



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

Roteiro didático: Forças de marés

João Carlos Ferreira Menezes Junior
Antônio Carlos Fontes dos Santos

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de João Carlos Ferreira Menezes Junior, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
26 de junho de 2023

Roteiro didático: Forças de marés

João Carlos Ferreira Menezes Junior
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 pergunta 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.

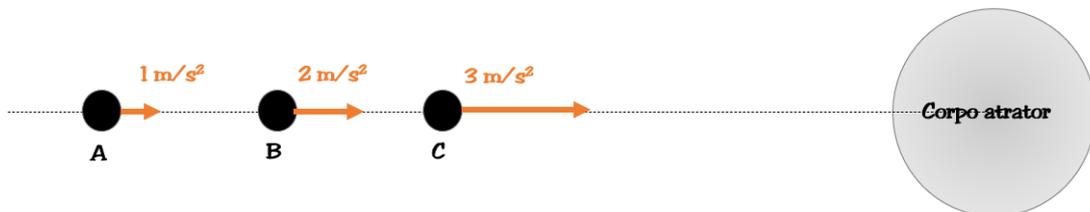
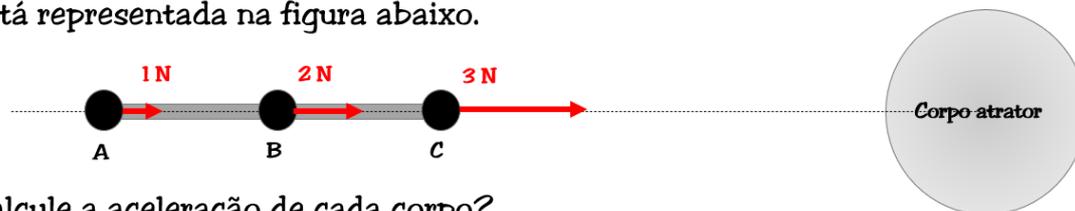


Figura 1. Sistema de três corpos de mesma massa submetidos a um campo gravitacional não uniforme. Baseado em da Silveira (2003). Fonte: autor, 2023.

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 m/s^2 . No entanto, como o corpo C apresenta uma aceleração menor (2 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 m/s^2) do que a produzida pelo campo gravitacional (1 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 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.

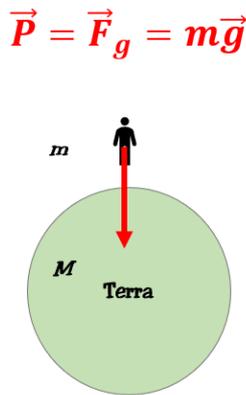
Agora, deve-se realizar um exercício de confrontar uma situação real com as situações ideais que os livros trazem. O professor deverá deixar claro que qualquer sistema real (Terra, por exemplo) não é rígido e, portanto, a ocorrência dessas forças internas, devidas ao campo gravitacional não uniforme 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 escala¹:

i) Partícula



ii) Corpo extenso

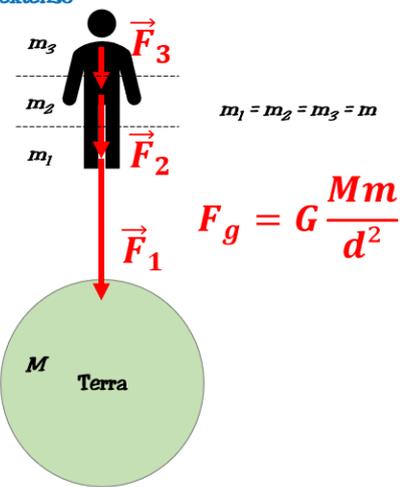


Figura 3. Uma partícula e um corpo extenso, ambos submetidos a um campo gravitacional não uniforme. Fonte: autor, 2023.

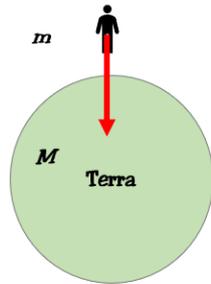
A situação da esquerda mostra uma pessoa sendo atraída nas intermediações da superfície da Terra, ou seja, ela estará submetida a uma força gravitacional (força peso) $\vec{P} = m\vec{g}$. A situação da direita mostra uma pessoa “gigante” sendo atraída pelo planeta Terra a uma distância consideravelmente maior que o raio da Terra. Por didatismo, divide-se a pessoa “gigante” em três partes de massas iguais ($m_1 = m_2 = m_3$) 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 gravitacional). Toda a

¹ Todas as imagens apresentadas estão fora de escala.

