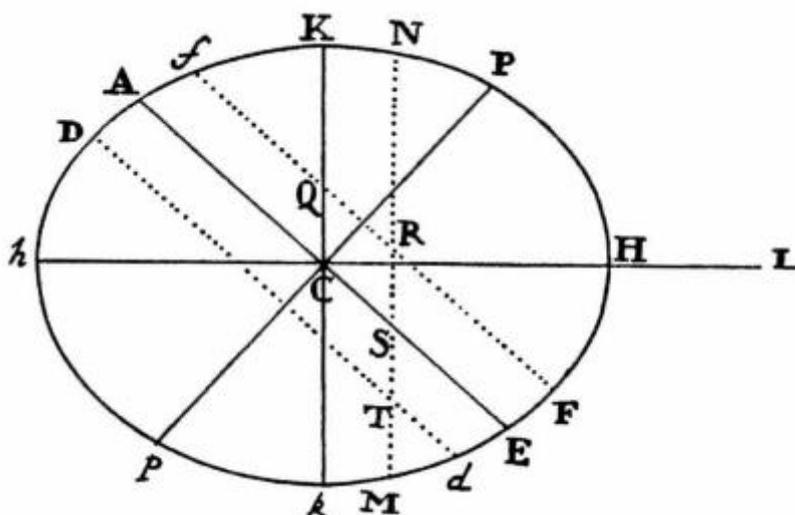
$$\mathbf{M} \text{ às acelerações } - (\Psi + \Delta\Psi) + g + \Psi = + (g - \Delta\Psi),$$

$$\mathbf{N} \text{ às acelerações } - (\Psi - \Delta\Psi) - g + \Psi = - (g - \Delta\Psi),$$

$$\mathbf{O} \text{ às acelerações } - \Psi + \text{zero} + \Psi = \text{zero}.$$

Esse resultado permite concluir que, nos pontos **M** e **N**, existem duas acelerações  $+(g - \Delta\Psi)$  e  $-(g - \Delta\Psi)$  iguais e de sinais opostos, que concorrem ambas em diminuir de  $Dy$  a gravidade específica  $g$  da Terra e, por isso, aptas a produzir nesses pontos os inchaços. Assim, não apenas a água que está do lado da Lua forma uma bossa, mas também a água que está do lado diametralmente oposto. Portanto, de modo geral, a causa principal das marés é a diferença da atração exercida por um corpo externo perturbador, Lua ou Sol, de um lado, sobre o centro da Terra e, de outro lado, sobre um ponto qualquer da superfície da água: se esse ponto está mais próximo do astro perturbador do que o centro, ele é mais atraído do que o centro; se ele está mais afastado, ele é menos atraído do que o centro, mas, em ambos os casos, isso produz uma elevação da superfície da água.

A figura 11 mostra o esquema que Newton construiu:



**Figura 11.** A figura mostra a superfície oceânica da Terra deformada pela maré:  $Pp$  denota o eixo de rotação,  $AE$  o equador e  $L$  a direção da Lua. Fonte: Newton. *Principia*

– Livro III, tradução de Assis, 2008, p.227.

“Pois todo o mar é dividido em duas marés cheias hemisféricas, uma no hemisfério  $KHk$  no lado norte, a outra no hemisfério oposto  $Khk$ , que podemos, portanto, chamar de marés cheias do norte e do sul. Estas marés, sendo sempre opostas entre si, chegam alternadamente aos meridianos de todos os lugares após um intervalo de doze horas lunares. E como os países participam mais das marés cheias no norte, e os países do sul mais das marés cheias do sul, ocorrem marés, alternadamente maiores e menores em todos os lugares fora do equador, nos quais os astros nascem e se põem.” (Newton. *Principia* – Livro III, tradução de Assis, 2008, p.227).

É importante ter claro que as marés não são devidas à força de atração, mas à variação dessa força sobre os diversos pontos da superfície terrestre, pois essa variação da atração permite não apenas explicar, como demonstrado, porque existem geralmente duas marés por dia (período diário), mas também porque o efeito do Sol é mais fraco que o da Lua, ainda que o primeiro exerça evidentemente uma atração mais forte sobre a Terra. Com efeito, a massa do Sol é cerca de 27 158 000 vezes maior que a da Lua e a distância do Sol à Terra é cerca de 390 vezes maior que a distância da Lua à Terra. Como, pelo princípio da atração universal, a atração gravitacional se exerce na razão direta da massa e na razão inversa do quadrado da distância, teremos

$$\frac{27\ 158\ 000}{390^2} = \frac{27\ 158\ 000}{152\ 100} \cong 178,5$$

portanto, a atração gravitacional do Sol sobre a Terra é cerca de 178 vezes maior que a da Lua. Entretanto, como a força das marés corresponde à diferença dos valores assumidos pela força de atração gravitacional entre um ponto da superfície terrestre e o centro da Terra, a variação da ação gravitacional se exerce na razão direta da massa e na razão inversa do cubo da distância. De um ponto de vista matemático, enquanto a força gravitacional varia na razão  $\frac{1}{R^2}$ , sua diferença, obtida tomando-se sua derivada, varia na

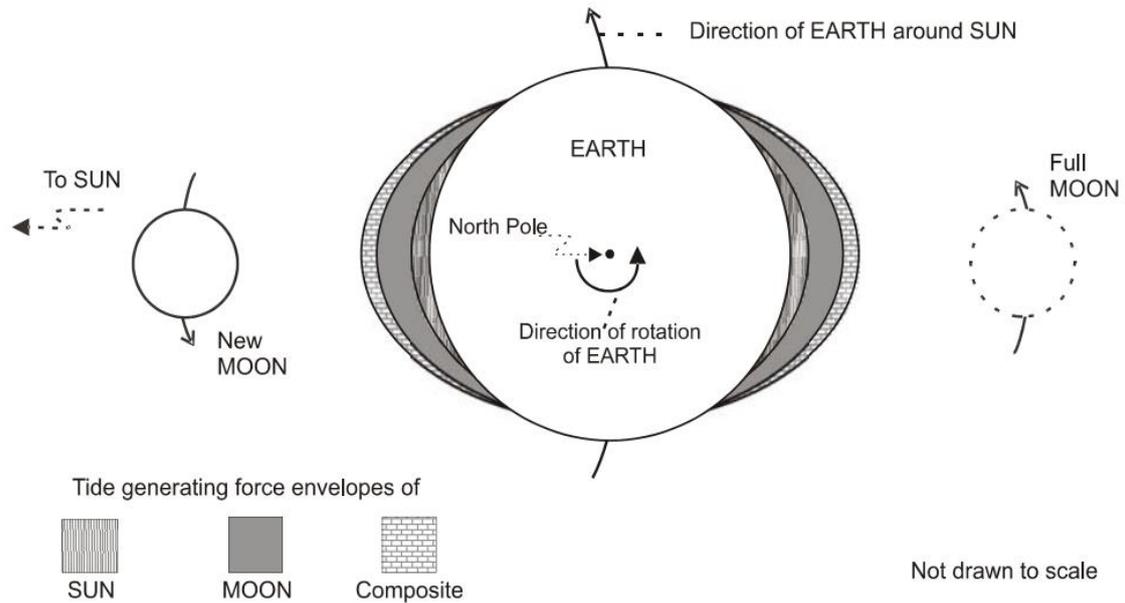
razão  $\frac{1}{R^3}$ . Tem-se, assim:

$$\frac{27\ 158\ 000}{390^3} = \frac{27\ 158\ 000}{59\ 319\ 000} \cong 0,45,$$

ou seja, a diferença da ação gravitacional do Sol sobre a Terra é cerca de 0,45 vezes a da Lua, ou ainda, a ação da Lua sobre as marés é cerca de 2,2 vezes maior que a do Sol.

Esquemmatizando, na Lua Nova (no lado da Terra voltado para o Sol) ou na Lua Cheia (no lado da Terra longe do Sol), as forças geradoras de maré do Sol e da Lua

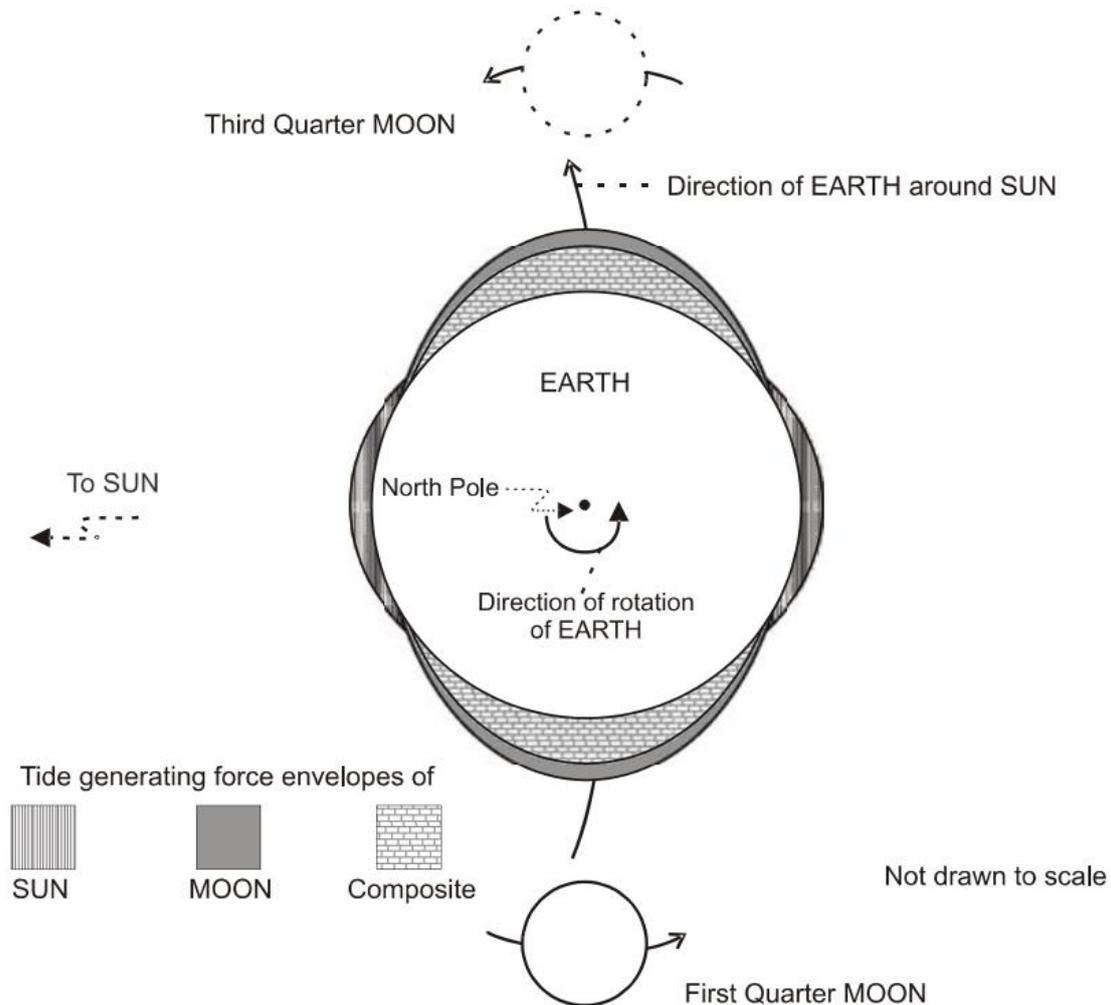
estão alinhadas. Na figura 12, o bojo das forças geradoras de maré do Sol aumenta o bojo da Lua.



**Figura 12.** Marés-vivas. Fonte: Hicks. **Understanding tides.** US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

As marés altas da protuberância solar ocorrem ao mesmo tempo que as marés altas do lunar. Isso aumenta a altura das marés altas compostas. Da mesma forma, as marés baixas da protuberância solar ocorrem nas marés baixas do lunar. Isso diminui a altura das marés baixas compostas. Portanto, ocorrem amplitudes de maré maiores do que a média, chamadas de marés-vivas (*spring tides*).

Na Lua Crescente ou Minguante, por outro lado, as forças geradoras de maré do Sol estão em ângulos retos com as da Lua. Na figura 13, o bojo das forças geradoras de maré do Sol é mostrado em conflito com o bojo de força da Lua.

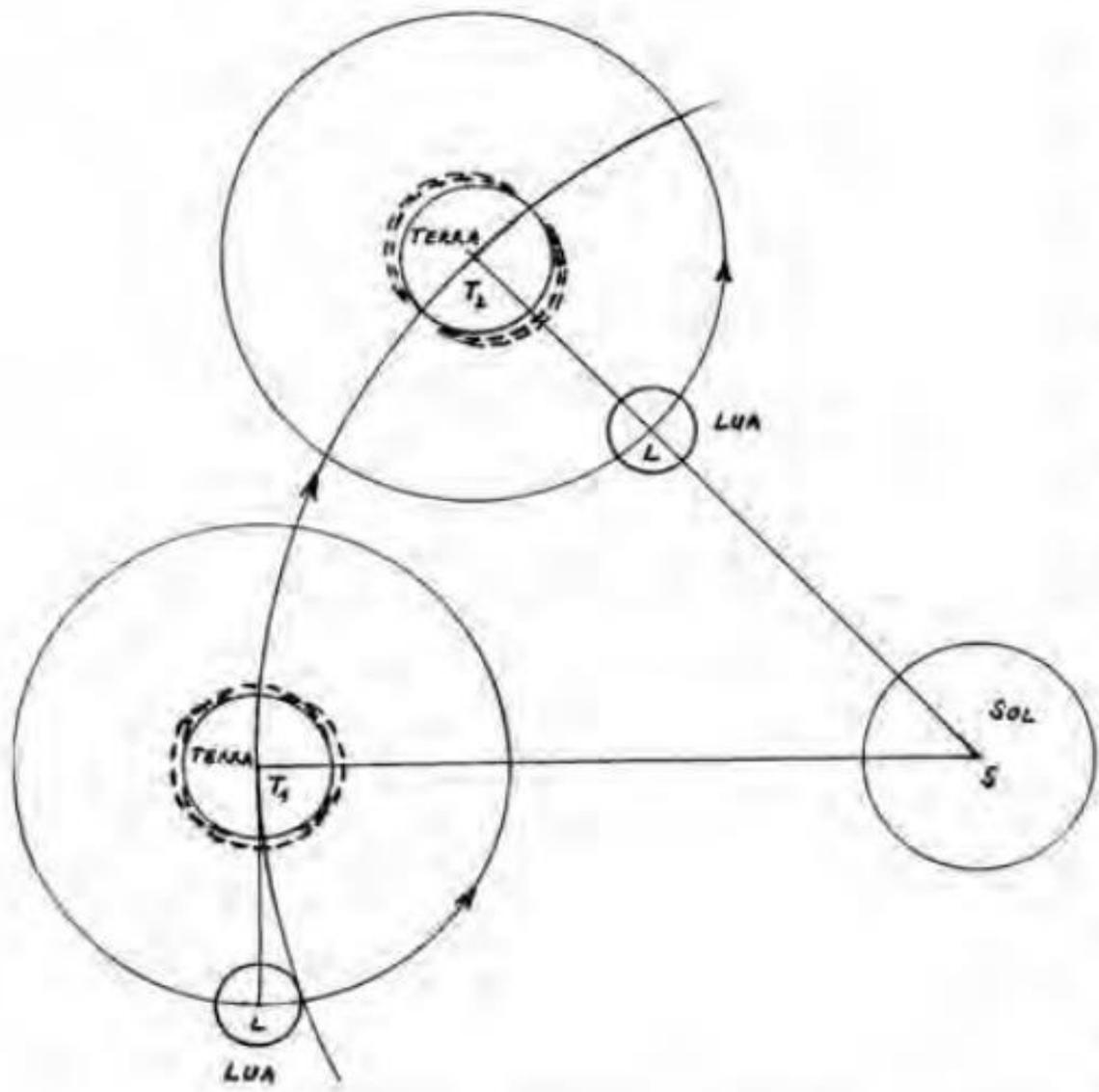


**Figura 13.** Marés-mortas. Fonte: Hicks. **Understanding tides.** US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

As marés baixas da protuberância solar ocorrem nos momentos das marés altas do lunar. Isso reduz a altura das marés altas compostas. Da mesma forma, as marés altas da protuberância solar ocorrem nas marés baixas do lunar. Isso aumenta a altura das marés baixas compostas. Portanto, ocorrem amplitudes de maré menores que a média, chamadas de marés-mortas (*neap tides*). A variação entre as marés-vivas e marés-mortas é de cerca de 20%. (Hicks, 2006).

