

lato

Marés

Adriano Hoth Cerqueira

Física - UESC

Curso de Extensão – Junho de 2009



UESC



Tábua de Marés





Tábua de Marés

◆ **Algumas conclusões preliminares:**

1 - Existem duas marés baixas e duas marés altas por dia;

2 - De um dia para o outro, duas marés altas (ou baixas) consecutivas não ocorrem com 24 horas de diferença; existe um atraso de aproximadamente 1 hora para uma mesma maré;

3 - A intensidade da maré varia mensalmente;

4 - A intensidade da maré varia diariamente.





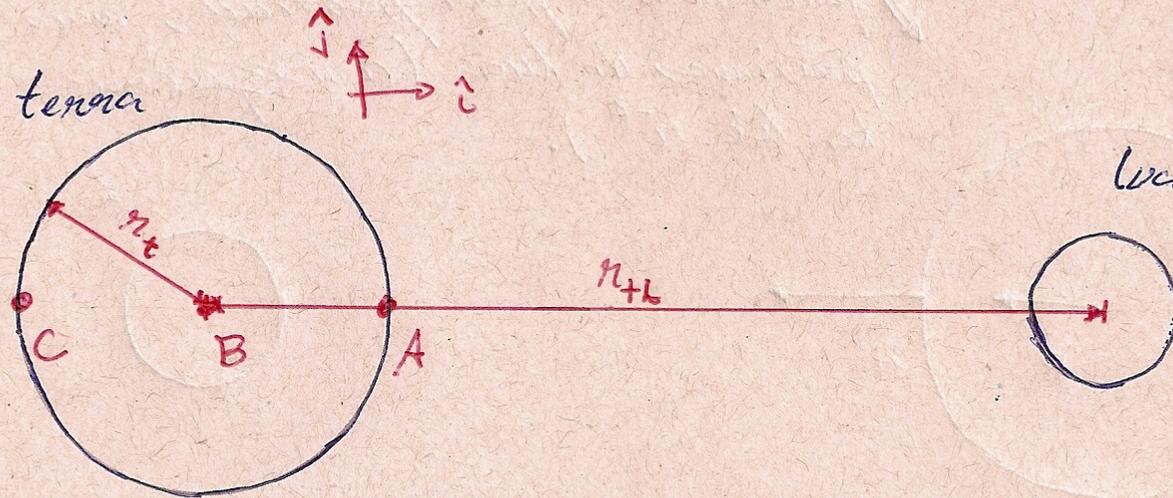
lato

A causa das marés

Efeito gravitacional da Lua sobre os oceanos



SISTEMA TERRA-LUA



Calcule as forças gravitacionais que a lua exerce em uma partícula de massa "m", nas posições A, B e C:

$$\vec{F}_A = \frac{GM_L m}{(r_{tL} - r_t)^2} \hat{i}$$

$$\vec{F}_B = \frac{GM_L m}{r_{tL}^2} \hat{i}$$

$$\vec{F}_C = \frac{GM_L m}{(r_{tL} + r_t)^2} \hat{i}$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