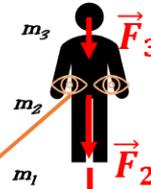
análise é feita de forma qualitativa, sem contas expressas. Mas agora, pede-se aos alunos que imaginem o olho desse “gigante” em sua barriga.

i) Partícula

$$\vec{P} = \vec{F}_g = m\vec{g}$$



ii) Corpo extenso



$$m_1 = m_2 = m_3 = m$$

$$F_g = G \frac{Mm}{d^2}$$

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.

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

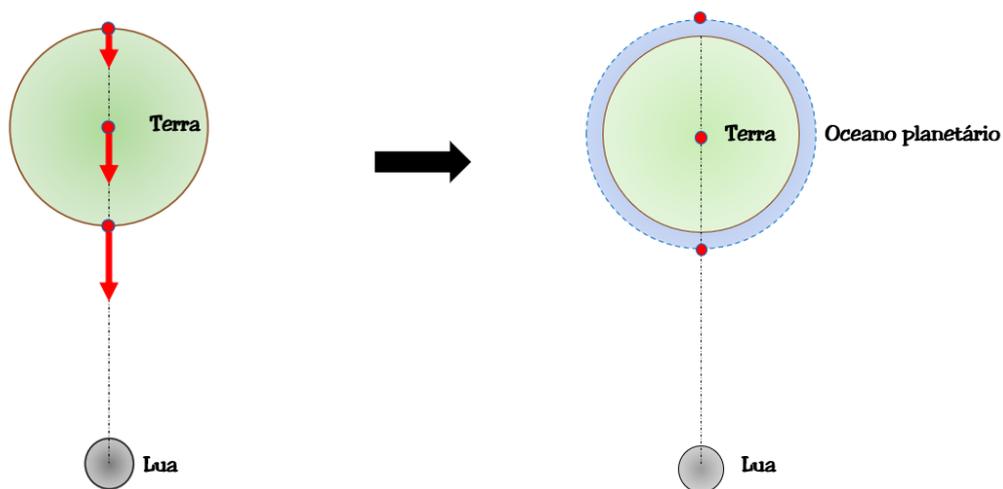


Figura 5. Sistema Terra-Lua. O modelo “estático” das marés adotado é o de Newton. Fonte: autor, 2023.

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). Pede-se 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:

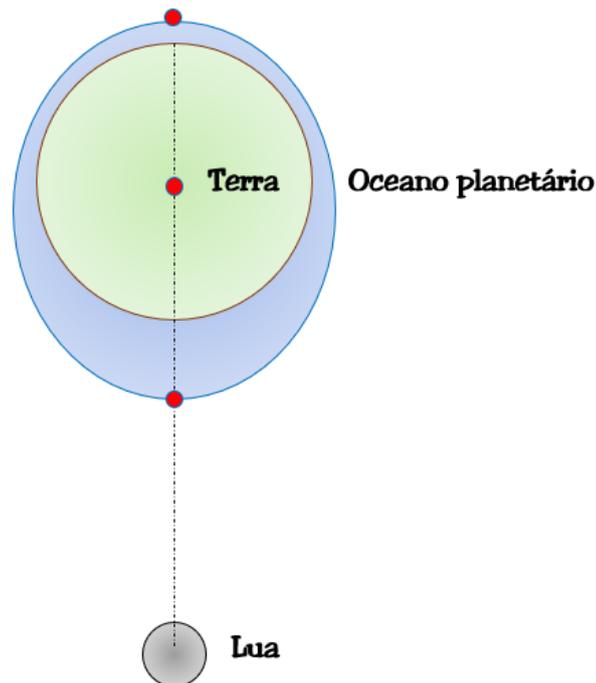


Figura 6. Concepção alternativa muito comum dos estudantes com relação à configuração das marés na Terra devido à Lua. Fonte: autor, 2023.

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:

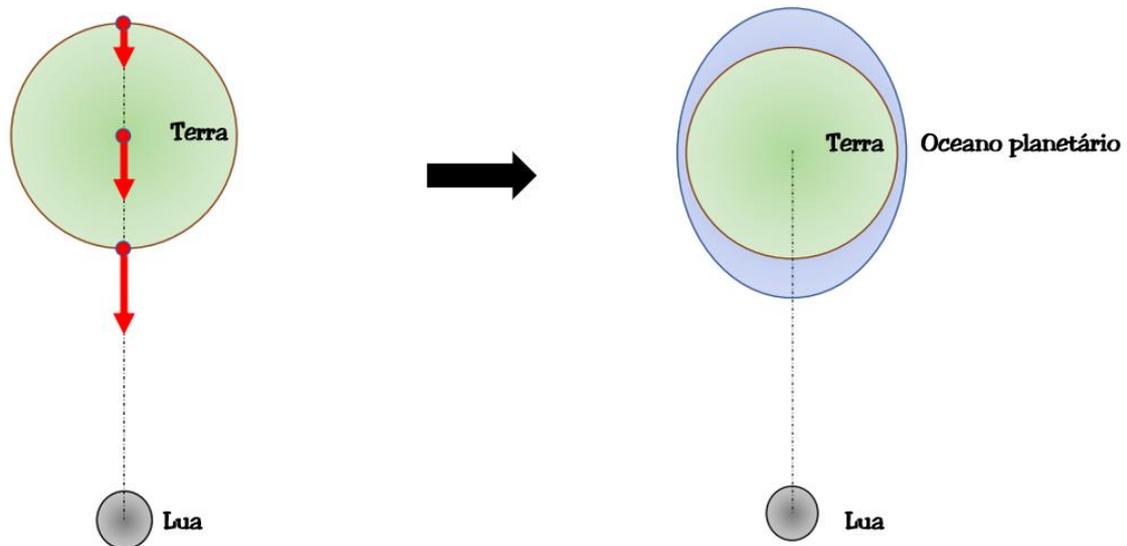


Figura 7. Configuração real das marés no modelo “estático”. Fonte: autor, 2023.

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:

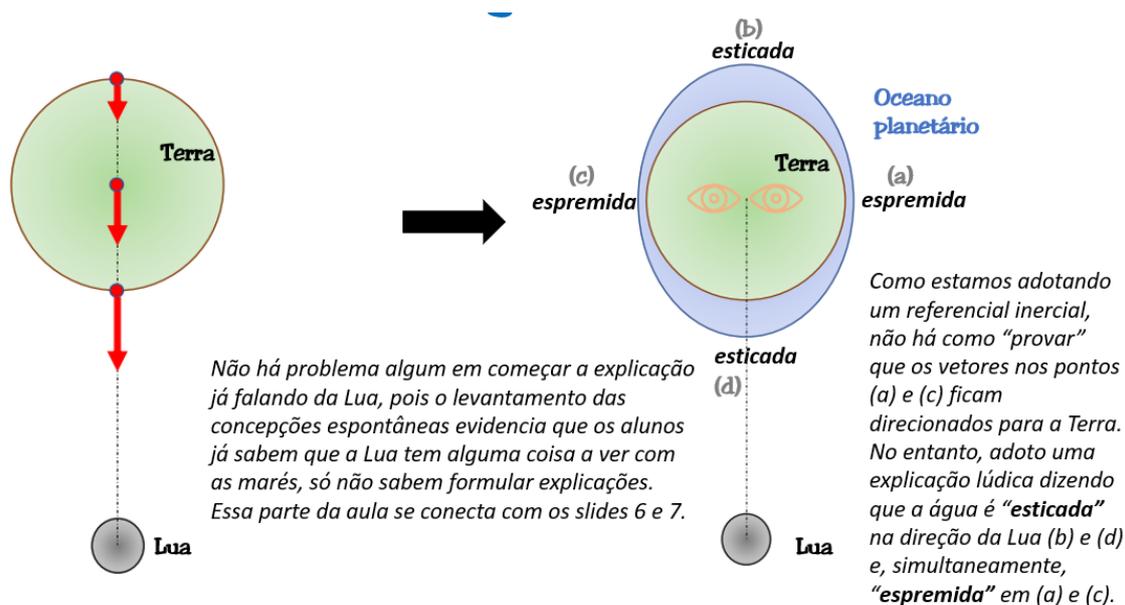


Figura 8. Explicação simples e qualitativa das duas protuberâncias de marés na Terra por conta da Lua. Fonte: autor, 2023.