Determinada a participação de cada uma das luminárias na produção das marés pode-se, por um lado, reiterar a explicação cartesiana do atraso diário das marés pela combinação do movimento da Lua em torno da Terra e da rotação terrestre e, por outro lado, explicar o período mensal com base nas posições relativas do Sol e da Lua. Assim, no primeiro caso, como a Lua gira em torno da Terra enquanto esta faz uma rotação

sobre si mesma, é preciso um pouco mais do que 24 h (cerca de 50 min a mais), para que a Lua se encontre novamente na vertical do mesmo meridiano, ou seja, se a maré for alta ao meio-dia de um certo dia, ela será alta um pouco antes das 13 h do dia seguinte (Mariconda, 2011, p.858, cf. p.859, para a explicação cartesiana). Quanto ao período mensal, podemos representá-lo esquematicamente com o auxílio da figura 14, na qual estão representadas duas posições relativas do Sol e da Lua.



**Figura 14.** Período mensal das marés explicada por Newton. Fonte: Mariconda, 2011, p.856-858.

Quando a Terra está em T<sub>1</sub>, o Sol e a Lua estão em quadratura e, no caso representado pela figura, a Lua está em quarto minguante. Quando a Terra está em T<sub>2</sub>, o Sol e a Lua estão em conjunção e a Lua é Nova. No primeiro caso, a ação gravitacional do Sol e a da Lua sobre as águas opõem-se, resultando uma maré de intensidade

mínima. No segundo caso, a ação gravitacional do Sol e a da Lua concorrem, resultando uma maré de intensidade máxima. Como diz Newton:

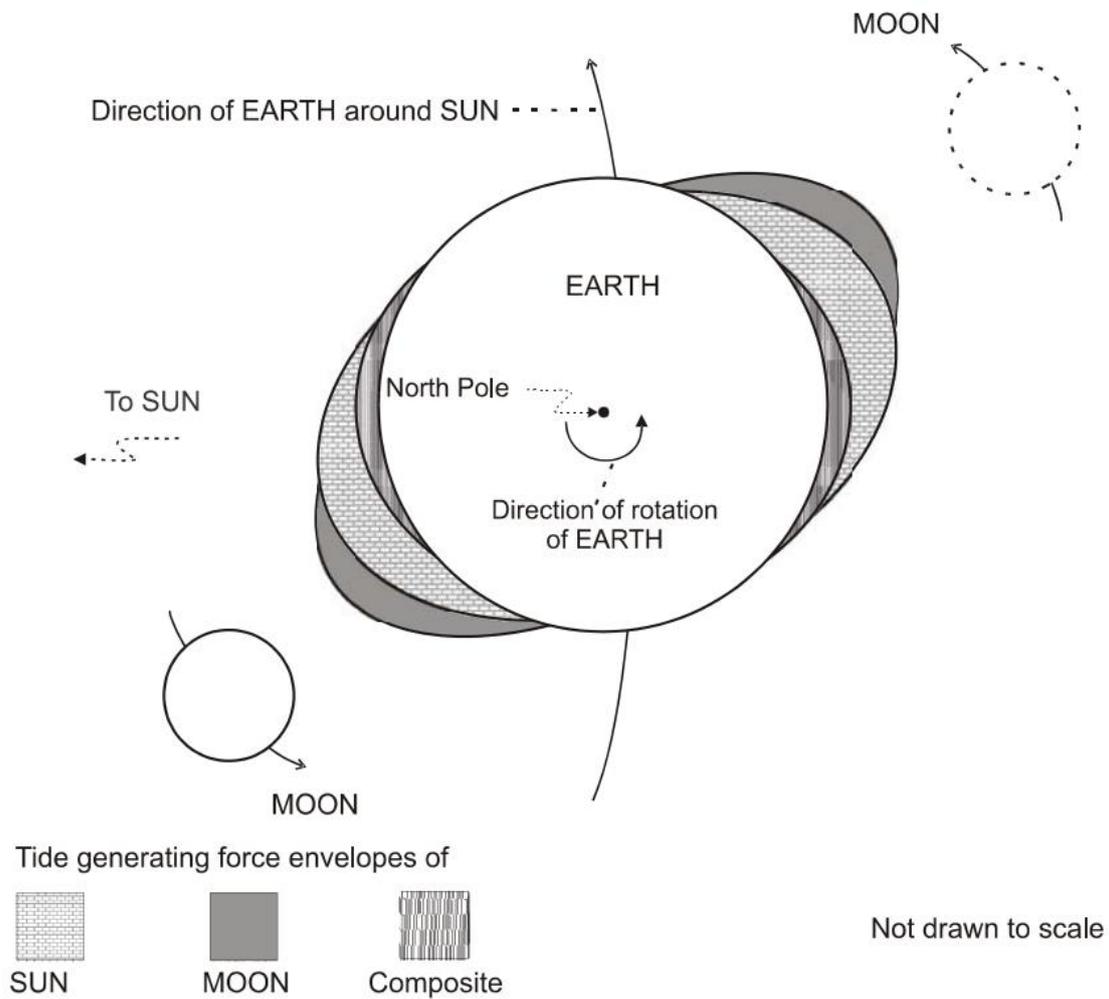
"os dois movimentos, que as duas luminárias excitam, não serão discernidos separadamente, mas causarão o que se poderia chamar um movimento composto. Na conjunção ou na oposição das luminárias, seus efeitos serão combinados e o resultado será o fluxo e refluxo máximo. Nas quadraturas, o Sol levantará a água enquanto a Lua a abaixa e abaixará a água enquanto a Lua a levanta; e a mais baixa de todas as marés originar-se-á da diferença entre esses dois efeitos" (Newton, 1999, Livro III, Proposição 24, p.835).

Cabe, entretanto, notar que, em virtude do plano de rotação da Lua em torno da Terra não coincidir com o plano de rotação da Terra em torno do Sol, ou seja, da órbita lunar ter uma inclinação de  $5^{\circ} 8'$  com relação ao plano da eclíptica<sup>105</sup>, nem sempre a Lua Cheia e a Lua Nova coincidem com um alinhamento perfeito da Lua, da Terra e do Sol, de modo que, na maioria das vezes, a Lua atrai ligeiramente mais para seu lado do que o Sol e os efeitos das duas luminárias não podem ser exatamente acrescentados (Mariconda, 2011, p.859).

Além das mudanças na amplitude da maré, o fenômeno de maré de sizígia também causa mudanças quando ocorrem as fases de maré alta e baixa da maré lunar. À medida que a Lua Nova passa para Crescente ou da Lua Cheia para o Minguante, a envoltória solar está atrás da Lua, de modo que o composto é retardado. Assim, à medida que a Terra gira, as fases de maré alta e baixa do composto ocorrem mais cedo do que apenas com a envoltória lunar. Isso é chamado de "*priming*", mostrado na figura 15.

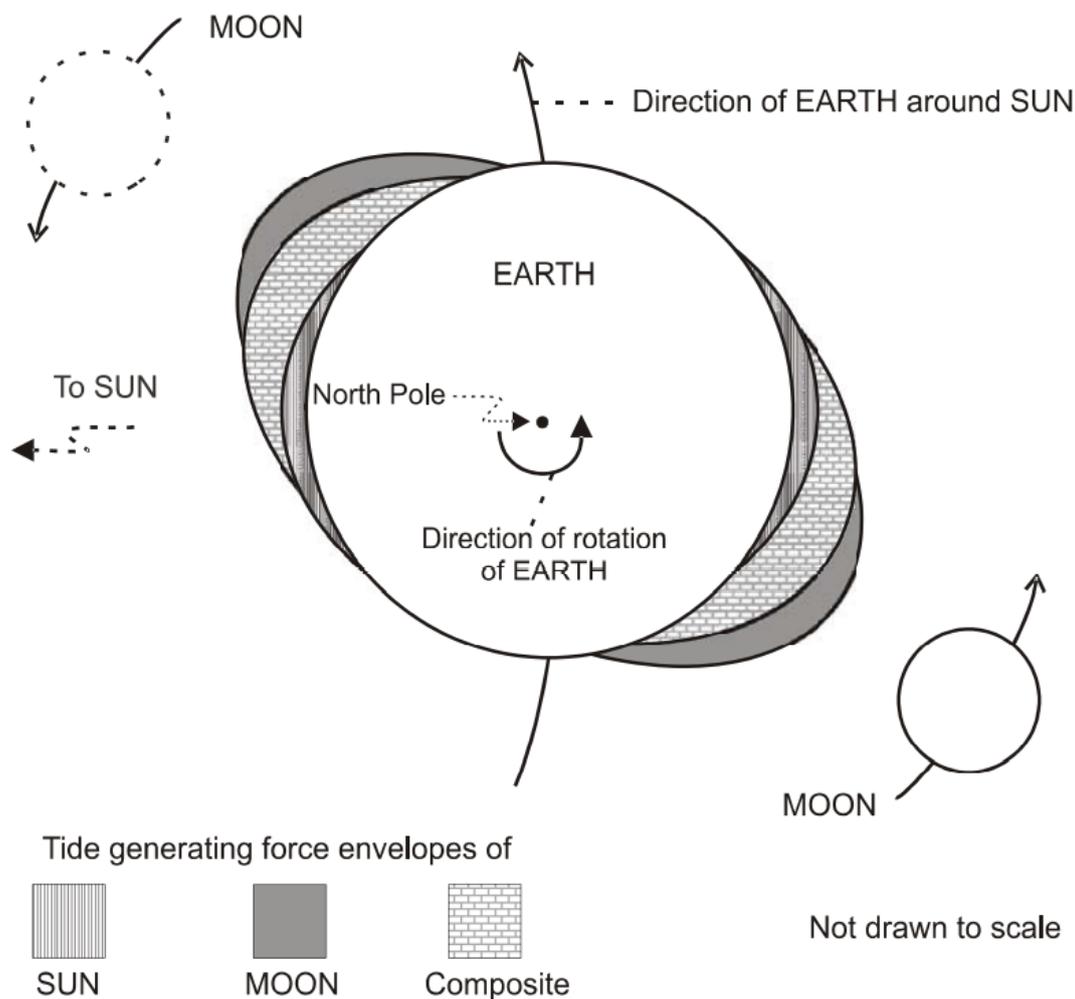
---

<sup>105</sup> Tonel e Marranghello (2013) salientam que esta inclinação varia ao longo de um período de 18,6 anos. Esta variação faz com que a inclinação da órbita da Lua, com relação ao plano terrestre varie entre  $5,15^{\circ}$  e  $-5,15^{\circ}$ . Como o eixo de rotação da Terra também está inclinado com relação à sua órbita ( $23,5^{\circ}$ ), a inclinação da órbita da Lua com relação ao equador terrestre varia entre  $28,65$  ( $23,5^{\circ} + 5,15^{\circ}$ ) e  $18,35^{\circ}$  ( $23,5^{\circ} - 5,15^{\circ}$ ).



**Figura 15.** *Priming*. Fonte: Hicks. **Understanding tides**. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

Da mesma forma, à medida que a Lua Crescente passa para a Lua Cheia ou de Minguante para Nova, a envoltória solar está à frente da lunar, de modo que o composto é acelerado. Assim, à medida que a Terra gira, as fases de maré alta e baixa do composto ocorrem mais tarde do que apenas com a envoltória lunar. Isso é chamado de "*lagging*", ilustrado na figura 16.



**Figura 16.** *Lagging*. Fonte: Hicks. **Understanding tides**. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

Quanto ao período anual, devido a sua complexidade, limitar-se-á aqui a indicar os dois principais fatores dos quais ele depende. Primeiro, como os efeitos das duas luminárias, o Sol e a Lua, dependem de suas distâncias da Terra, as marés altas e baixas dependem do perigeu e apogeu da Lua e do periélio e afélio da Terra. As marés máximas anuais dependem, então, da coincidência entre o perigeu da Lua e o periélio da Terra e, por outro lado, as marés mínimas anuais dependem da coincidência entre o apogeu da Lua e o afélio da Terra. Segundo a declinação desses astros, ou seja, a distância angular entre eles e o plano do equador, altera significativamente a ação de suas forças gravitacionais sobre as águas. Assim, quando esses astros se afastam do equador em direção ao polo, aumentando sua distância angular, seus efeitos devem diminuir pouco a pouco. Em particular, isso explica as diferenças entre as marés

equinociais e solsticiais, porque, nos equinócios (de primavera e de outono), o Sol se encontra no ponto em que o plano da eclíptica intercepta o plano do equador e, desse modo, sua ação gravitacional sobre as águas resulta máxima; mas, nos solstícios (de verão e de inverno), o Sol se encontra em seu maior afastamento angular do equador e, desse modo, sua ação gravitacional sobre as águas resulta mínima. Como, entretanto, o período anual depende da combinação dos dois fatores expostos, o ciclo das marés é razoavelmente complexo e completa-se no intervalo de vários anos (Mariconda, 2011, p.859).

Finalmente, Newton também levou em consideração os fatores locais que complicam o fluxo e refluxo do mar. Um desses fatores é a "força de reciprocção das águas", que é o ímpeto conservado pela massa líquida quando os efeitos do Sol e da Lua cessam. A inércia das águas mantém o movimento de vai-e-vem e perturba o desenvolvimento das marés, pois o movimento gerado por uma passagem da Lua pelo meridiano interfere na maré seguinte. Outro fator importante é a situação geográfica das costas, pois os fundos baixos criam atritos que retardam o avanço das águas, alongando o período "normal" de seis horas. A "onda primária" da maré pode propagar-se seguindo caminhos diferentes, podendo dividir-se e chegar ao mesmo lugar por diferentes vias. Quando essas ondas se encontram, elas se adicionam ou se subtraem, aumentando ou diminuindo o efeito da "onda primária". Newton discute em detalhes, na Proposição 24 do Livro III do Principia, as marés do porto de Batsha, no atual Vietnã. A particularidade das marés de Batsha é a existência de uma maré alta e baixa a cada 24 horas, ao invés de duas como previsto pela teoria. Newton utiliza pela primeira vez o princípio de interferência em sua explicação das marés de Batsha (cf. Cohen, 1999, p.240). Em suma, a explicação consiste em mostrar que

"uma maré é propagada a partir do oceano através de diferentes canais até o mesmo porto e passa mais rapidamente por alguns canais do que por outros; neste caso, a mesma onda, dividida em duas ou mais ondas que chegam sucessivamente, pode compor novos movimentos de tipos diferentes" (Newton, 1999, p.838).

A limitação da explicação gravitacional das marés consiste basicamente em que Newton propõe uma teoria "estática" das marés que leva em consideração somente o aspecto de equilíbrio das forças gravitacionais envolvidas, negligenciando o aspecto "dinâmico", representado basicamente pela "inércia e [pelos] atritos", que têm,

entretanto, forçosamente um papel primordial nas velocidades colocadas em jogo pela rotação da Terra” (Maury, 1999, p.609).

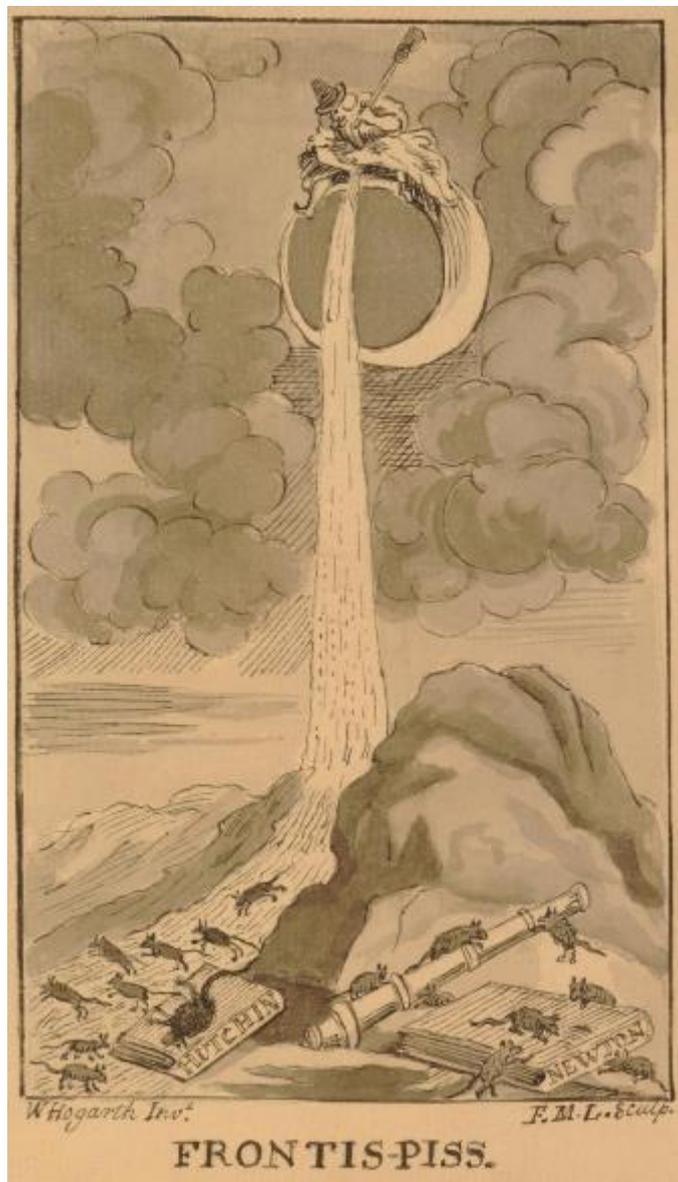
“Newton fracassou em entender que a análise das forças gravitacionais da maré é apenas uma parte do problema, correspondendo a outra parte a um entendimento da natureza das respostas a essas forças das marés e dos efeitos da rotação da Terra” (Cohen, 1999, p.240).