$$r_{tL} = 3,8 \times 10^8 \text{ m}$$

$$r_t = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$$

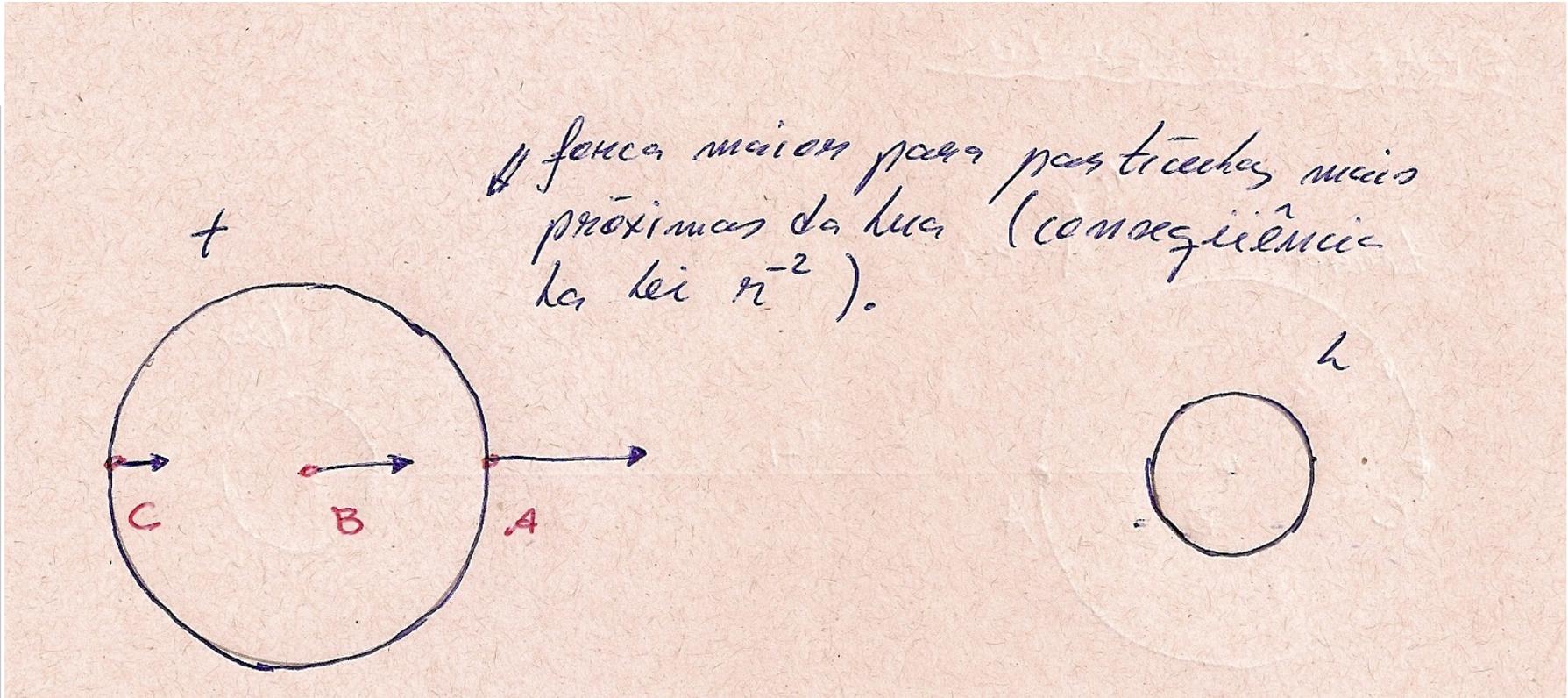
$$M_L = 7,36 \times 10^{22} \text{ kg}$$





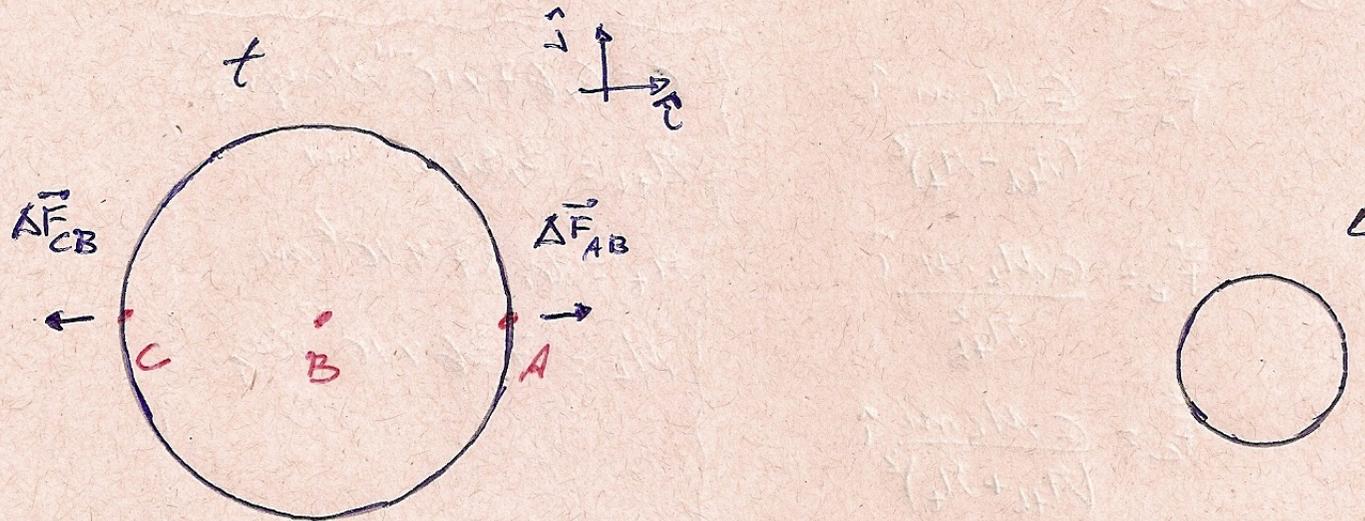
A causa das marés

lato



A causa das marés

CÁLCULO DA DIFERENÇA ENTRE AS FORÇAS



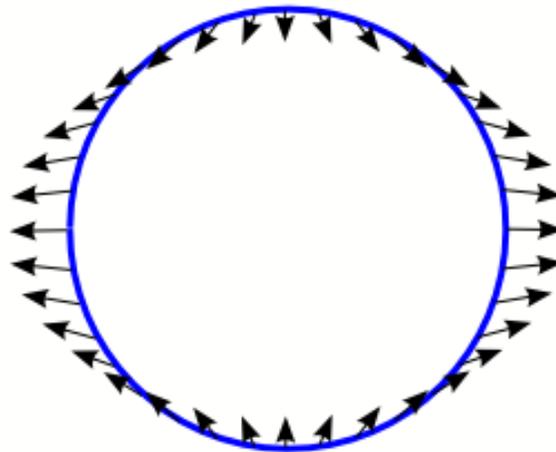
$$\Delta \vec{F}_{AB} = \vec{F}_A - \vec{F}_B = GM_L m \left[\frac{1}{(r_{tL} - r_t)^2} - \frac{1}{r_{tL}^2} \right] \hat{i} \quad (\text{aponta para a lua})$$