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:

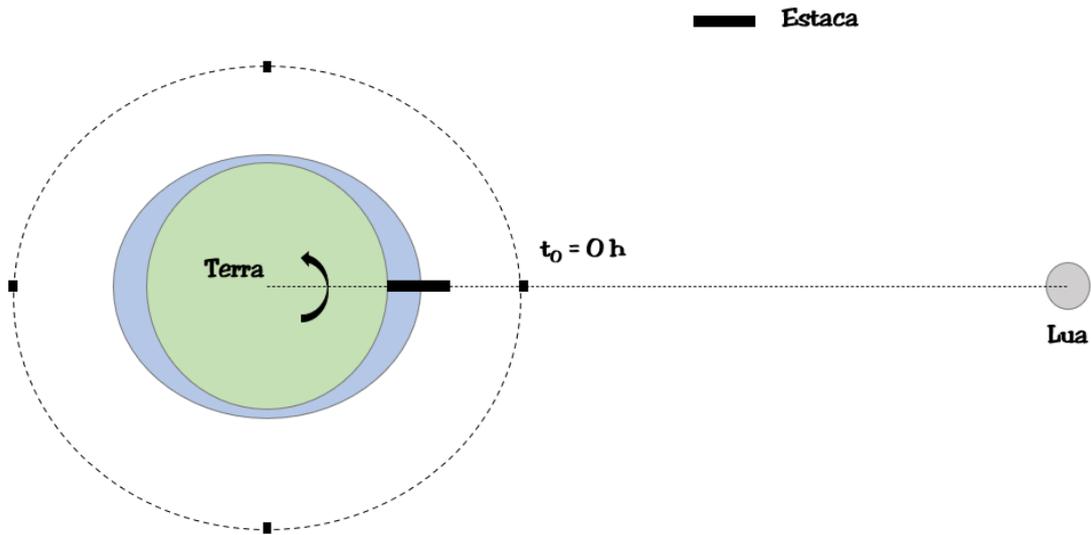


Figura 9. Periodicidade das marés [parte 1]. Fonte: autor, 2023.

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:

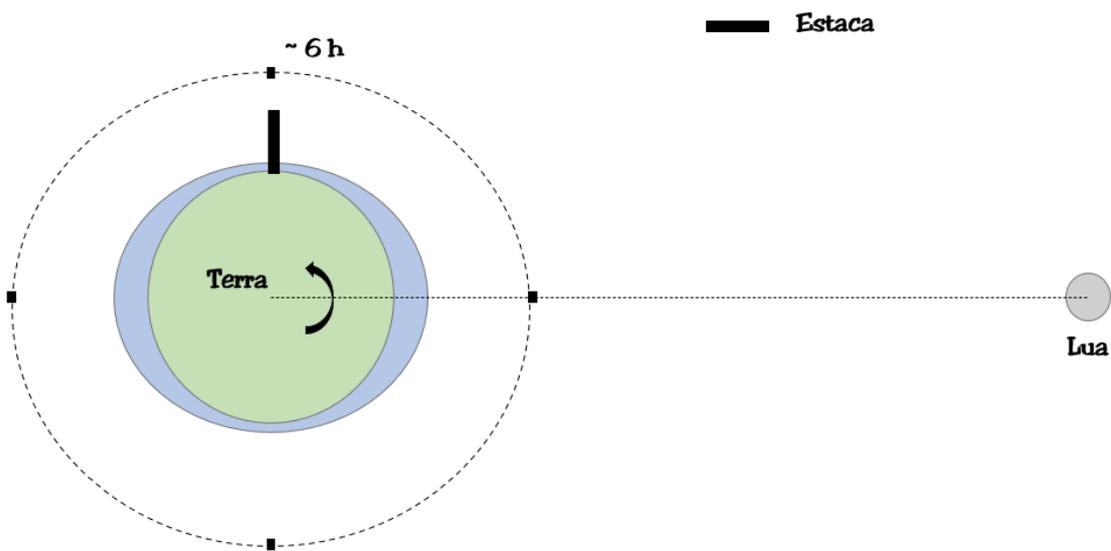


Figura 10. Periodicidade das marés [parte 2]. Fonte: autor, 2023.

Passadas mais 6 h (12 h no total), deverá ocupar a seguinte posição:

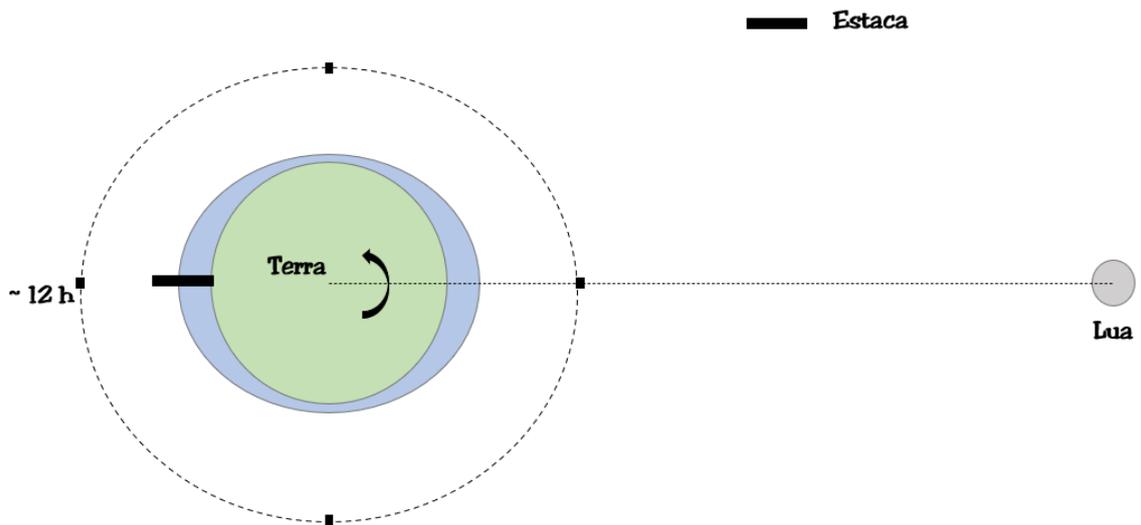


Figura 11. Periodicidade das marés [parte 3]. Fonte: autor, 2023.

Passadas mais 6 h (18 h no total), deverá ocupar agora a seguinte posição:

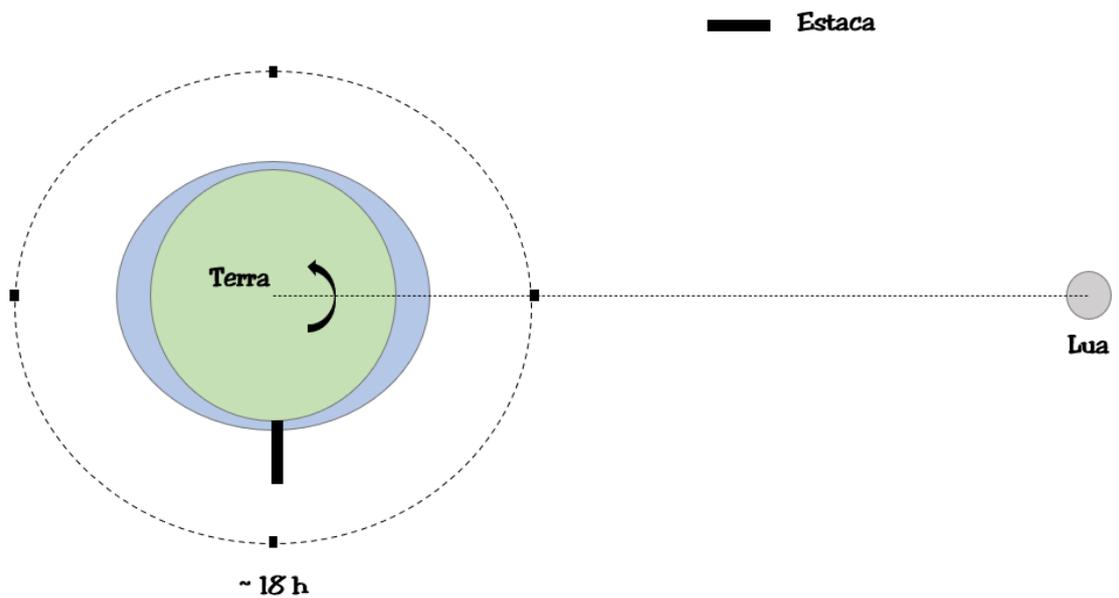


Figura 12. Periodicidade das marés [parte 4]. Fonte: autor, 2023.

E, por fim, passadas mais 6 h (24 h no total), deverá retornar à posição original:

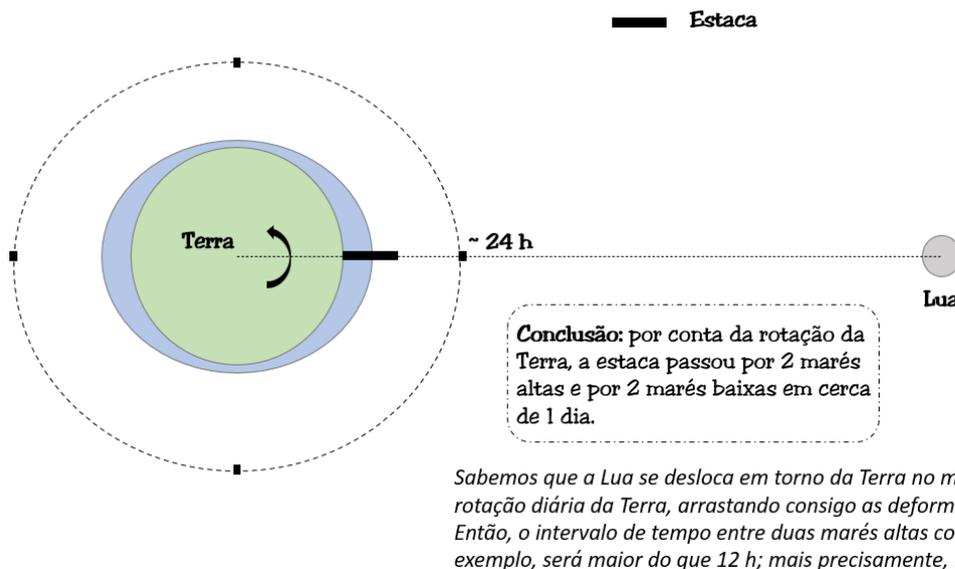


Figura 13. Periodicidade das marés [parte 5]. Fonte: autor, 2023.

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

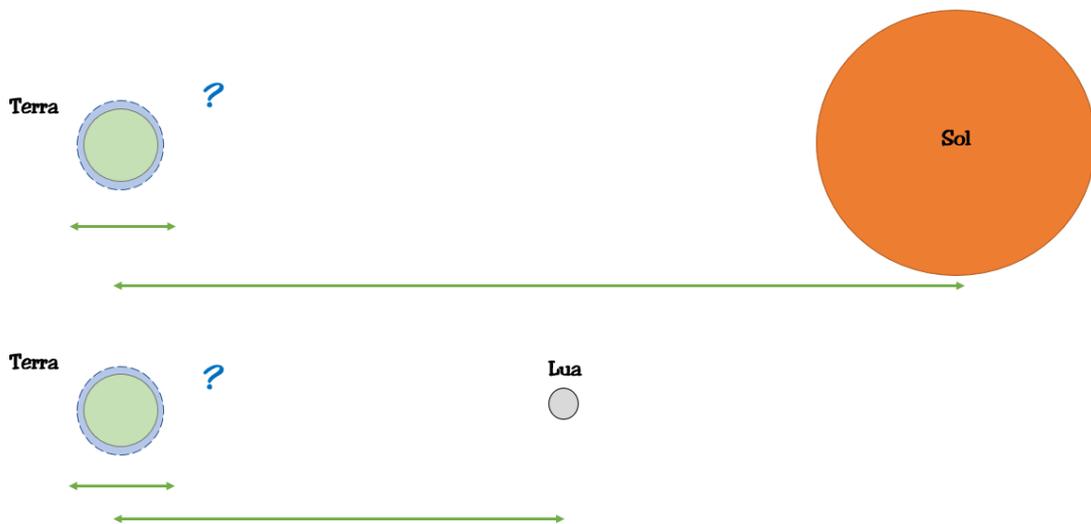


Figura 15. Comparação entre os gradientes gravitacionais solar e lunar sobre a Terra [parte 1]. Fonte: autor, 2023.

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 par 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.