Em suma, as marés oceânicas, são um fenômeno complexo produzido pelo imbricamento de dois conjuntos de fatores causais: de um lado, as forças gravitacionais do Sol e da Lua geradoras de um efeito primário de maré; de outro lado, as respostas específicas das águas oceânicas sob as condições delimitadas pelo movimento de rotação da Terra e pela situação geográfica local. Burstyn insiste nesse imbricamento causal, para ressaltar o aspecto positivo da contribuição de Galileu:

“Nossa explicação corrente vê as marés como um fenômeno ondulatório primariamente local, a resposta das bacias oceânicas de tamanhos, formas e profundidades variáveis às forças geradoras das marés da Lua e do Sol. A maré, em qualquer bacia oceânica dada, é peculiar àquela bacia e é resultante das oscilações de período-fixo devidas às forças geradoras das marés e às oscilações de período-livre devidas à configuração da própria bacia. Em outras palavras, embora o oceano seja posto em movimento pelas forças geradoras das marés que variam periodicamente, uma vez posto em movimento, ele tende a oscilar por sua própria inércia com um período que pode diferir daquele das forças geradoras das marés. Mas esta é substancialmente a concepção de Galileu dos fenômenos das marés, embora seu fracasso em entender a atração gravitacional tenha conduzido a ideias incorretas sobre as forças de geração das marés e seus períodos.” (Burstyn, 1962, p.164 *apud* Mariconda, 2011, p.861).

Embora muitas pessoas acreditem que as ideias de Newton foram aceitas rapidamente, a realidade é que pelo menos nos cinquenta anos seguintes à sua publicação, havia muitas explicações concorrentes sendo propostas e a teoria de Newton não era unanimidade (van Lunteren, 1993). De fato, em 1692, o *The Gentlemen's Journal* listou 10 explicações concorrentes para as marés, o que indica que havia muitas opiniões divergentes sobre o assunto (Roos, 2001). A teoria de Newton foi promovida por seus apoiadores no mundo científico, como Edmond Halley, mas ainda assim houve

reações contrárias de outras direções. Na Inglaterra, por exemplo, surgiu o movimento Hutchinsoniano, nomeado após John Hutchinson (1724-1770) (Wilde, 1980; Aston, 2008), que se opunha ao domínio cultural da física newtoniana, a qual consideravam a "religião de Satanás" (figura 17).



**Figura 17.** Imagem projetada por William Hogarth para um panfleto contra os Hutchinsonianos em 1763. Na imagem, uma bruxa está sentada no topo de uma Lua Crescente e urinando em uma cascata que atinge uma cópia encadernada do livro "Hutchin" (o *Moses's Principia* de 1724 e 1727 por John Hutchinson), e afogando um grupo de ratos pretos, que simbolizam os seguidores de Hutchinson. Enquanto isso, alguns dos ratos estão tentando roer em vão a filosofia de Newton, representada por uma cópia encadernada do livro "Newton" (*Principia*) e um telescópio. Disponível em: < [https://www.britishmuseum.org/collection/object/P\\_Cc-2-255](https://www.britishmuseum.org/collection/object/P_Cc-2-255) >. Acesso em 04/04/2023.

Em vez disso, eles alegaram que a verdade estava no texto hebraico original do Antigo Testamento. A principal objeção pessoal de Hutchinson à filosofia newtoniana era sobre o uso da força como um conceito explicativo sem atribuir uma causa mecânica, um aspecto da gravidade que preocupava o próprio Newton (Aiton, 1969; Wilde, 1980). Levaria um século após os *Principia* de Newton para que o movimento Hutchinsoniano morresse.

Esta exposição das principais teorias das marés do século XVII permite algumas considerações finais. Em primeiro lugar, destaca-se a distância conceitual entre as explicações qualitativas baseadas em alguma influência da Lua sobre as águas e a teoria newtoniana que propõe uma causa baseada na atração gravitacional, uma propriedade universal da matéria. Além disso, é importante notar que a teoria newtoniana, ao contrário das explicações qualitativas, é matemática e mecânica, o que representa a realização da mecanização da imagem do mundo preconizada por Galileu e Descartes. Em continuação, pode-se observar que a hipótese do movimento de rotação da Terra, embora rejeitada pela Igreja Católica na época de Galileu, tornou-se uma hipótese tácita e consensual no patrimônio científico adquirido do século XVII<sup>106</sup>. É interessante notar que, além da aceitação do movimento de rotação da Terra como hipótese explicativa para o atraso diário das marés, a teoria de Newton sobre a gravidade e as marés introduziu uma nova maneira de conceber a natureza, a partir de uma perspectiva mecanicista e matemática. Isso representa um afastamento das explicações qualitativas baseadas em alguma modalidade de predomínio ou influência da Lua sobre as águas, e evidencia a realização da mecanização da imagem do mundo preconizada pelas explicações de Galileu e Descartes. Portanto, as teorias das marés no século XVII, incluindo a teoria newtoniana, contribuíram significativamente para o desenvolvimento da ciência e para a construção de uma nova perspectiva sobre a natureza, marcada pela ênfase na matematização e na mecanização. Além disso, a aceitação da hipótese do movimento de rotação da Terra como causa secundária das marés também representa um importante marco na história da ciência, evidenciando a progressiva superação das concepções geocêntricas e a emergência de um novo paradigma científico, baseado na

---

<sup>106</sup> Para Galileu, trata-se de mostrar que as marés são uma prova do movimento da Terra, por meio de uma argumentação que vai do efeito para a causa; para Descartes e Newton, o movimento de rotação da Terra é apenas uma causa secundária, assumida hipoteticamente para explicar um efeito particular das marés (Mariconda, 2011, p.860).

observação empírica e na experimentação. Fleck e Biehl construíram um quadro (ver quadro 1, Fleck e Biehl, 2014, p.119), compilando as teorias sobre marés vigentes no século XVII dos principais cientistas dessa época, se assim pudermos nos expressar, categorizando tais explicações em termos da periodicidade das marés, ou seja, o ciclo diário, mensal e anual das marés. Como esse quadro apenas inseri as contribuições de Bacon, Galileu, Descartes e Newton, pode ser útil ao professor para se ter uma primeira ideia geral de suas teorias.

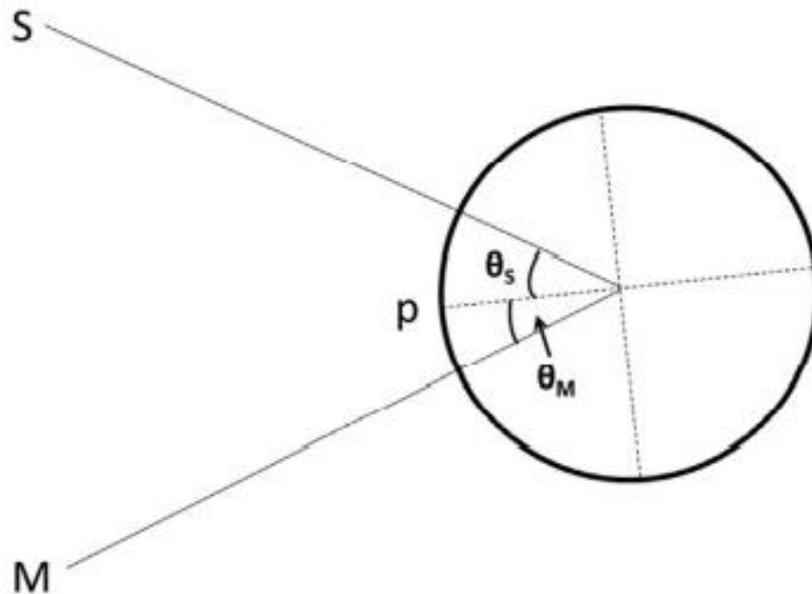
As descobertas que marcaram a época de Newton significaram que uma base havia sido construída para um tratamento matemático das marés. Em 1740, a *Académie Royale des Sciences* na França concedeu a quatro ganhadores um prêmio pelo melhor ensaio filosófico sobre a “cheia e vazante do mar” (Cartwright, 1999). Um deles era **Colin Maclaurin (1698 - 1746)**, professor de geometria na Universidade de Edimburgo, e outro era **Daniel Bernoulli (1700 - 1782)**, professor de anatomia e botânica em Basel. Eles podem servir como exemplos de quão bem conectados os cientistas estavam agora e de como seus desenvolvimentos da teoria de Newton levariam a melhorias práticas no fornecimento de informações sobre as marés (Woodworth, 2023, p.24).

Maclaurin provou o que Newton presumiu intuitivamente, que a forma de um oceano esférico em equilíbrio estático com a força das marés induzida por um corpo perturbador (ou seja, a Lua ou o Sol) é um esferoide prolato (formato parecido como o de uma bola de rúgbi com um eixo de simetria alongado), cujo eixo principal aponta para o corpo. O *Traite Sur le Flux et le Reflux de la Mer* (Tratado sobre o fluxo e refluxo do mar) de Bernoulli estendeu o ensaio de Maclaurin, embora na época ele desconhecia a contribuição de Maclaurin (Aiton, 1955b). Seu ensaio introduziu a chamada Teoria do Equilíbrio, que descreve a estrutura temporal e espacial da maré de equilíbrio devido à combinação da Lua e do Sol. Em outras palavras, Bernoulli combinou os dois esferoides prolatos individuais em uma forma geral e introduziu as órbitas lunar e solar e a rotação da Terra na discussão, de modo que a dependência temporal da maré de equilíbrio em qualquer ponto da superfície da Terra pudesse ser parametrizada (figura 18).<sup>107</sup> Bernoulli usou sua fórmula para construir sua tabela, (ver

---

<sup>107</sup> Um diagrama semelhante com mais detalhes nas equações matemáticas pode ser encontrado em Aiton, 1955b. The contributions of Newton, Bernoulli and Euler to the theory of tides. *Ann. Sci.*, 11, 206–223. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00033795500200215>. Acesso em 24/04/2023.

Fig. 5 de Aiton, 1955b), mostrando as alturas relativas das marés para as várias fases da lua.



**Figura 18.** Diagrama de Bernoulli para os parâmetros da maré de equilíbrio combinada devido ao Sol (S) e à Lua (M). A maré combinada no ponto **p** é dada por

$$h \left( \cos \theta_s^2 - \frac{1}{3} \right) + H \left( \cos \theta_M^2 - \frac{1}{3} \right).$$

Para uma tábua de maré, basta saber as proporções relativas da maré semidiurna solar e lunar naquele local ( $h$  e  $H$ , respectivamente) com os ângulos  $\theta_s$  e  $\theta_M$  obtidos no Almanaque Náutico. Fonte: Woodworth, P. L. *Tidal science before and after Newton*. In: **A Journey Through Tides**. Elsevier, 2023. p.26

(Adaptado de um diagrama em Cartwright, 1999. *Tides: A Scientific History*.

Cambridge University Press: Cambridge, p.292.

Bernoulli também descobriu que Newton havia superestimado a razão entre as marés lunar e solar; usando observações francesas, chegou a um valor de 2,5, próximo das estimativas modernas (Ekman, 1993). Como sabemos agora, a variação espacial da maré no oceano real é muito mais complicada do que a da maré de equilíbrio por causa da dinâmica do oceano, mas Bernoulli descobriu que sua variação temporal em qualquer local com marés predominantemente semidiurnas (que inclui a maior parte da costa atlântica europeia) pode ser parametrizada em termos da maré de equilíbrio para uma boa aproximação com um pequeno número de ajustes. Como resultado, ele foi capaz de calcular uma tabela de marés genérica para tais locais (ver Fig. 5.4 de Cartwright, 1999).

Em 1744, o físico francês **Jean le Rond d'Alembert (1717 - 1783)** estudou a aplicação das equações de maré à atmosfera terrestre, sem contudo incluir os efeitos a rotação da Terra. O trabalho de d'Alembert na *Encyclopédie* (Enciclopédia), combinado com suas impressionantes realizações matemáticas, permitiu que ele entrasse em círculos políticos que muitos acadêmicos só poderiam sonhar. Em 1746, um artigo apresentado por d'Alembert, que envolvia ventos planetários e a tentativa de explicar as marés atmosféricas, ganhou o prêmio da Academia de Berlim, e ele foi reconhecido por Frederico II, "O Grande", como um dos principais matemáticos da Europa. Pelo resto de sua vida, d'Alembert permaneceria um dos correspondentes favoritos do rei prussiano, e "a admiração de d'Alembert pelo rei-filósofo é [era] tão sincera quanto [era] ilimitada" (McGee, 2008, p.8).

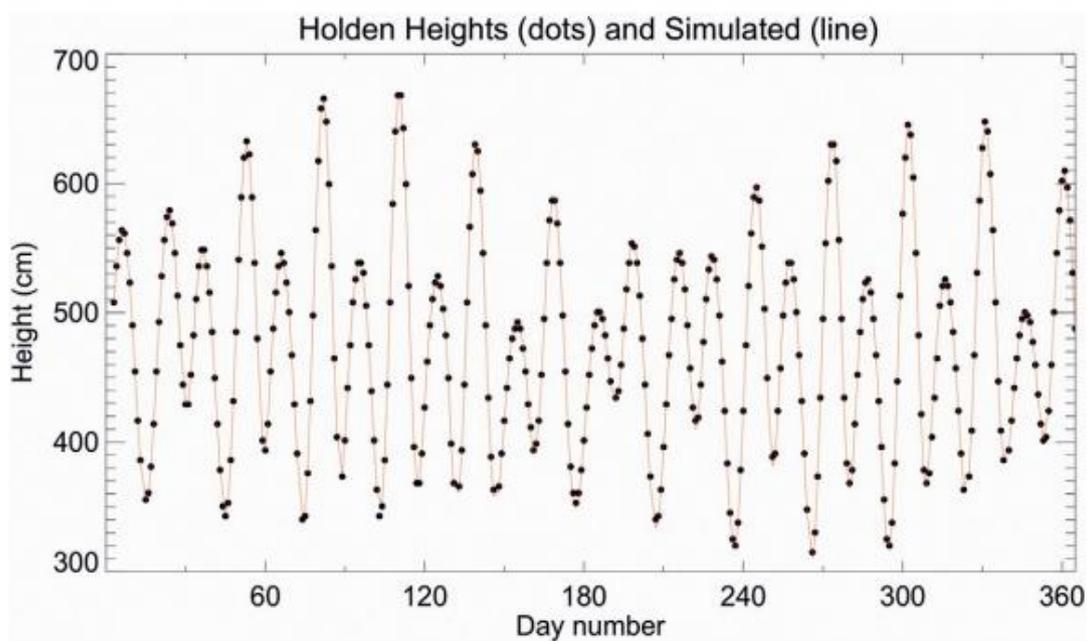
Um fator importante em relação ao método de Bernoulli foi a publicação do *Nautical Almanac* (Almanaque Náutico) sob a direção do quinto astrônomo real **Nevil Maskelyne (1732 - 1811)**, que tinha seus próprios interesses nas marés oceânicas. Como é sabido, o Almanaque Náutico foi publicado principalmente para fins de navegação no mar usando o método de "distâncias lunares". No entanto, as tabelas de parâmetros lunares e solares contidas nas edições de 1767 e posteriores estavam em uma forma ideal para aplicação ao método de Bernoulli (Woodworth, 2023, p.26). Como resultado, logo após a publicação do primeiro Almanaque Náutico, encontra-se a primeira tabela de marés confiável e de acesso público sendo produzida para o porto de Liverpool<sup>108</sup> pelos irmãos **Richard (1718 - 1775)** e **George Holden (1723 - 1793)**<sup>109</sup>,

---

<sup>108</sup> Por muitos anos, Liverpool tem sido reconhecida como um polo de estudos sobre as marés, sendo considerada o berço da ciência de marés e nível do mar. É possível descobrir mais sobre os heróis locais que contribuíram para essa área e explorar como as observações e pesquisas realizadas desde o século XVII tornaram Liverpool um porto de importância global e uma cidade excepcional, sendo hoje um centro de cultura, comércio e inovação que continua a expandir os limites da ciência oceânica e muitas outras áreas. Veja mais em: <<https://tide-and-time.uk/tidal-science-liverpool>>. Acesso em 21/04/2023.

<sup>109</sup> A partir de 1770, os irmãos Richard e George Holden publicaram algumas das primeiras tabelas de marés de alta qualidade e acessíveis ao público no Reino Unido. Suas tabelas de Liverpool continuaram a ser produzidas por membros da família por quase 100 anos, e o *Holden Almanack and Tide Table* foi publicado por diferentes proprietários por mais um século. Essas tabelas de previsão de marés eram tão melhores do que as disponíveis anteriormente que têm um lugar pequeno, mas importante, na história da ciência de marés do Reino Unido. Elas são de interesse especial, uma vez que surgiram em um período que, de outra forma, foi descrito como a "calmaria da ciência de marés do Reino Unido", quando os desenvolvimentos pós-Newton neste país eram modestos e a liderança intelectual do campo tinha passado para a Europa (Woodworth, 2002). Para estudos mais profundos sobre a biografia desses autores e suas contribuições nas construções das tabelas de marés, veja: Woodworth. **Three Georges and one Richard Holden: the Liverpool tide table makers**. Historic Society of Lancashire and Cheshire, 2002; Woodworth. **Some further biographical details of the Holden tide table makers**. 2003 e Proudman Oceanographic Laboratory Report N.º. 58. Um último comentário quando à data de nascimento desses irmãos: Woodworth (2002) comenta que os registros paroquiais mostram que Richard foi o primeiro filho

ajustada a partir do método genérico de Bernoulli graças à disponibilidade de 4 anos de observações por **William Hutchinson (1715 - 1801)**, o administrador do porto de Liverpool. A família Holden tentou manter os detalhes de seu método em segredo por muitos anos. No entanto, finalmente foi mostrado por Woodworth (2002) que se trata simplesmente de uma versão daquele especificado por Bernoulli (figura 19).



**Figura 19.** Alturas das preamares diurnas para 1795 a partir das tabelas de Holden (pontos) e calculadas por Woodworth (2002) usando o método de Bernoulli (linha) (Woodworth, *Three Georges and one Richard Holden: The Liverpool tide table makers*. Trans. Hist. Soc. Lancashire Cheshire, 151, 19–51, 2002).

As importantes conexões entre os personagens individuais dessa história podem ser demonstradas por referência a **James Ferguson (1797 - 1867)**, que era um astrônomo, eleito membro da Royal Society em 1763. Ele escreveu vários tratados astronômicos, dos quais um contém um “exercício” para a construção de um relógio de maré (Ferguson, 1773). Ele ganhava a vida viajando pelo país e apresentando longas séries de palestras sobre assuntos científicos. Ele visitou Liverpool em várias ocasiões e geralmente ficava na casa de Hutchinson. Acredita-se que Ferguson foi a pessoa que encorajou Hutchinson a começar suas medições de maré. Ele era um amigo de longa data de Maclaurin, com quem ele havia contatado pela primeira vez sobre aspectos da

---

deles, batizado em 9 de março de 1718. O estilo moderno de datas foi utilizado em todo o texto. Os registros paroquiais ocasionalmente fornecem a data de nascimento, bem como o batismo, mas não neste caso.

astronomia. Ferguson e Maclaurin também estavam ligados por **Murdoch Mackenzie (1712 - 1797)**, um nativo das Órcades e um “inspetor marítimo muito viajado”. Mackenzie iniciou sua carreira em hidrografia por conselho de Maclaurin, e Maclaurin o recomendou para a tarefa de pesquisar as Orkneys (Órcades)<sup>110</sup>, onde fez suas próprias observações sobre as marés (Mackenzie, 1749). Ferguson e Mackenzie se conheceram em Edimburgo e eram muito próximos, Ferguson nomeou seu terceiro filho em homenagem a Mackenzie, e ambos foram chamados de protegidos de Maclaurin (Millburn, 1988). Acredita-se que Mackenzie foi a pessoa que apresentou Ferguson a Hutchinson. Por sua vez, Hutchinson era amigo ou colega próximo de Richard Holden, como demonstrado por seus interesses comuns em astronomia e na invenção de refletores de farol (Woodworth, 2002).

Enquanto os ensaios de Maclaurin e Bernoulli podem ter levado a benefícios práticos, os de **Leonhard Euler (1707 - 1783)**, professor de matemática em São Petersburgo, e **Antoine Cavalleri (1698 - 1765)**, professor de matemática em Cahors, foram menos úteis em retrospecto. No entanto, todos os quatro ensaios poderiam pelo menos ter o mérito de ter aprendido com o que veio antes. Euler mostrou que era a componente horizontal, e não vertical, do campo de força que levava ao movimento das marés (Aiton, 1955b). O ensaio de Cavalleri baseou-se na obra de Descartes, embora ele discordasse da teoria anterior devido à falta de uma contribuição importante das marés solares. Ele também discordou da teoria da gravitação de Newton e, em vez disso, perseverou em um desenvolvimento infrutífero da teoria cartesiana dos vórtices. Aiton fornece uma discussão detalhada da teoria do vórtice dos movimentos planetários (Aiton, 1957, 1958a, 1958b). Ele observa que Cavalleri não tinha nada realmente novo a acrescentar a esse assunto (Aiton, 1958b; cf. Woodworth, 2023).

Até agora, foi apresentada uma breve comparação das ideias contrastantes sobre as marés nos períodos pré e pós-Newton. As teorias anteriores eram frequentemente especulativas, sem rigor matemático ou qualquer outra base. Meio século depois, como evidenciado pelos ensaístas parisienses, especialmente Bernoulli e Maclaurin, mas todos os quatro até certo ponto, havia uma maior disposição em basear as teorias em observações e no trabalho anterior de outros pesquisadores. Bernoulli, em particular, beneficiou-se de sua pesquisa para criar uma tabela de marés genérica, aplicável em qualquer lugar do mundo com regime de maré semidiurno. No entanto, mostramos que

---

<sup>110</sup> São um arquipélago localizado no Mar do Norte, cerca de 16 km ao largo do Norte da Escócia.

a aceitação das teorias de Newton não foi universal e imediata. Além disso, após as realizações de Newton e Halley, as investigações das marés se tornaram em grande parte uma atividade da Europa continental e não da Inglaterra, culminando no final do século na teoria dinâmica das marés de Laplace com as marés consideradas como fluidos em movimento em uma Terra em rotação (Woodworth, 2023). O *Traité de Mécanique Celeste* (Tratado de Mecânica Celeste) de Laplace, escrito em cinco partes, entre 1798 e 1825, pode ser considerado quase tão importante para o estudo das marés quanto os *Principia* de Newton. De fato, apontou que as Equações de Maré de Laplace (Laplace, 1775, 1776) podem ser consideradas como a primeira formulação de um modelo oceânico, neste caso um modelo de maré (Marmer, 1922, Ekman, 1993, Arbic, 2022). Enquanto isso, na Inglaterra, houve uma “estagnação da ciência das marés no Reino Unido” até o trabalho durante o século XIX pelos cientistas do Reino Unido (Rossiter, 1971). Iniciativas na medição das marés, bem como na teoria das marés, passaram para a Europa continental, especialmente a França, depois de Newton.

Os tempos e alturas das marés altas e baixas foram registrados em Brest entre 1711 e 1716, que foram enviados para análise por **Jacques Cassini (1677 - 1756)** na Academie Royale des Sciences. Medições posteriores também foram feitas em Brest e portos vizinhos. Cassini interpretou esses dados como suporte para a teoria das marés de Descartes. Cartwright (1972) e Wöppelmann et al. (2006) discutem seu uso em análises modernas. Medições estendidas de águas altas na Inglaterra tiveram que esperar as de William Hutchinson em Liverpool em 1764-1793 (Woodworth, 2023, p.29). No século XVIII, marinheiros europeus entendiam as marés em termos de apenas dois parâmetros: subida/descida e água alta completa/mudança (também conhecido como estabelecimento). O estabelecimento é o atraso entre o trânsito da Lua pelo meridiano e a próxima maré alta durante a sizígia. As informações sobre isso foram registradas nas tabelas de **Jérôme Lalande (1732 - 1807)**, em 1781. Alguém poderia pensar que a possibilidade de marés diurnas em locais distantes seria conhecida pela maioria dos capitães na época da viagem de Cook, um século depois do relatório de Davenport. Os fabricantes da tabela de marés de Holden nessa época certamente sabiam que as marés noturnas em Liverpool eram mais baixas do que as diurnas de novembro a abril (e vice-versa), principalmente devido ao atraso de fase local da constituinte diurna  $K_1$  com uma amplitude de 11 cm, e fizeram um ajuste apropriado para suas “previsões de Bernoulli”

(Woodworth, 2002)<sup>111</sup>. A desigualdade diurna seria futuramente um aspecto importante da pesquisa das marés por Whewell e outros no século XIX (Woodworth, 2023).

Apesar dos avanços na formulação matemática do fenômeno das marés, as previsões calculadas no século XVIII eram imprecisas. Somente a partir do século XIX, com o aumento do conhecimento sobre a mecânica das oscilações forçadas em líquidos em movimento e do conhecimento mais preciso das massas dos corpos celestes envolvidos, as previsões foram ganhando precisão gradualmente. Um exemplo dessas dificuldades ocorreu em 1770, quando a barca *HMS Endeavour*, comandada por **James Cook (1728 - 1779)**, encalhou na Grande Barreira de Coral. Na tentativa de colocar o navio em flutuação na preamar seguinte, eles falharam, mas na enchente que se seguiu, o navio foi levantado o suficiente para ser facilmente retirado do encalhe. Cook aproveitou a oportunidade para observar os ciclos de maré por um período de sete semanas, notando que, durante as marés mortas, ambas as marés do dia eram semelhantes, mas durante as marés vivas, a maré subia 2,1 m no ciclo da manhã e 2,7 m ao anoitecer (Thomson, 1819; Woodworth; Rowe, 2018).

Voltemos, pois, à parte que culmina nas teorias dinâmicas das marés. A descoberta de uma teoria matemática das marés foi feita por **Pierre de Laplace (1749 - 1827)**, o matemático e astrônomo francês. Ele introduziu o potencial das marés, em uma teoria apresentada à Royal Academy of Sciences, em Paris, em 1775. Mais tarde, ele ampliou consideravelmente essa teoria e a incluiu em seu Tratado da Mecânica Celeste. Ekman (1993) afirma que na figura 20, pode-se encontrar a "fórmula das marés de Laplace", expressando o potencial de maré em função da latitude, declinação e ângulo horário<sup>112</sup>, conforme a figura 20.

---

<sup>111</sup> Para um estudo mais detalhado e bem didático em sua apresentação, veja: Kvale. Tidal constituents of modern and ancient tidal rhythmites: criteria for recognition and analyses. In: **Principles of tidal sedimentology**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p.1-17 e Lefevre; le Provost; Lyard. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.105, n.C4, p.8707-8725, 2000.

<sup>112</sup> Para um estudo mais detalhado sobre a obtenção das equações diferenciais do movimento de uma partícula do mar sob a atração gravitacional de um astro, como a Lua e o Sol, por Laplace, consulte Durand-Richard (2016), p.111-118. Laplace utiliza a equação geral do equilíbrio de um fluido em movimento e a condição de continuidade do fluido para obter as equações diferenciais, e apresenta as equações no livro IV, capítulo I da Mecânica Celeste.

La partie de  $\alpha V'$  dépendante de l'action de l'astre  $L$ , est par le n°. 4, égale à

$$\begin{aligned} & \frac{L}{4r^3} \cdot \left\{ \sin.^2 \nu - \frac{1}{2} \cdot \cos.^2 \nu \right\} \cdot (1 + 5 \cdot \cos. 2\theta) \\ & + \frac{3L}{r^3} \cdot \sin. \nu \cdot \cos. \nu \cdot \sin. \theta \cdot \cos. \theta \cdot \cos. (nt + \pi - \downarrow) \\ & + \frac{3L}{4r^3} \cdot \cos.^2 \nu \cdot \sin.^2 \theta \cdot \cos. (2nt + 2\pi - 2\downarrow). \end{aligned}$$

Supposons que la partie correspondante de  $\alpha y$ , soit égale à cette quantité multipliée par une indéterminée  $Q$ ; ce produit étant de la forme  $Y^{(s)}$ , ou satisfaisant pour  $Y^{(s)}$ , à l'équation aux différences partielles,

$$0 = \left\{ \frac{d \cdot \left\{ (1 - \mu\mu) \cdot \left( \frac{dY^{(s)}}{d\mu} \right) \right\}}{d\mu} \right\} + \frac{\left( \frac{ddY^{(s)}}{d\pi^2} \right)}{1 - \mu\mu} + 6 \cdot Y^{(s)};$$

la partie de  $\alpha V'$  correspondante à l'action de la couche fluide dont le rayon intérieur étant l'unité, le rayon extérieur est  $1 + \alpha y$ , sera par le n°. 2,  $\frac{4\pi}{5} \cdot Y^{(s)}$ , ou  $\frac{3}{5f} \cdot g \cdot Y^{(s)}$ ; l'équation  $\alpha g y = \alpha V'$ , donnera donc,

$$\begin{aligned} \alpha y = & \frac{L}{4r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5f}\right)} \cdot \left\{ \sin.^2 \nu - \frac{1}{2} \cdot \cos.^2 \nu \right\} \cdot (1 + 5 \cdot \cos. 2\theta) \\ & + \frac{3L}{r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5f}\right)} \cdot \sin. \nu \cdot \cos. \nu \cdot \sin. \theta \cdot \cos. \theta \cdot \cos. (nt + \pi - \downarrow) \\ & + \frac{3L}{4r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5f}\right)} \cdot \cos.^2 \nu \cdot \sin.^2 \theta \cdot \cos. (2nt + 2\pi - 2\downarrow). \end{aligned}$$

Dans l'hypothèse que nous considérons, si le soleil et la lune sont en conjonction avec la même déclinaison; alors, l'excès de la haute mer relative à midi, sur la basse mer qui la suit, sera

$$\frac{3L}{2r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5f}\right)} \cdot (1 + e) \cdot \sin.^2 \theta \cdot \cos.^2 \nu \cdot \{1 + 2 \cdot \text{tang. } \nu \cdot \text{cot. } \theta\},$$

Figura 20. Fórmula das marés de Laplace como aparece no *Mécanique céleste* (1799).

Fonte: Laplace Pierre-Simon de, 1799-1825, *Traité de Mécanique Céleste*, vol. 2, livre

4 (1799), in OC 2, 1878, vol. 5, livre 13 (1825), in OC 5, 1882. Disponível em:

[https://books.google.com.br/books?redir\\_esc=y&hl=fr&id=DcwE1g8xRvMC&q=Supposons#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?redir_esc=y&hl=fr&id=DcwE1g8xRvMC&q=Supposons#v=onepage&q&f=false). Acesso: 04/04/2023.

De acordo com Laplace,

"The three preceding terms give rise to three different types of oscillations. The periods of the oscillations of the first type are very long; they are independent of the rotational motion of the Earth, and depend only on the motion of the celestial body L in its orbit. The periods of the oscillations of the second type depend mainly on the rotational motion  $t$  of the Earth; they are one day approximately. Finally, the periods of the oscillations of the third type depend mainly on the angle  $2t$ ; they are about half a day." (Ekman, 1993, p.590).

Assim, Laplace mostrou que a maré é matematicamente separável em três tipos diferentes de marés: longas periódicas, diurnas e semidiurnas. Desde então, essa separação tem sido a pedra angular da teoria das marés. Além disso, no mesmo trabalho Laplace foi o primeiro a tratar as marés oceânicas como um problema de água em movimento em vez de água em equilíbrio. Ele deduz um conjunto de equações para o movimento de um fluido em 3 dimensões sobre um globo esférico (a Terra), fazendo uso: da equação de continuidade (conservação da massa para líquidos incompressíveis), da equação de movimento de Newton aplicada ao fluido sobre a esfera, e da expressão da força da gravidade de Newton para indicar a ação do astro sobre o fluido, na equação de movimento dele. A força da gravidade é representada em suas equações por um potencial e ele faz um estudo para as soluções dessas equações considerando um potencial escrito como somas de funções trigonométricas, cujos ângulos são funções do tempo; expressa, assim, o potencial como soma de funções periódicas, o que reproduz o comportamento dos astros em relação a um lugar específico da Terra. Ao estudar as soluções possíveis das equações para os potenciais gravitacionais dos astros descritos dessa forma, Laplace identifica que deve haver pelo menos três tipos de ondas de marés, sendo uma delas a de período semidiurno (Dantas, 2020). Suas equações hidrodinâmicas, descrevendo a propagação das ondas de maré através do oceano, não puderam ser resolvidas na prática até a invenção do computador.