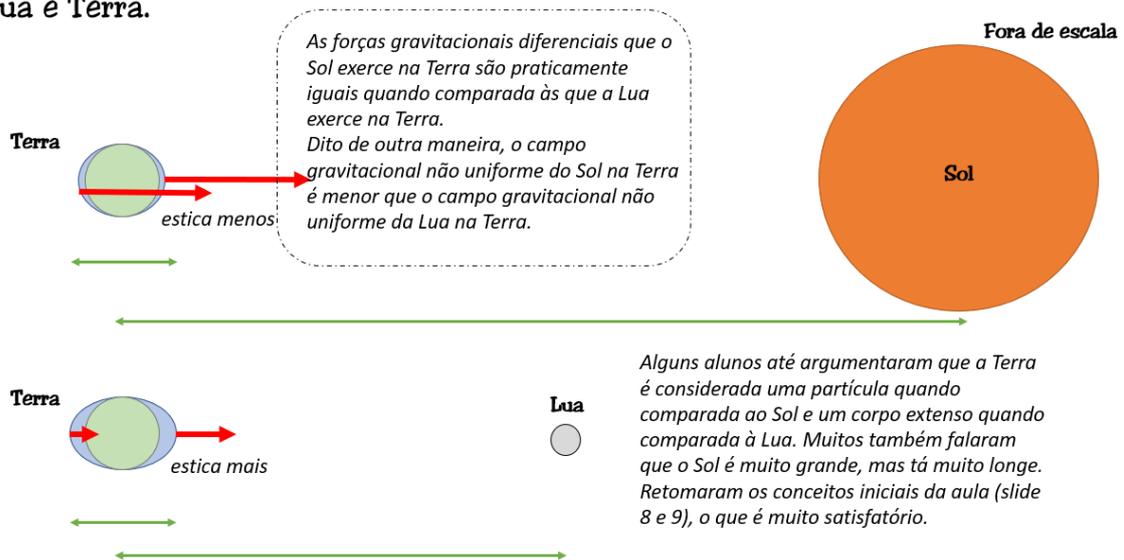


Figura 16. Comparação entre os gradientes gravitacionais solar e lunar sobre a Terra
[parte 2]. Fonte: autor, 2023.

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

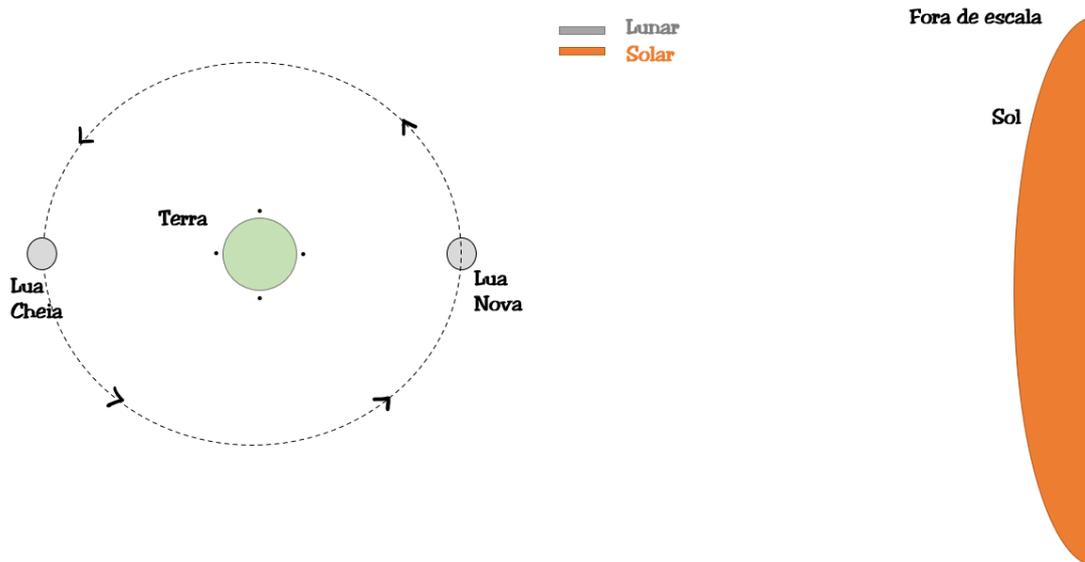


Figura 17. Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 1].
Fonte: autor, 2023.

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

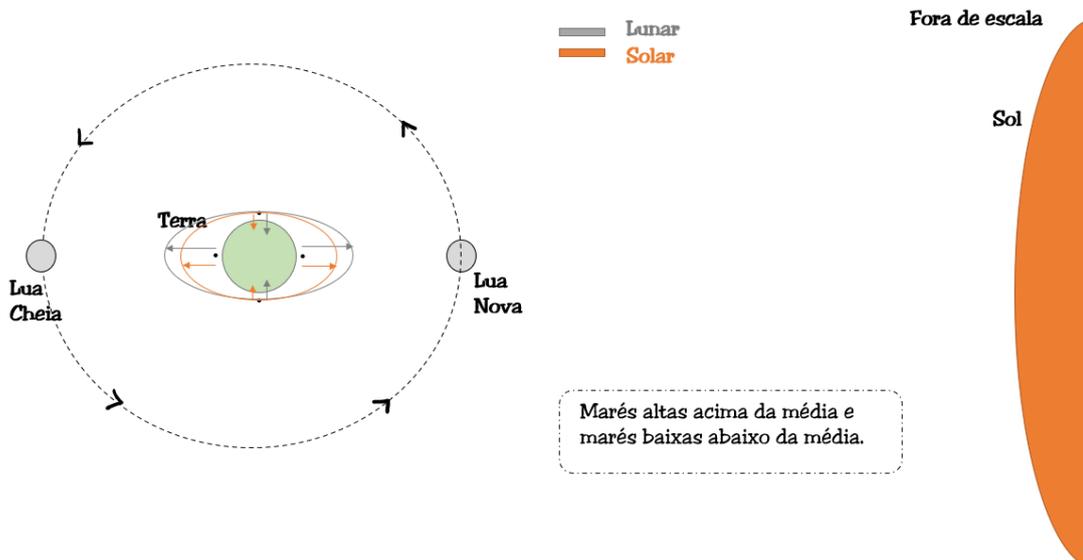


Figura 18. Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 2].