A dificuldade de calcular as marés devido às muitas variáveis envolvidas serviu de inspiração e fundamentação para os futuros estudiosos desse fascinante fenômeno. Não somente a "sociedade científica" da época estava preocupada em formular teorias científicas, mas a própria sociedade, a qual dependia dos portos para o deslocamento de pessoas e mercadorias. As observações empíricas e específicas para cada local eram usadas para produzir as tábuas de marés. A descrição teórica de Laplace e o crescimento das observações das marés nas diversas partes do globo contribuíram para uma nova

formulação para o problema das marés, que não devem ser vistas como um fenômeno único, mas compreendidas como fenômenos locais unidos pela força gravitacional do Sol e da Lua. Essa compreensão se aprofundou no século XIX com a ampliação e os métodos de sistematização de dados obtidos sobre características das marés nos diversos oceanos.

“A formulação mais antiga do problema da maré envolveu a determinação da agência por meio da qual a lua controlava a maré. Com o anúncio da lei da gravitação, o problema mudou para derivar uma fórmula matemática para expressar completamente a subida e descida da maré em qualquer ponto em resposta às forças produtoras de maré do sol e da lua, isso envolvendo a suposição de que a maré representa um fenômeno mundial. Agora chegamos a uma mudança adicional no reconhecimento de que os fenômenos das marés, como os encontramos na natureza, envolvem vários problemas. Do jeito que as coisas estão agora, podemos formular os problemas da maré da seguinte maneira: dadas as forças produtoras da maré do sol e da lua e a forma, tamanho, profundidade e localização de uma bacia oceânica ou outro corpo de água; obtenha-se os fenômenos de marés resultantes”. (Marmer, 1922, p.214).

Em 1823, **Thomas Young (1773 - 1829)**, escreveu um longo artigo sobre marés para o *Supplement* de seis volumes da *Encyclopaedia Britannica*, editado por Macvey Napier (Young, 1823)<sup>113</sup>. Na verdade, para este *Supplement*, ele escreveu nada menos que 63 artigos, grandes e pequenos, sobre uma ampla gama de tópicos; veja [1, Cap. 12]. Muitos apareceram anonimamente, pois Young não queria ser considerado negligente com sua prática médica. Mas mais tarde ele permitiu que sua autoria fosse identificada: seu artigo sobre marés apareceu com as iniciais "A.L.", mas ele é identificado em outro lugar no volume como o autor desse e de outros artigos. Dez anos antes, ele havia publicado *A Theory of Tides* (Uma teoria das marés) no *Nicholson's Journal* (Young, 1813)<sup>114</sup>. Em grande parte, explorou uma analogia com o movimento de um pêndulo sujeito a força periódica (Craik, 2010, p.106). Em suas próprias palavras:

---

<sup>113</sup> Young T = “A.L.” (1823) Article “Tides”, Supplement to the 4th, 5th and 6th edns of Encyclopaedia Britannica, 6 vols (1815–1824), Napier M (ed), vol 6, pp 658–675. Constable, Edinburgh. Also in [8], 2:291–335

<sup>114</sup> Young T = “E.F.G.H.” (1813) A theory of tides, including the consideration of resistance. Nicholson's J 35:145–159, 217–227. Also in [8], 2:262–290.

“The oscillations of the sea and of lakes, constituting the tides, are subject to laws exactly similar to those of pendulums capable of performing vibrations in the same time, and suspended from points which are subjected to compound regular vibrations of which the constituent periods are completed in half a lunar and half a solar day.” (Ibid., 8, v.2, p.280).

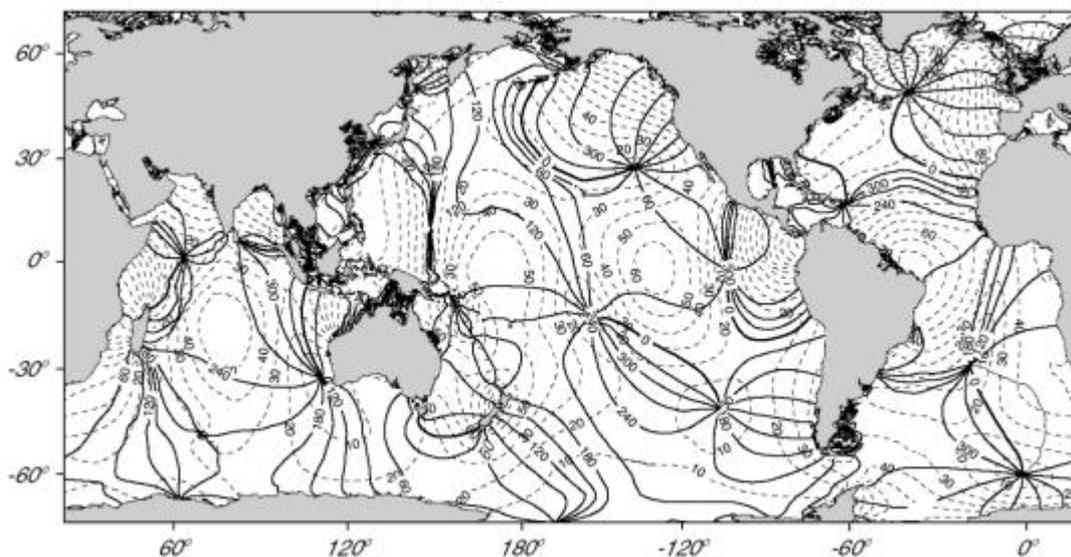
Ele também observou a intensificação não linear de ondas e ondas de maré, observando que:

“The slight difference of the ascent and descent of the tide remarked by Laplace in the observations at Brest [in Book IV of *Mécanique céleste*] may be explained by comparison with the form of a common wave, which, where the water is shallow, is always steeper before. This circumstance arises from the greater velocity with which the upper parts of the wave advance, where the differences of the depths become considerable ... and it is, perhaps, somewhat increased by the resistance of the bottom. Where the tide travels far in shallow channels, its irregularity of inclination increases more and more: for instance, in the Severn, it assumes the appearance of a steep bank.” (Ibid., 8, v.2, p.287).

Laplace havia calculado as marés em um oceano imaginário de profundidade variável. Young expandiu a teoria para o caso mais geral de um oceano irregular que cobria apenas parte da superfície da Terra e tentou incluir o efeito preciso da fricção hidráulica nos cálculos. Young observou que a linha das marés contemporâneas geralmente não está na direção exata do meridiano, como é suposto nas teorias de Newton e Laplace. Ele também notou que a onda principal se curva ao redor dos continentes da África e Europa de uma maneira semelhante à refração em uma costa. Young explorou a analogia entre marés e pêndulos forçados e incorporou os efeitos de fricção já explorados em suas *Hydraulic Investigations* (Investigações Hidráulicas). Ele examinou as oscilações livres de um pêndulo cicloide com resistência proporcional ao quadrado da velocidade (Craik, 2010, p.107).

A maré é uma onda longa que se propaga na superfície terrestre e está sujeita a diversas barreiras que mudam o seu percurso. Devido à presença de feições na bacia oceânica, um dos fenômenos que acontecem com a onda de maré é a reflexão. Essa reflexão forma ondas estacionárias, que juntamente com a rotação da Terra geram sistemas de pontos anfifrômicos, intimamente relacionado com a força de Coriolis (UNESCO, 1985). Os pontos anfifrômicos são regiões onde a maré é nula, ou seja,

onde não há a mudança do nível da água causado pela maré. Os pontos anfidrômicos estão espalhados por todos os oceanos, formando um sistema anfidrômico. A partir desses pontos, a maré tem uma propagação com sentido horário no hemisfério sul e anti-horário no hemisfério norte. Os pontos podem ser interligados através das linhas cotidianas, que indicam quais pontos estão em mesma fase de seu ciclo. Esse ciclo se completa quando a crista da onda de maré alta gira em torno de um ponto anfidrômico. Em volta do ponto anfidrômico também existem as linhas de co-amplitude, que indicam o valor da amplitude da onda de maré, sendo essa, crescente ao se afastar do ponto, demonstrado na figura 21 (Open University Course Team, 2002).



**Figura 21.** Sistema global dos pontos anfidrômicos, onde as linhas contínuas são as linhas cotidianas e as pontilhadas são as de co-amplitude. Fonte: Stewart, 2004.

Em 1833, **William Whewell (1794 - 1866)** sistematizou dados disponíveis sobre marés em diferentes portos num mapa de linhas cotidianas, que ligavam pontos onde as marés altas ocorriam ao mesmo tempo. Segundo Whewell, as marés originavam-se no oceano Antártico e progrediam para o norte, o que ficou conhecido como Teoria da Onda Progressiva. No entanto, Whewell não tinha garantia sobre as linhas que elaborou em seus desenhos, uma vez que não dispunha de dados de muitos portos e nem estes eram tão precisos. Apesar de Whewell ressaltar que queria que os dados mostrassem as marés como elas ocorriam, sua teoria estava subjacente à forma como o mapa foi construído, pois Whewell unia pontos muito distantes em suas linhas, a partir dos pressupostos da ideia de onda progressiva. A teoria de Whewell explicava muitas observações das marés e foi bem aceita pelos estudiosos da época, o que permitiu a

mobilização de observações simultâneas em vários portos. No entanto, com o tempo, a ampliação dos dados mostrou que a teoria tinha limitações, como não explicar as direções diferentes das marés (Dantas, 2020).

O aspecto da fricção das marés, completamente novo até o momento, foi introduzido pelo cientista e filósofo alemão **Immanuel Kant (1724 - 1804)**. Em 1754, ele escreveu um artigo na revista semanal Königsberg chamado *Ob die Erde in ihrer Umdrehung um die Achse einige Veränderung erlitten habe* (Se a Terra sofreu alguma mudança em sua rotação em torno do seu eixo). Kant percebe aqui que o atrito causado pelo movimento das marés do oceano em relação à Terra pode causar um retardo acentuado na rotação da Terra. Ele descobre que isso continuará até que a Terra sempre vire para o mesmo lado em direção à Lua, ou seja, até que a duração do dia seja igual a um mês. Kant escreve:

“One can no longer doubt that the everlasting motion of the ocean from evening towards morning [from east towards west], a real and considerable force, will also always contribute something to decreasing the rotation of the Earth around its axis. This effect must inevitably become noticeable after a long period of time.

As the Earth gradually approaches the standstill of its rotation, the period of this change will come to an end when the Earth's surface comes to a rest in relation to the Moon, i.e. when the Earth turns around its axis in the same time as that in which the Moon moves around the Earth.” (Ekman, 1993, p.590).

Kant admite que não pode apresentar nenhuma evidência para apoiar sua hipótese, mas deixa isso como uma tarefa para outros (Ekman, 1993, p.590).

Embora Kant afirmasse que seria "um preconceito muito vergonhoso" não se preocupar com o atrito das marés, quase ninguém o fez até cem anos depois, em 1853. Então **William Ferrel (1817 - 1891)**, oceanógrafo e meteorologista americano, apontou que a fricção das marés causando um alongamento do dia (unidade de tempo utilizada) levaria a uma aparente aceleração nos movimentos dos corpos celestes. Ele tentou calcular esse efeito para o movimento da Lua, assumindo que a maré oceânica semidiurna tinha um atraso médio de fase de 30° (2 h) (Ekman, 1993).

Halley (1693) já havia detectado uma pequena aceleração da Lua através de registros antigos de eclipses solares, mas se sabia que era causada pelas forças

gravitacionais do Sol e dos planetas. Ferrel explicou por que o efeito da aceleração lunar não foi observado usando a ideia popular da época de que a Terra estava esfriando e, portanto, se contraindo, o que faria a Terra girar mais rápido. Ferrel presumiu que os efeitos da fricção das marés e do resfriamento da Terra se equilibravam, de modo que nada podia ser observado. Um erro foi encontrado nos cálculos da gravidade da Lua ao mesmo tempo em que Ferrel publicou seu artigo. Corrigindo o erro, descobriu-se que metade da aceleração observada não podia ser explicada. Em 1864, Ferrel afirmou que essa aceleração residual poderia ser explicada pelo atrito das marés, causando um alongamento do dia de 1 segundo em 300 000 anos, com um atraso de fase de apenas 2° (8 min) (Ekman, 1993). O artigo de Fresnel saiu no *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, vol. 6, maio, 1862 – maio, 1865, p.379-383 (veja figura 3 de Ekman, 1993, p.592). Como a publicação da obra de Ferrel ocorreu na América, isso pode ter levado ao seu desconhecimento na Europa da época (Ekman, 1993, p.592).

Em 1865, o astrônomo francês **Charles Delaunay (1816 - 1872)** retomou o desenvolvimento da teoria da perturbação lunar e chegou a uma conclusão semelhante à de Ferrel, sem aparentemente ter conhecimento de seu trabalho. Foi por meio de Delaunay que a questão da fricção das marés se tornou amplamente conhecida nos círculos científicos (Ekman, 1993).

Logo depois, em 1866, o astrônomo e geodesta inglês **George Airy (1801 - 1892)** comentou o artigo de Delaunay. Airy descobriu que o atrito das marés, além de alongar o dia, deveria causar uma distância crescente da Lua da Terra. Mas as dificuldades em lidar com esses problemas eram esmagadoras; isso é muito bem ilustrado por Airy em um exemplo simples:

“Conceive, for instance (as a specimen of a large class), a tide-mill for grinding corn. The water, which has been allowed to rise with the rising tide, is not allowed to fall with the falling tide, but after a time is allowed to fall, thereby doing work, and producing heat in the meal formed by grinding the corn. I do not doubt that this heat is the representative of vis viva [kinetic energy], lost somewhere, but whether it is lost in the rotation of the Earth or in the revolution of the Moon, I am quite unable to say.” (Ekman, 1993, p.593).

Desde então, o fenômeno da fricção das marés tem sido objeto de discussões científicas mais ou menos contínuas.

Vale uma breve apresentação, nesse recorte histórico, sobre a descoberta das marés terrestres, tendo em vista que o conceito de marés terrestres abriu novas perspectivas para a pesquisa sobre o atrito das marés. Na segunda metade do século XIX, a discussão sobre a constituição interna da Terra era intensa. Uma questão levantada era se a Terra era fluida ou sólida. O físico inglês **William Thomson (1824-1907)**, também conhecido como **Lord Kelvin**, desenvolveu uma teoria que defendia que a Terra era um sólido elástico. Essa teoria foi apresentada em um artigo intitulado *On the Rigidity of the Earth* (Sobre a Rigidez da Terra) publicado nas *Philosophical Transactions da Royal Society de Londres* em 1863 (veja figura 4 de Ekman, 1993, p.594)<sup>115</sup>. A partir dos seus cálculos, Thomson concluiu que:

“Hence it is obvious that, unless the average substance of the earth is more rigid than steel, its figure must yield to the distorting forces of the moon and sun, not incomparably less than it would if it were fluid.” (Ekman, 1993, p.593).

Assim, Thomson propõe a existência das marés terrestres. Thomson propôs que as marés terrestres poderiam ser detectadas e avaliadas através da observação das marés oceânicas de longo período. Ele argumentou que as marés terrestres reduziriam a amplitude das marés oceânicas observadas, sendo que apenas as de longo período poderiam ser calculadas teoricamente. As marés diurnas e semidiurnas, por sua vez, eram muito influenciadas por fenômenos de ressonância e, portanto, mais difíceis de serem estudadas (Ekman, 1993).

Mais ou menos na mesma época, em 1868, Thomson introduziu a poderosa ferramenta de análise harmônica na teoria das marés. Isso o levou a inventar, quatro anos depois, a primeira máquina de previsão de marés; ela poderia lidar com 10 constituintes de maré (figura 22).

---

<sup>115</sup> Pode ser acessada em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspl.1862.0014>. Acesso em 24/04/2023.



**Figura 22.** Máquina de previsão de marés de 10 componentes de 1872-3, concebida por Sir William Thomson (Lord Kelvin) e projetada por Thomson e colaboradores, no Science Museum, South Kensington, Londres. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/DSCN1739-thomson-tide-machine.jpg>. Acesso em 24/04/2023.

Thomson, reformulou as equações de Laplace em termos de vorticidade<sup>116</sup>, o que permitiu soluções que descrevem ondas estacionárias costeiras excitadas pela maré, conhecidas por ondas de Kelvin (Cartwright, 1999; Case, 2000).

**George Darwin**<sup>117</sup> (1845 - 1912), um dos alunos de Thomson, aplicou as ideias do físico em suas pesquisas sobre astronomia e geofísica. Ele analisou observações de maré em 14 portos na Inglaterra, França e Índia, totalizando 33 anos de observações. Utilizando as marés lunares quinzenais e mensais, Darwin encontrou a razão entre a altura da maré oceânica na Terra elástica e na Terra rígida, o que atualmente denotamos como  $\gamma$ . Seu valor obtido foi de  $\gamma = 0,68 \pm 0,11$ , que concorda bem com os valores modernos. Mas o mais importante foi que Darwin demonstrou que  $\gamma$  era significativamente menor do que 1, provando assim a existência das marés terrestres. Esse resultado histórico foi publicado pela primeira vez em 1882 em *A Numerical Estimate of the Rigidity of the Earth* (Uma estimativa numérica da rigidez da Terra) na revista Nature (ver figura 5 de, Ekman, 1993, p.595).

O relato completo da análise das marés foi feito no ano seguinte, donde ele conclui:

“These results really seem to present evidence of a tidal yielding of the earth's mass, showing that it has an effective rigidity about equal to that of steel.” (Ekman, 1993, p.594).

Como já relatado e pode se perceber, com efeito, o conceito de marés terrestres auxiliou nas pesquisas sobre o atrito das marés. Considerando a Terra um fluido viscoso, George Darwin estudou o atrito das marés no interior da Terra, em vez de nos oceanos. Darwin descobriu, como Airy havia feito no caso do oceano, que o atrito das marés não apenas retarda a rotação da Terra, mas também faz com que a Lua se afaste da Terra:

“The moon-earth system is, from a dynamical point of view, continually losing energy from the internal tidal friction. One part of this energy turns into potential energy of the moon's position relatively to the earth, and the rest develops heat in the interior of the earth.” (Ekman, 1993, p.595).

---

<sup>116</sup> A vorticidade é uma medida usada na mecânica dos fluidos e na meteorologia para avaliar a rotação das partículas de um líquido em movimento.

<sup>117</sup> Filho de Charles Darwin.

Os cálculos de Darwin, publicados em 1879 como o primeiro de uma longa série de artigos sobre o assunto, mostraram que, nos primeiros dias da história da Terra, a Lua deve ter estado muito mais próxima da Terra do que agora. Assim, descobriu-se que o atrito das marés desempenha um papel fundamental na evolução do sistema Terra-Lua; descobriu-se até que levantava questões quanto à própria origem do sistema Terra-Lua. Três anos depois, em 1882, Darwin tentou calcular o efeito do carregamento do oceano na crosta elástica. Isso o levou a prever a existência de marés de carga, ou seja, marés terrestres devido ao carregamento das marés oceânicas (Ekman, 1993).

Para calcular as marés de carga, seriam necessárias cartas cotidianas globais das marés oceânicas. O primeiro mapa realista desse tipo foi construído pelo oceanógrafo americano **Rollin Harris (1863 - 1918)**, que descobriu e explicou, em 1904, o caráter anfidrômico geral das marés oceânicas. Isso se deu um pouco depois de Whewell, quando aos poucos pesquisadores começaram a considerar que as características das marés observadas em determinadas costas marinhas não eram tão bem explicadas pela ideia de uma onda progressiva advinda do Oceano Antártico, e começaram a analisar a possibilidade das marés naquelas localidades e em outros locais resultarem da formação de ondas do tipo estacionárias. Ondas estacionárias apresentam formas em que as suas posições de máximo e mínimo não variam com o tempo, ou seja, são ondas em que cada ponto do meio onde ela se forma está em fase com o outro. Esse, de fato, seria outro tipo de onda que poderia se formar nos oceanos, bacias, estuários, a partir das forças perturbadoras periódicas da Lua e do Sol sobre as águas do planeta. A ideia de que as marés pudessem se formar com esse padrão foi defendida principalmente por Harris, a partir de um artigo publicado em 1901, onde apresentou um estudo matemático dos modos de vibração de corpos de água. Harris apresentou também um mapa de linhas cotidianas fazendo uso dos dados adicionais acumulados desde o mapa de Whewell, e partindo da interpretação de que em oceano aberto teríamos a formação de ondas estacionárias em consequência da perturbação gravitacional da Lua e do Sol (Marmer, 1928). Apresentou, ainda, o conceito de pontos anfidrômicos, que são correspondentes a nodos das ondas estacionárias, onde as marés teriam amplitude nula ou próximo de nula. Segundo Camargo e Harari (2015), a partir desse ponto, a propagação faz com que as linhas de mesma fase da oscilação sejam radiais em relação a ele.

A Teoria de Ondas Estacionárias (de Harris), diferente da Teoria da Onda Progressiva (de Whewell), expressa que as marés nos diversos locais não possuem uma origem única, ou seja, não resultam da propagação de uma maré específica que se

formou num determinado local, mas originam-se de marés distintas, em cada região que estejamos interessados em estudar. A Lua e o Sol ainda são considerados os agentes astronômicos causadores do fenômeno, conforme pensado por Newton, no entanto, cada região dos oceanos no globo responde vibrando de maneira específica em relação às perturbações que esses astros irão causar. Tais perturbações irão gerar ondas estacionárias com características diferentes, em razão de muitas variáveis, tais como o relevo da costa, profundidade das águas, época do ano, presença de sedimentos, temperatura da água, entre outros. A Teoria de Ondas Estacionárias recebeu algumas críticas pesadas de cientistas que acreditavam de forma aficionada na teoria que Whewell havia proposto. Lidou ainda com certo preconceito da comunidade europeia que estudava marés. No entanto, certo tempo depois, o prestigiado matemático e físico francês **Poincaré (1854 - 1912)**, em seu *Leçons de Mécanique Céleste: Théorie des Marées* (Lições de Mecânica Celeste: Teoria das Marés) apresentou análises bem convincentes e sistematizadas sustentando a teoria de Harris, o que fez com que esta merecesse novos olhares entre os que ainda eram céticos em relação a ela (Dantas, 2020 – **grifo nosso**).

A partir daqui a evolução da pesquisa sobre as marés terrestres e o papel de diferentes cientistas em contribuir para a compreensão desse fenômeno pode ser resumida, cronologicamente, da seguinte forma: **Oskar Hecker (1864 - 1938)** observou a inclinação de maré em 1907, concordando com o resultado de Darwin. **Augustus Love (1863 - 1940)** descreveu as deformações elásticas da Terra em 1909. **Wilhelm Schweydar (1877 - 1959)** observou as marés terrestres com um gravímetro em 1914. **Arthur Doodson (1890 - 1968)**, baseando-se nos desenvolvimentos anteriores e na teoria lunar de Ernest William Brown (que descreve os movimentos da Lua), fez uma expansão harmônica do potencial das marés em 1921. Ela consistia em nada menos que 386 componentes de diferentes períodos e amplitudes que seriam determinantes para a análise de marés numa determinada região! (Ekman, 1993; Casotto; Biscani, 2004; McCully, 2006), agregando valor a Teoria das Ondas Estacionárias de Harris. Alguns dos seus métodos continuam em uso na previsão das marés (Moyer, 2003). **Harold Jeffreys (1891 - 1989)** apresentou evidências do retardo secular da rotação da Terra causado pelo atrito das marés em mares rasos em 1920. Era uma extensão de uma teoria publicada no ano anterior pelo meteorologista inglês **Geoffrey Taylor (1886 - 1975)**, cuja ideia, curiosamente, surgiu de uma semelhança dinâmica entre a fricção das marés no fundo de um oceano e a fricção do vento em um solo coberto por grama. Ainda

introduziu um efeito de maré diferente na rotação da Terra em 1928. **Chaim Leib Pekeris (1908 - 1993)** resolveu o problema das marés nos poços<sup>118</sup> em 1940. **Gustav Herglotz (1881 - 1953)** e **Leander Miller Hoskins (1860 - 1937)** desenvolveram uma teoria para deformações elásticas da Terra não homogênea em 1905 e 1920, respectivamente. Resultou em uma equação diferencial de sexta ordem que estava, naquela época, além da capacidade de qualquer pessoa resolver. **Hitoshi Takeuchi (1920 - 2004)**, em 1950, resolveu numericamente o problema em três equações diferenciais de segunda ordem em 1950 (Ekman, 1993).

Hoje em dia, as tábuas de marés são acessadas *online*. Os dados obtidos passam por análises computacionais e nos informam o horário em que a maré estará cheia ou seca, qual será a altura máxima e mínima, qual a posição da Lua e do Sol no momento, e outras informações. Essas informações são úteis para atividades como pesca, exploração de petróleo, atracação de embarcações e pelos turistas a fim de aproveitar satisfatoriamente suas viagens. A compreensão atual das marés atribui sua origem à força gravitacional da Lua e do Sol, juntamente com vários outros fatores que agem juntos para gerar o fenômeno das marés em uma região específica.

Até aqui, percebe-se que o panorama geral e atual da teoria das marés deve levar em conta o modelo dinâmico do fenômeno. Mais de 20 modelos globais de marés oceânicas foram desenvolvidos desde 1994, principalmente como consequência da análise das medições altimétricas precisas de Topex/Poseidon e como resultado de desenvolvimentos paralelos em modelagem numérica de marés e assimilação de dados. Shum et al. (1997) fornece uma avaliação de precisão de 10 desses modelos de maré e discute seus benefícios em muitos campos, incluindo geodésia, oceanografia e geofísica. Um estudo revisional sobre as mudanças nas amplitudes das marés devido a causas não astronômicas, levando em consideração o modelo dinâmico das marés, destaca seis fatores principais que podem causar mudanças nas estatísticas de maré medidas em escalas locais: (1) dissipação e mistura turbulenta; (2) profundidade de canais e planos; (3) área de superfície, largura e convergência; (4) ressonância e reflexão; (5) vazão do rio; e (6) mudanças na instrumentação. Discute-se ainda outros oito possíveis mecanismos regionais/globais: (1) tectônica, (2) profundidade da água, (3) posição da costa, (4) extensão da cobertura de gelo (marinho), (5) rugosidade do fundo do mar, (6) estratificação oceânica e marés internas, (7) interações não lineares (atrito ou tríade) e

---

<sup>118</sup> Um problema sem solução desde os tempos de Posidônio e Straborn. Para mais detalhes, veja Ekman, 1993, p.597.

(8) forçamento radiacional (Haigh et al., 2020). Woodworth (2010) ainda cita que as marés reais dos oceanos podem mudar por um ou mais motivos. Um outro estudo (Jänicke et al., 2021), apresenta uma análise das mudanças na amplitude das marés na região do Mar do Norte entre 1958 e 2014. Os autores utilizaram dados de estações maregráficas de longa duração e aplicaram técnicas estatísticas para avaliar as mudanças nas amplitudes das marés em diferentes períodos ao longo dos anos. Os autores documentaram um caso excepcional de grande escala espacial de mudanças na amplitude das marés no Mar do Norte, apresentando tendências pronunciadas entre -2,3 mm/ano nos medidores de maré no Reino Unido e até 7 mm/ano na baía alemã entre 1958 e 2014.

As marés tiveram um lugar bastante especial na história da ciência. Do ponto de vista puramente prático, a capacidade das pessoas que navegam no mar de prever os horários e alturas da maré alta é extremamente valiosa. Os padrões de maré podem ser complexos, mas a previsão é sempre possível para qualquer lugar específico apenas analisando cuidadosamente os registros das marés passadas. Tal análise deve ter sido uma das primeiras instâncias de observação paciente que produziu conhecimento útil sobre o mundo físico. Civilizações antigas, sem dúvida, perceberam uma ligação entre as marés e a Lua, tanto em sua posição no céu quanto em sua idade no mês. De um ponto de vista mais teórico, esse movimento do mar conectado astronomicamente implorava por uma descrição científica, e alguns dos maiores nomes da ciência aplicaram suas mentes ao assunto. Hoje, previsões precisas de maré estão disponíveis em grandes tabelas anuais para centenas de locais costeiros ao redor do mundo, e parece que as marés respeitosamente cederam todos os seus segredos. Na verdade, essas tabelas ainda são feitas sobre extrapolações de registros passados, e a teoria só foi capaz de adicionar sofisticação ao método antigo. É ainda impossível gerar tabelas precisas de maré a partir dos primeiros princípios, não porque haja problemas fundamentais com a teoria, mas porque seria necessária uma extensa pesquisa do leito do mar, juntamente com uma potência de computação verdadeiramente formidável. Como tabelas perfeitamente boas já podem ser feitas, este exercício mal foi visto como um dos principais problemas da ciência do século XX. Uma consequência infeliz desse estado de coisas é que a teoria das marés se tornou algo como um beco sem saída, mal compreendido pelo público em geral e provavelmente pela maioria dos cientistas. Antes de se considerar os efeitos das forças de maré sobre as pessoas, no entanto, precisa-se de uma compreensão decente do porquê os mares respondem como o fazem. Nesse sentido,

o sintético texto cronológico revisa e compila as teorias estáticas e dinâmicas das marés desenvolvidas por cientistas ao longo do tempo, desde a Grécia Antiga até os dias atuais. Espera-se que esse capítulo motive os professores da Educação Básica a estudarem as referências aqui fornecidas, buscando contribuir mais nesse campo da História e Filosofia da Ciência. A revisão também destaca a importância histórica, social, econômica e geográfica das marés oceânicas, o que pode ser um incentivo para os alunos se interessarem pelo assunto e compreenderem como a física está presente em nossas vidas cotidianas. Finalmente, o texto pode contribuir para a literatura nacional de história da ciência, fornecendo uma revisão atualizada e completa das principais (se assim pudermos nos referir) teorias estáticas e dinâmicas das marés. Isso pode ser valioso para pesquisadores e estudiosos que desejam entender melhor a evolução do pensamento científico sobre o assunto ao longo do tempo.

Por fim, oferecemos um resumo histórico das principais explicações das marés (quadro 1).

Nome	Resumo de sua contribuição
Aristóteles (384 – 322 a.C.)	Séc. III a.C.: propôs que o Sol movia os ventos, que por sua vez empurravam as águas do mar, e que os grandes rios que fluem para o oceano são vistos como a causa das marés.
Píteia de Massália (380 – 310 a.C.)	Séc. III a.C.: identificou que a amplitude dessas marés variava conforme as fases da Lua.
Seleuco de Selêucia (190 – 150 a.C.)	Séc. II a.C.: explicou que as duas fontes de perturbação – a translação da Lua e a rotação da Terra – atuavam juntas para criar as marés por meio de uma pressão do ar.
Posidônio (135 – 51 a.C.)	Séc. I a.C.: distinguiu os três períodos diário, mensal e anual das marés, atribuindo-lhe a influência dos astros e, particularmente, a Lua como causa.
Quintus Curcius (século I)	Séc. I d.C.: descreve o primeiro registro de um contato significativo com as marés, sendo fora do ambiente mediterrâneo.

Straborn (63 a.C. – 25 d.C)	23 d.C.: apresentou uma síntese das observações das marés feitas até aquele momento.
Plínio, O Velho (23 – 79 d.C.)	Séc. I d.C.: explica que a causa das marés consiste em uma certa simpatia entre o elemento da água e a Lua.
Cláudio Ptolomeu (90 – 168 d.C.)	Séc. II d.C.: ofereceu uma visão astrológica sobre a relação entre o movimento da Lua e as marés.
Sexto Empírico (160 - 210) e Plotino (205 – 270)	Por meio da “simpatia”, explicaram a influência da Lua nas marés.
Beda, O Venerável (673 – 735)	725 d.C.: Explicou que o vento poderia adiantar ou atrasar a maré, e foi o primeiro a se referir ao estabelecimento de um porto, ou seja, o atraso na ocorrência da maré pode ser diferente em portos da mesma costa.
Zakariya al Qazwini (1203 – 1283)	1235: afirma que o fluxo da maré é causado pelo Sol e pela Lua que aquecem as águas, fazendo com que elas se expandam.
Federico Chrisogono (1472 – 1538)	1528: observou que as marés são influenciadas pelos efeitos combinados do Sol e da Lua, sendo somados durante a Lua Cheia e a Lua Nova e subtraídos durante a quadratura. No entanto, ele considerou erroneamente que a influência das marés é cancelada durante a quadratura, o que difere da teoria moderna. Deduziu o ciclo anual das marés, mas deixou de considerar a diferença entre as duas marés diárias.
Federico Delfino (1477 - 1547), Ludovico Boccaferri (1482 - 1545), Girolamo Cardano (1501 - 1576), Annibale Raimondo (1505 - 1591), Claude Duret (1570 - 1611), Giovanni Paolo Galluccio (1538 - 1621) e Florido Ambrosio Patavani	Final do século XVI e início do século XVII: basearam-se explicitamente nas teorias de Chrisogono em suas próprias obras sobre marés. Todos esses autores explicaram os fenômenos das marés com base na posição do Sol e da Lua.