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 sizígia, 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 sizígia.

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

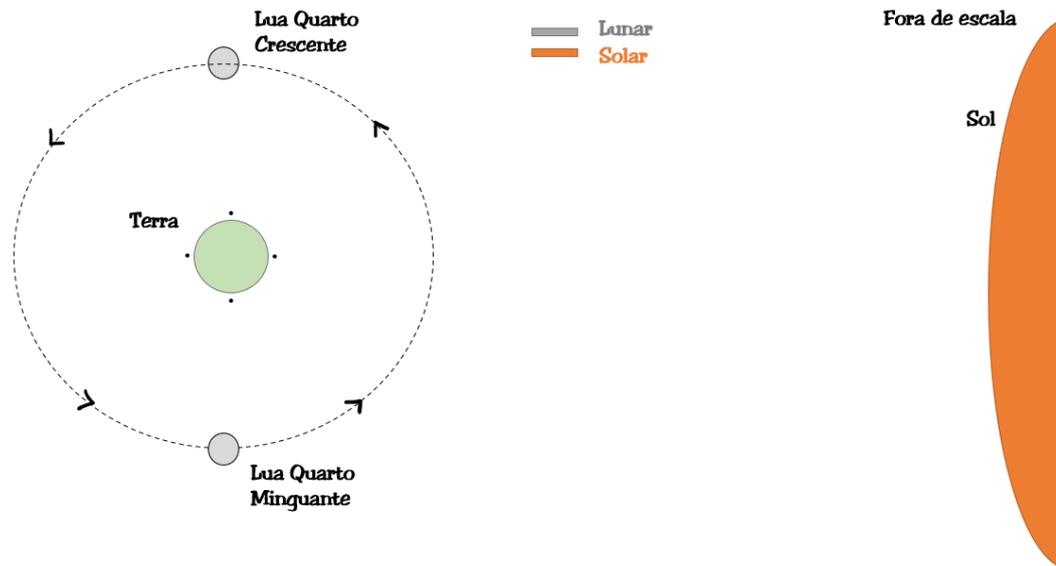


Figura 19. Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 3].

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

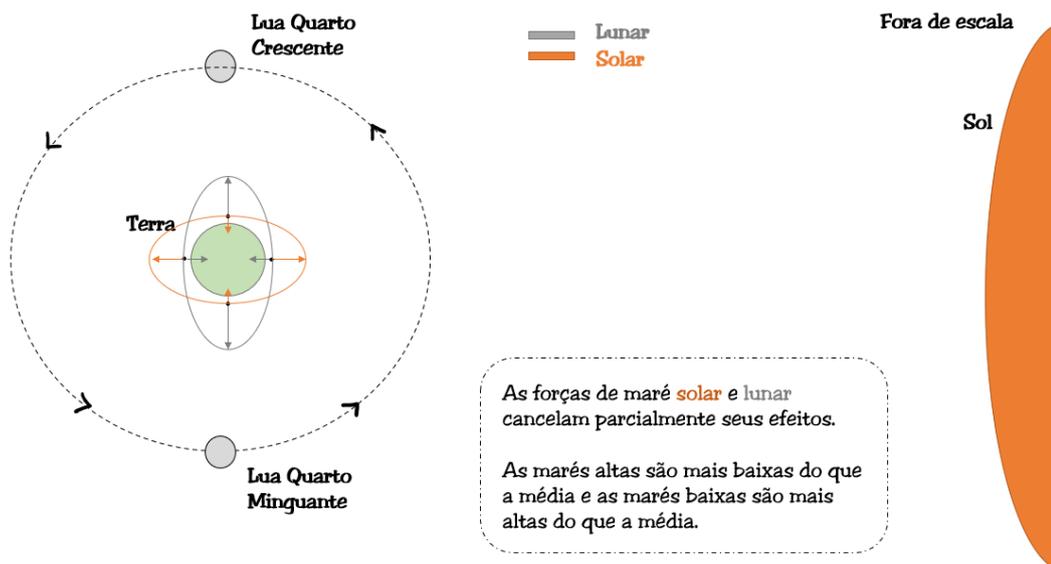


Figura 20. Composição das forças de maré solares e lunares sobre a Terra [parte 4].

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. 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.

4. 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.