Júlio César Scaliger (1484-1558)	1557: sugeriu que não só a Lua, mas também a oscilação da água do mar entre as costas da América e Europa eram responsáveis pelo fluxo das marés.
Andreas Cesalpino (1519 – 1603)	1571: o fluxo e refluxo do mar seria um movimento libratório causado pela Terra, e não diretamente pelo fluido.
Girolamo Borro (1512 – 1592)	1577: fez relações das marés com a Lua, mas justifica a ação lunar a partir de sua luminosidade, que provocaria o aquecimento das águas causando o fluxo e o refluxo do mar.
Francesco Patrizi (1529 - 1597)	1591: forneceu uma história pormenorizada das teorias sobre as causas das marés; citou a investigação de Chrysogonos sobre a relação temporal entre as marés e o movimento da Lua; desenvolveu uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam.
Paolo Sarpi (1552 – 1623)	1592: baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra como sendo um círculo excêntrico onde o Sol não está em seu centro.
Johannes Kepler (1571 – 1630)	1609: as marés eram causadas por uma força de atração da Lua e do Sol. Kepler acreditava que esta força era algum tipo de magnetismo, influenciado pelas teorias de Gilbert. Veja Gilbert mais a frente.

Francis Bacon (1561 – 1626)	1611: propõe que o movimento do cosmos seja de oriente para ocidente, e que isso explica os fluxos e refluxos das águas oceânicas. Os refluxos ocorrem quando as águas são interrompidas pelos continentes e as marés são uma consequência disso.
Marco Antonio de Dominis (1560 - 1624)	1624: afirma que as marés são causadas pela interação do Sol e da Lua, e destaca características como a variação geográfica na altura e as correntes de maré horizontais. Ele também tenta conciliar teoria e observação, apresentando duas teorias de maré diferentes.
Galileu Galilei (1564 – 1642)	1632: baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra considerada como um círculo com o Sol em seu centro. Negou a ação da Lua e do Sol sobre as marés. Sua teoria das marés foi “criada” para tentar provar que a Terra se movia. Compare com a teoria de Paolo Sarpi.
Jeremiah Horrocks (1618 – 1641)	1640: realizou as primeiras observações sistemáticas das marés para fins científicos no Reino Unido.
René Descartes (1596 – 1650)	1644: explica que o movimento da Lua pressiona a matéria entre ela e a Terra, afetando as águas do planeta. Cada astro tem seu próprio céu, e o terrestre é oval. A influência da Lua é maior nas extremidades do céu da Terra, resultando em marés altas durante as fases de Lua Cheia e Nova. A influência lunar é mais forte nos equinócios, causando marés altas, e mais fraca nos solstícios, que têm marés baixas.

<p>Nicolás Mascardi (1625 – 1673)</p>	<p>1650 – 1674: aproximava-se mais da proposição de influência lunar formulada por Descartes, embora também não tenha caracterizado as marés quanto a sua intensidade, como propôs Galileu Galilei. Referiu-se à interferência de especificidades locais em suas observações.</p>
<p>William Gilbert (1544 – 1603)</p>	<p>1651: obra publicada postumamente. Sugeriu explicitamente que havia uma atração entre a Lua e a água. Sua teoria magnética influenciou fortemente as próximas teorias, em especial Johannes Kepler.</p>
<p>Giambattista Baliani (1582 - 1666)</p>	<p>1651: tentou resolver a limitação da explicação galileana das marés adicionando um terceiro movimento da Terra em torno da Lua. Foi uma teoria considerada estranha à época, mas John Wallis aproveitou sabiamente essa ideia e a adotou, mais tarde, em sua teoria das marés. Veja John Wallis mais a frente.</p>
<p>Athanasius Kircher (1602 – 1680)</p>	<p>1655: sugeriu que as marés eram causadas pelo efeito da Lua sobre a luz do Sol. A luz pura do Sol seria infectada com uma “qualidade nitrosa” ao ser refletida na Lua e, passando para a Terra, causa turbulência e elevação do nível do mar. Assim, os “eflúvios nitrosos da Lua” fazem com que a água seja empurrada e puxada através de uma rede global de “passagens ocultas e ocultas”.</p>

John Wallis (1616 – 1703)	1666: estende a versão da teoria de Galileu, sugerindo que as oscilações das marés resultam da rotação da Terra combinada, não apenas com o movimento da Terra ao redor do Sol, mas também com seu movimento ao redor do centro de gravidade do sistema Terra-Lua.
Henry Philips (?)	1668: fez uma modificação na previsão do momento das marés altas em Londres através do ciclo de sizígia e quadratura.
Thomas Philipot (falecido em 1682)	1673: desenvolve uma teoria química das marés: o “fluxo da maré” (sua subida) era devido a sais voláteis “sal ou espírito amoniacal, que é envolto nas entranhas do mar” que foram liberados pelas “impressões do sol e da lua”.
John Flamsteed (1646 – 1719)	1661: utilizou medições dos horários das marés altas em Tower-Wharfe. 1682: o mesmo em Tower-Wharfe e Greenwich no verão desse ano. Tais observações, juntamente com seus conhecimentos astronômicos sobre as órbitas da Lua e do Sol, permitiram a produção de uma tabela de marés para os horários das marés de Londres para 1683-88 e, por meio de ajustes simples, horários (um tanto imprecisos) das marés em outros lugares.
Isaac Newton (1642 – 1727)	1687: formulou a teoria estática das marés com base na lei da gravitação universal.
Jacques Cassini (1677 – 1756)	1711 – 1716: analisou os tempos e alturas das águas altas e baixas que foram registrados em Brest. Cassini interpretou esses dados como suporte para a teoria das marés de Descartes.

Colin Maclaurin (1698 – 1746)	1740: provou o que Newton presumiu intuitivamente, que a forma de um oceano esférico em equilíbrio estático com a força das marés induzida por um corpo perturbador (ou seja, a Lua ou o Sol) é um esferoide prolato (uma forma como uma bola de rúgbi com um eixo de simetria alongado), cujo eixo principal aponta para o corpo.
Leonhard Euler (1707 – 1783)	1741: mostrou que era a componente horizontal, e não vertical, do campo de força que levava ao movimento das marés.
Antoine Cavalleri (1698 – 1765)	1741: baseou-se na obra de Descartes, embora ele discordasse da teoria anterior devido à falta de uma contribuição importante das marés solares. Ele também discordou da teoria da gravitação de Newton e, em vez disso, perseverou em um desenvolvimento infrutífero da teoria cartesiana dos vórtices.
Murdoch Mackenzie (1712 - 1797)	1749: realizou observações sobre as marés em Órcades.
Immanuel Kant (1724 – 1804)	1754: introduziu o aspecto da fricção das marés.
Nevil Maskelyne (1732 – 1811)	1767: publicação do <i>Nautical Almanac</i> sob sua direção.
William Hutchinson (1715 - 1801)	1764 – 1767: quatro anos de observações do porto de Liverpool.

Richard (1718 - 1775) e George Holden (1723 - 1793)	1770: primeira tabela de marés confiável e de acesso público sendo produzida para o porto de Liverpool, ajustada a partir do método genérico de Bernoulli.
James Ferguson (1797 – 1867)	1775: propôs um “exercício” para a construção de um relógio de maré.
Pierre de Laplace (1749 – 1827)	1775: introduziu o potencial das marés (“fórmula das marés de Laplace”), expressando o potencial de maré em função da latitude, declinação e ângulo horário.
Daniel Bernoulli (1700 – 1782)	1781: seu ensaio introduziu a chamada Teoria do Equilíbrio, que descreve a estrutura temporal e espacial da maré de equilíbrio devido à combinação da Lua e do Sol. Combinou os dois esferoides prolatos individuais em uma forma geral e introduziu as órbitas lunar e solar e a rotação da Terra na discussão, de modo que a dependência temporal da maré de equilíbrio em qualquer ponto da superfície da Terra pudesse ser parametrizada.
Jérôme Lalande (1732 – 1807)	1781: registrou em sua tabela sobre o estabelecimento – o atraso entre o trânsito da Lua pelo meridiano e a próxima maré alta durante a sizígia.
Thomas Young (1773 - 1829)	1821: teoria baseada na fórmula integral das <u>oscilações forçadas</u> .
William Whewell (1794 – 1866)	1833: sistematizou dados disponíveis sobre marés em diferentes portos num mapa de linhas cotidais.
George Biddell Airy (1801 - 1892)	1842: teoria das marés com base numa bacia oceânica de morfologia simples e com uma <u>profundidade uniforme</u> .

William Ferrel (1817 – 1891)	1853: apontou que a fricção das marés causando um alongamento do dia levaria a uma aparente aceleração nos movimentos dos corpos celestes.
Charles Delaunay (1816-1872)	1865: retomou o desenvolvimento da teoria da perturbação lunar e chegou a uma conclusão semelhante à de Ferrel. A questão da fricção das marés se tornou amplamente conhecida nos círculos científicos.
George Airy (1801-1892)	1866: descobriu que o atrito das marés, além de alongar o dia, deveria causar uma distância crescente da Lua da Terra.
William Thomson – Lord Kelvin (1824-1907)	1863: desenvolveu uma teoria que defendia que a Terra era um sólido elástico (marés terrestres). Thomson introduziu a poderosa ferramenta de análise harmônica na teoria das marés.  1868: inventou a primeira máquina de previsão de marés.
George Darwin (1845 – 1912)	1882: realizou 33 observações nos portos de Inglaterra, França e Índia. Encontrou a razão entre a altura da maré oceânica na Terra elástica e na Terra rígida, provando assim a existência das marés terrestres (publicação na revista <i>Nature</i> ).
Rollin Harris (1863 – 1918)	1904: descobriu e explicou o caráter anfidrômico geral das marés oceânicas.
Poincaré (1854-1912)	1910: apresentou análises bem convincentes e sistematizadas sustentando a teoria de Harris.
Oskar Hecker (1864 – 1938)	1907: observou a inclinação de maré, concordando com o resultado de Darwin.
Augustus Love (1863 – 1940)	1909: descreveu as deformações elásticas da Terra.

Wilhelm Schweydar (1877 – 1959)	1914: observou as marés terrestres com um gravímetro.
Gustav Herglotz (1881 – 1953) e Leander Miller Hoskins (1860 – 1937)	Desenvolveram uma teoria para deformações elásticas da Terra não homogênea em 1905 e 1920, respectivamente. Resultou em uma equação diferencial de sexta ordem que estava, naquela época, além da capacidade de qualquer pessoa resolver.
Arthur Doodson (1890 – 1968)	1921: fez uma expansão harmônica do potencial das marés, a qual consistia em 386 componentes de diferentes períodos e amplitudes determinantes para a análise de marés numa determinada região.
Harold Jeffreys (1891 – 1989)	1920: apresentou evidências do retardo secular da rotação da Terra causado pelo atrito das marés em mares rasos.  1928: introduziu um efeito de maré diferente na rotação da Terra.
Chaim Leib Pekeris (1908 – 1993)	1940: resolveu o problema das marés nos poços.
Hitoshi Takeuchi (1920 – 2004)	1950: resolveu numericamente o problema em três equações diferenciais de segunda ordem de Herglotz e Hoskins.

**Quadro 1.** Resumo histórico do conhecimento das marés. Fonte: autor, 2023.

## Referências Bibliográficas

- \_\_\_\_\_. A guide to Newton's Principia. In: NEWTON, I. *The principia - Mathematical principles of natural philosophy*. Tradução I. B. Cohen & A. Whitman. Berkeley: University of California Press, 1999, p. 1-370.
- \_\_\_\_\_. De fluxu et refluxu maris. On the ebb and flow of the sea. In: Rees, G. (Ed.). *Philosophical studies c 1611-c. 1619*. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1996. p. 63-93. (The Oxford Francis Bacon, vi).
- \_\_\_\_\_. *Dialogo dei massimi sistemi*. In: PAGNINI, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. V. 4, 3.
- \_\_\_\_\_. *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Tradução, introdução e notas A. B. Marí. Madrid: Alianza Editorial, 1994.
- \_\_\_\_\_. Introduction: Galileo, man of science. In: McMULLIN, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988a. p. 3-51.
- \_\_\_\_\_. Nota sulla marea. In: PAGNINI, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. v. 3, p. 296-301.
- Aiton, E.J., 1954. Galileo's theory of the tides. *Ann. Sci.* 10, 44–57. <https://doi.org/10.1080/00033795400200054>.
- Aiton, E.J., 1955a. Descartes's theory of the tides. *Ann. Sci.* 11, 337–348. <https://doi.org/10.1080/00033795500200335>.
- Aiton, E.J., 1955b. The contributions of Newton, Bernoulli and Euler to the theory of the tides. *Ann. Sci.* 11, 206–223. <https://doi.org/10.1080/00033795500200215>.
- Aiton, E.J., 1957. The vortex theory of the planetary motions—I. *Ann. Sci.* 13, 249–264. <https://doi.org/10.1080/00033795700200131>.
- Aiton, E.J., 1958a. The vortex theory of the planetary motions—II. *Ann. Sci.* 14, 132–147. <https://doi.org/10.1080/00033795800200047>.
- Aiton, E.J., 1958b. The vortex theory of the planetary motions—III. *Ann. Sci.* 14, 157–172. <https://doi.org/10.1080/00033795800200087>.
- Aiton, E.J., 1963. On Galileo and the earth-moon system. *Isis* 54, 265–266. <https://www.jstor.org/stable/228546>.

- Aiton, E.J., 1969. Newton's aether-stream hypothesis and the inverse square law of gravitation. *Ann. Sci.* 25, 255–260. <https://doi.org/10.1080/00033796900200151>.
- Aiton, E.J., Burstyn, H.L., 1965. Galileo and the theory of the tides. *Isis* 56, 56–63. <https://www.jstor.org/stable/228458>.
- Arbic, B. K., 2022. *Incorporating tides and internal gravity waves within global ocean general circulation models: a review*. **Prog. Oceanogr.**, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102824>.
- Aston, N., 2008. Hutchinsonians. *Oxford Dictionary of National Biography*, <https://doi.org/10.1093/ref:odnb/59223>
- Bacon, *Do fluxo e refluxo do mar, scientiæ studia*, São Paulo, v.5, n.4, p.520-48, 2007, p.521
- Bacon, *Novo Organum*, tradução - José Aluysio Reis de Andrade, 2002
- Baldwin, M.R., 1985. Magnetism and the anti-Copernican polemic. *J. Hist. Astron.* 16, 155–174. <https://doi.org/10.1177/002182868501600301>.
- Benison, L. *Early medieval science: the evidence of Bede*. **Endeavour**, v. 24, n. 3, p. 111-116, 2000.
- Bonelli, F.; Russo, L. *The origin of modern astronomical theories of tides: Chrisogono, de Dominis and their sources*. **The British Journal for the History of Science**, v. 29, n. 4, p. 385-401, 1996.
- Brauen, F., 1982. Athanasius Kircher (1602-1680). *J. Hist. Ideas* 43, 129–134. <https://www.jstor.org/stable/2709164>.
- Burstyn, H. L. Galileo's attempt to prove that the earth moves. *Isis*, 53, p. 161-85, 1964.
- Camargo, R.; Harari, J. Marés. In: Castelo, J. P.; Krug, L. C. (Org.). *Introdução às Ciências do Mar*. **Pelotas: Editora Textos**, 2015. p. 226-255.
- Cartwright, D. E. *Tides - a scientific history*. **Cambridge University Press, Cambridge, UK**, 1999.
- Case, J. (março de 2000). «*Understanding Tides — From Ancient Beliefs to Present-day Solutions to the Laplace Equations*». **SIAM News**. **33** (2)

Casotto, S.; Biscani, F. *A fully analytical approach to the harmonic development of the tide-generating potential accounting for precession, nutation, and perturbations due to figure and planetary terms*. In: **AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting# 35**. 2004, p. 08.05.

CDSB, 2008. *Johannes Kepler. Complete Dictionary of Scientific Biography*, first ed. Charles Scribner's Sons, New York (ebook).

Cesalpino, A. *Quaestionum peripateticarum libri V*, Venice: Iuntas, 1571, 70r–71v.

Childrey, J., 1670. A letter of Mr. Joseph Childrey to the Right Reverend Seth Lord Bishop of Sarum, containing some animaversions upon the Reverend Dr. John Wallis's hypothesis about the flux and reflux of the sea, publish't No. 16. of these tracts. Philos. Trans. R. Soc. 5, 2061–2068. <https://doi.org/10.1098/rstl.1670.0050>

Clavelin, M. Galilée et le refus de l' équivalence des hypotheses. In: V.V.A.A. *Galilée. Aspects de sa vie et de son oeuvre*. Paris: PUF, 1968. p. 147-54.

Cohen, I. B. Galileo, Newton and the divine order of the solar system. In: McMullin, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988. p. 407-31.

Cohen, R. S. et al. (Ed.). *Essays in memory of Imre Lakatos*. Dordrecht: Reidel, 1976.

Craik, A. D. D. *Thomas Young on fluid mechanics*. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 67, p. 95-113, 2010.

Curcio, R., Quinto et al. *De la vida y acciones de Alexandro el grande* - traducido de la lengua latina en la española por D. Matheo Ibañez deSegovia y Orellana. 1974. Tese de Doutorado.

Dantas, J. H. S. *Um material para professores de Física sobre o ensino de marés na Educação Básica*. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Deacon, M., 1971. *Scientists and the Sea, 1650–1900: A Study of Marine Science*. Academic Press, London. 445pp.

Descartes, R. *Le monde ou Traité de la Lumiere*. In: Adam, C. & Tannery, P. (Ed.). *Œuvres de Descartes*. Paris: Vrin, 1996. v. 11, p. 3- 118.

Dondi, J. (dall'Orologio): *De fluxu et refluxu maris*. Editado em 1912 por P. Revelli.

Durand-Richard Marie-José. De la prédiction des marées: entre calcul, observations et mécanisation (1831-1876). **Cahiers François Viète**, n. II-8/9, p. 105-135, 2016.

Einstein, A., 1954. Ideas and Opinions. (Translated by S. Bargmann). Crown Publishers, London, ISBN: 978-0-285-64724-4.

Ekman, M. *A concise history of the theories of tides, precession-nutation and polar motion (from antiquity to 1950)*. **Surveys in Geophysics**, v. 14, n. 6, p. 585-617, 1993 (e suas referências).

Fara, P., 1996. Sympathetic Attractions: Magnetic Practices, Beliefs, and Symbolism in Eighteenth-Century England. Princeton University Press, New Jersey. 326 pp.

Ferguson, J., 1773. Select Mechanical Exercises Shewing How to Construct Clocks, Orreries and Sun Dials on Plain and Easy Principles. Strahan and Cadell, London. 272 pp.

Finocchiaro, M. A. Commentary: dialectical aspects of the copernican revolution: conceptual elucidations and historiographical problems. In: WESTMAN, R. S. (Ed.). *The copemican achievement*. Berkeley: University of California Press, 1975. p. 404-14.

Fleck, E. C. D.; Biehl, M.. *Sobre os céus e as marés do Pacífico: as observações astronômicas do jesuíta Nicolás Mascardi (Chile, século XVII)*. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 6, n. 12, 2014.

Findlen, P. (Ed.), 2004. Athanasius Kircher: The Last Man Who Knew Everything. Routledge, New York. 464 pp

Furlong, Guillermo, S.J. *Entre los Tehuelches da Patagonia*. Buenos Aires: San Pablo, 1943

Galilei, G. *Diálogo Sobre Os Dois Máximos Sistemas Do Mundo Ptolomaico e Copernicano*. Tradução de Pablo Ruben Mariconda. 3a. ed. Editora 34, 2011.

Glassie, J., 2012. A Man of Misconceptions: The Life of an Eccentric in an Age of Change. Riverhead Books, New York. 333 pp.

Haigh, I. D. et al. *The tides they are a-Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications*. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. e2018RG000636, 2020.

Harper, W.L., 2011. Isaac Newton's Scientific Method: Turning Data into Evidence about Gravity and Cosmology. Oxford University Press, Oxford. 444 pp.

Harris, R.A., 1898. Manual of Tides, Part 1. (Appendix No. 8 of US Coast and Geodetic Survey Report for 1897). Government Printing Office, Washington, D.C. Available from Google Books Härtel, H. *The tides-a neglected topic*. **Physics Education**, v. 35, n. 1, p. 40, 2000.

Hecht, E., 2019. *Kepler and the origins of the theory of gravity*. **Am. J. Phys.** 87, 176–185. <https://doi.org/10.1119/1.5089751>.

Hicks, S. D. *Understanding tides*. **US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service**, 2006

Hutchinson, W., 1777. A Treatise on Practical Seamanship. Reprinted 1787 and available at British library. Reprinted 1979 by Scholar Press, London, p. viii. xiv, 213, pl.10, map. 27 cm.

Hutchinsonianos – Fonte: <[https://www.britishmuseum.org/collection/object/P\\_Cc-2-255](https://www.britishmuseum.org/collection/object/P_Cc-2-255)>. Acesso em 04/04/2023.

Influência dos ventos nas marés – Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=diversas-influencias-sobre-as-mares>. Acesso em 04/04/2023.

Intergovernmental Oceanographic Commission- IOC. 2002. *Manual on sea level measurement and interpretation*. Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. IOC – **Intergovernmental Oceanographic Commission, Manual and Guides** No. 14, UNESCO 2002. 49p. Stewart 2004.

Irby-Massie, G. L.; Keyser, P. T. *Greek Science of the Hellenistic Era: A Sourcebook*. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=-SA2uJ21epQC&pg=PA146&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Jänicke, L. et al. Assessment of tidal range changes in the North Sea from 1958 to 2014. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 126, n. 1, p. e2020JC016456, 2021.

Jammer, Max; Ribeiro, Vera. **Conceitos de força: Um estudo sobre os fundamentos da dinâmica**. Contraponto Editora, 2021.

Koestler, A. *The sleepwalkers: A history of man's changing vision of the universe*. Penguin UK, 2017.

Kvale. Tidal constituents of modern and ancient tidal rhythmites: criteria for recognition and analyses. In: **Principles of tidal sedimentology**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p.1-17

Lalande, J. J., 1781. *Traité du flux et du reflux de la mer*. In: *Astronomie*. Tome 4. Chez la veuve Desaint, Paris. 348pp.

Laplace, P.S., 1775. *Recherches sur plusieurs points du systè`me du monde*. Mem. Acad. R. Sci. Paris 88, 75–182 (Reprinted in *Oeuvres Comple`tes de Laplace*, Gauthier-Villars, Paris, 9 (1893)).

Laplace, P.S., 1776. *Recherches sur plusieurs points du systè`me du monde*. Mem. Acad. R. Sci. Paris 89, 177–264 (Reprinted in *Oeuvres Comple`tes de Laplace*, Gauthier-Villars, Paris, 9 (1893)).

Lefevre; le Provost; Lyard. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.105, n.C4, p.8707-8725, 2000.

Mackenzie, M., 1749. The state of the tides in Orkney. *Philos. Trans. R. Soc.* 46, 149–160. <https://doi.org/10.1098/rstl.1749.0029>

Mariconda, P. R. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano*. 2011.

Mariconda, P. R. *Francis Bacon e as marés: a concepção da natureza e o mecanicismo*. **Scientiae Studia**, v. 5, p. 501-519, 2007.

Mariconda, P. R. *Galileu e a teoria das marés*. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, n. 1-2, p. 33-71, 1999.

Mariconda, P. R. *O alcance cosmológico e mecânico da carta de G. Galilei a F. Ingoli*. **Scientiae Studia**, v. 3, p. 443-466, 2005.

Marmer, H. A. *On cotidal maps*. **Geographical Review**, v. 18, n. 1, p. 129-143, 1928.

Marmer, H. A. *Problems of Tides*. **The Scientific Monthly**, Vol. 14, No. 3 (Mar., 1922), pp. 209-222.

- Marmer, H. A. *Tides in the Bay of Fundy*. **Geographical Review**, v. 12, n. 2, p. 195-205, 1922.
- Martins, L. A. C. P. *História da ciência: objetos, métodos e problemas*. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 02, p. 305-317, 2005.
- Martins, R. A. *Galileo e a rotação da Terra*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 11, n. 3, p. 196-211, 1994.
- Maury, J. P. *Marées*. In: Lecourt, D. (Ed.). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris: PUF, 1999. p. 608-11
- McCully, J. G. *Beyond the moon: A conversational common sense guide to understanding the tides*. World Scientific, 2006.
- McGee, C. *Jean Le Rond d'Alembert biography of a mathematician, philosopher, and man of*. 2008.
- McMullin, E. The fertility of theory and the unit of appraisal in science. In: COHEN, R. S. et al. (Ed.). *Essays in memory of Imre Lakatos*. Dordrecht: Reidel, 1976. p. 395-437.
- McTighe, T. P. Galileo's 'platonism': a reconsideration. In: McMULLIN, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988, p. 365-87.
- Millburn, J.R., 1988. *Wheelwright of the Heavens. The Life and Work of James Ferguson, FRS*. Vade-Mecum Press, London. 339pp.
- Mitchell, H., 1948. *Glossary of Geodesy* (US Government Printing Office)
- Moray, R., 1665. A relation of some extraordinary tides in the West-Isles of Scotland, as it was communicated by Sr. Robert Moray. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1, 53–55. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0026>.
- Moray, R., 1666. Considerations and enquiries concerning tides; likewise for a further search into Dr. Wallis's newly published hypothesis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1, 298–301. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0113>
- National Geodetic Survey (US); United States. National Ocean Service. Office of Charting; Geodetic Services. **Geodetic glossary**. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Charting and Geodetic Services, 1986.

Naylor, R. *Paolo Sarpi and the first Copernican tidal theory*. **The British Journal for the History of Science**, v. 47, n. 4, p. 661-675, 2014.

Newton, I. *The principia - Mathematical principles of natural philosophy*. Tradução I. B. Cohen & A. Whitman. Berkeley: University of California Press, 1999.

Newton, I. *Principia, Livros II e III—Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. 2020. Tradução de André Koch Torres Assis e Fábio Duarte Joly.

Open University Course Team 2002. *Waves, tides and shallow-water process*. 2th ed. England. 227p.

Pagnini, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. 4v.

Palmerino. *The Reception of the Galilean Science of Motion in Seventeenth-Century Europe*, pp. 200 op books.google.nl

Philips, H. *A letter written to Dr. John Wallis by Mr. Henry Philips, containing his observations about true time of the tides*. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 3, n. 34, p. 656-659

Popper, K. R. *Objective knowledge*. Oxford: Clarendon Press, 1974.

Ptolemeu com Frank E. Robbins, trans., *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Book 1, chapter 2.

Pugh, D.T., Woodworth, P.L., 2014. *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN: 9781107028197. 408 pp.

Reilly, C., 1974. Athanasius Kircher S.J.: Master of a Hundred Arts, 1602–1680. Edizioni del Mondo, Wiesbaden and Rome. 207 pp.

Rees, G (Ed.). *Philosophical studies* c. 1611-c. 1619. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1996. (The Oxford Francis Bacon, vi).

Robbins, F. E. Tradução de *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Livro 1, Cap. 2.

Rosa, C. A. P. *História da ciência: da antiguidade ao renascimento científico*.

In: **História da ciência: da antiguidade ao renascimento científico**. 2012. p. 469-469.

Rosmorduc, J.; Fernandes, C. *De Tales a Einstein: história da Física e da química*. 1983.

Roos, A.M., 2001. Thomas Philipot and chemical theories of the tides in seventeenth century England. *Ambix* 48, 125–136. <https://doi.org/10.1179/amb.2001.48.3.125>.

Rossi, P. *La scienza e la filosofia dei moderni*. Torino: Bolati Boringuieri, 1989.

Rossiter, J.R., 1971. The history of tidal predictions in the United Kingdom before the twentieth century. *Proc. R. Soc. Edinb. B* 73, 13–23. <https://doi.org/10.1017/S0080455X00002071>

Russo, L. *Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens*. Übersetzt aus dem Italienischen von Bärbel Deninger, Springer 2005, [ISBN 978-3-540-20938-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-20938-6), <http://books.google.com.br/books?id=iIsfBAAAQBAJ&pg=PA351&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Saraiva, M. F. O. **Astronomia & Astrofísica**. Editora Livraria da Física, 2004.

Shea, N. M. *Estimating the power in the tides*. **The Physics Teacher**, v. 25, n. 7, p. 426-426, 1987.

Shea, W. *Descartes as critic of Galileo*. In: BuTTS, R. E. & PITT, J. C. (Ed.). *New perspectives on Galileo*. Dordrecht: Reidel, 1978. p. 139-59.

Shum, C. K. et al. *Accuracy assessment of recent ocean tide models*. **Journal of geophysical research: oceans**, v. 102, n. C11, p. 25173-25194, 1997.

Soares, R. G.; de Amorim, H. S. *Um marégrafo ultrassônico baseado na placa Arduino para investigação do fenômeno das marés*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 2, p. 925-943, 2020.

Sosio, L. Galileo e la cosmologia. In: Galileu Galilei. *Dialogo soprai due massimi sistemi del mondo*. Introdução e notas L. Sosio. Torino: Giulio Einaudi Editore, 1970. p. ix-lxxxvii.

Stevin, S.; Crone, E. **Principal works**. CV Swets & Zeitlinger, 1955.

Teoria de marés da Galileu - Fonte: <<https://cref.if.ufrgs.br>>. Acesso em: 04/04/2023.

Thomson, W. (Lord Kelvin), 1882. *The Tides: Evening lecture to the British Association at the Southampton meeting*. Disponível em:  
<https://sourcebooks.fordham.edu/mod/1882kelvin-tides.asp>

Tidal heating – Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_heating)>. Acesso em 04/04/2023.

Todorov, I. *Galileo (1564-1642) and Kepler (1571-1630): the modern scientist and the mystic*. **arXiv preprint arXiv:1610.05749**, 2016.

Tolmacheva, M. (27 de janeiro de 2014). Glick, Thomas F., ed. *Geography, Chorography. Medieval Science, Technology, and Medicine: An Encyclopedia*. [S.l.]: Routledge. p. 188. [ISBN 9781135459321](https://doi.org/10.1080/07325306.2014.881111)

Tonel, A. P.; Marranghello, G. F. *O movimento aparente da Lua*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, 2013.

Tradução comentada dos três primeiros capítulos do *Tetrabiblos* de Ptolomeu, Marcus Reis Pinheiro, Cristina de Amorim Machado, *Cad. Hist. Fil. Ci., Campinas, Série 4*, v. 1, n. 2, p. 301-332, jul.-dez. 2015, p.312.

Tyson, P., 2002. *Galileo's Big Mistake*. NOVA Science Trust.  
<https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/galileo-big-mistake/>.

Udíás, A., 2020. *Athanasius Kircher and terrestrial magnetism: the magnetic map*. *J. Jesuit Stud.* 7, 166–184. <https://doi.org/10.1163/22141332-00702002>.

Unesco 1985. *Manual de medição e interpretação do nível do mar*. Comissão Oceanográfica Internacional. 82p.

van Lunteren, F., 1993. Eighteenth-century conceptions of gravitation. In: Petry, M.J. (Ed.), *Hegel and Newtonianism*. *Archives Internationales D'Histoire des Idées/International Archives of the History of Ideas*, vol. 136. Springer, Dordrecht, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1662-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1662-6_24).

Voelkel, J. R. *The composition of Kepler's Astronomia nova*. Princeton University Press, 2002.

Wallis, F. *Bede, the Reckoning of Time* (Translated Texts for Historians; V.29). Liverpool University Press, 1999.

Wallis, J., 1666. *An essay of Dr. John Wallis, exhibiting his hypothesis about the flux and reflux of the sea*. **Phil. Trans. R. Soc. London** 1, 263–281. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0108>. 281–289, <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0109> and 297–298, <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0112>.

Wilde, C.B., 1980. Hutchinsonianism, natural philosophy and religious controversy in eighteenth century Britain. *Hist. Sci.* 18, 1–24. <https://doi.org/10.1177/007327538001800101>.

Wolfschmidt, G. *Navigare necesse est – Geschichte der Navigation: Begleitbuch zur Ausstellung 2008/09 in Hamburg und Nürnberg*. Norderstedt, 2008. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=BYyLsHineFAC&pg=PA25&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Woodworth, P. L. (2010). *A survey of recent changes in the main components of the ocean tide*. *Continental Shelf Research*, 30(15), 1680–1691. doi:10.1016/j.csr.2010.07.002.

Woodworth, P.L., 2002. *Three Georges and one Richard Holden: the Liverpool tide table makers*. **Trans. Hist. Soc.** Lancashire Cheshire 151, 19–51.

Woodworth, P.L., Rowe, G.H., 2018. *The tidal measurements of James cook during the voyage of the Endeavour*. **Hist. Geo Space Sci.** 9, 85–103. <https://doi.org/10.5194/hgss-9-85-2018>.

Woodworth, P. L. *Tidal science before and after Newton*. In: **A Journey Through Tides**. Elsevier, 2023. p. 3–36 (e suas referências).

Woppelmann, G., Pouvreau, N., Simon, B., 2006. Brest Sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. *Ocean Dyn.* 56, 487–497. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0044-z>

Young T = “A.L.” (1823). *Tides*, **Supplement** to the 4th, 5th and 6th edns of *Encyclopaedia Britannica*, 6 vols (1815–1824), Napier M (ed), vol 6, pp 658–675. Constable, Edinburgh. Also in [8], 2:291–335

Young T = “E.F.G.H.” (1813). *A theory of tides, including the consideration of resistance*. *Nicholson’s J* 35:145–159, 217–227. Also in [8], 2:262–290