$$\Delta \vec{F}_{CB} = \vec{F}_C - \vec{F}_B = GM_L m \left[\frac{1}{(r_t + r_{tL})^2} - \frac{1}{r_{tL}^2} \right] \hat{i} \quad (\text{aponta na direção oposta à da lua})$$



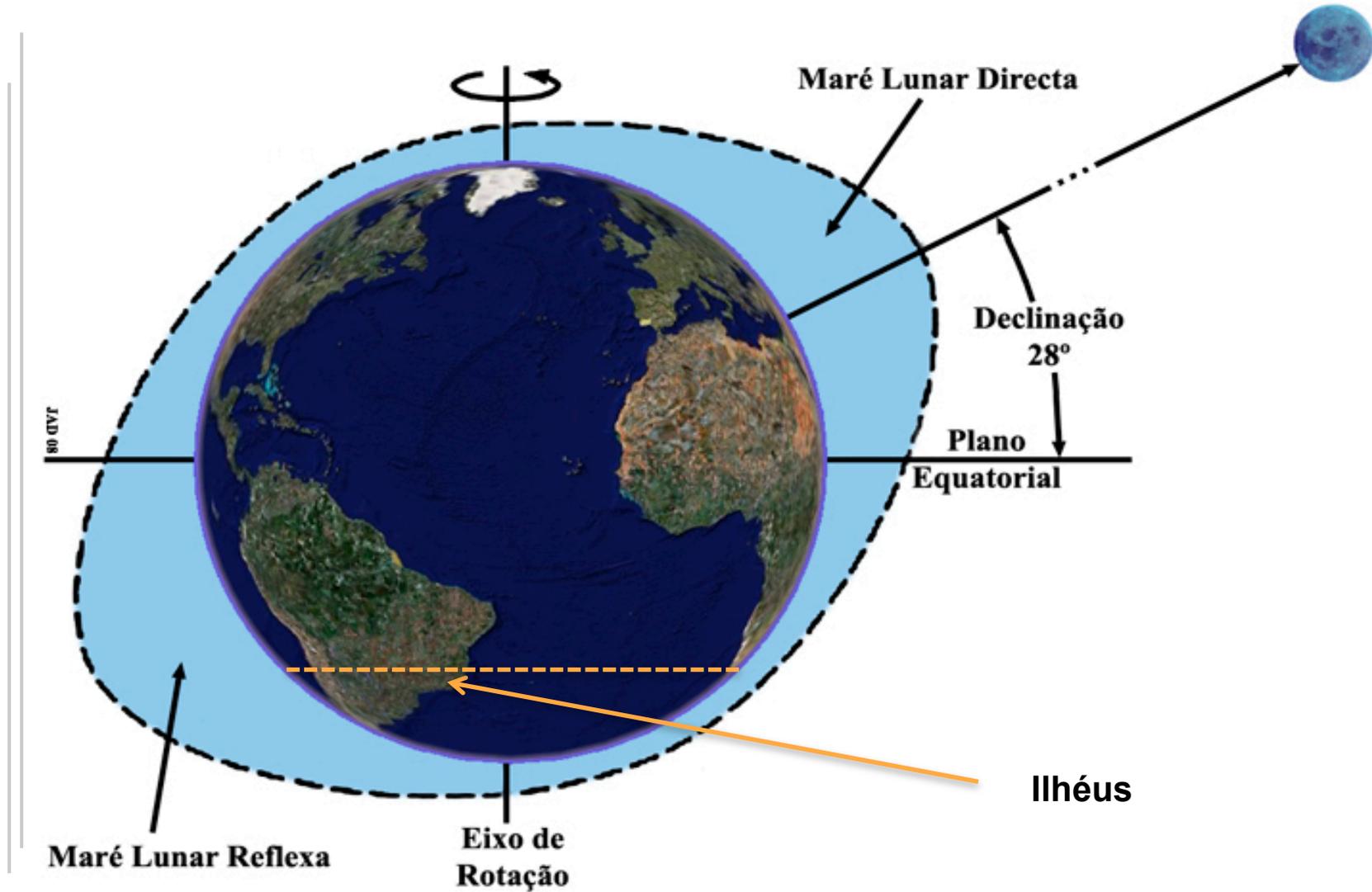
A causa das marés

Fazendo o mesmo cálculo para todos os pontos da superfície da Terra, obteremos algo do tipo:





Variabilidade local diária entre maré direta e reflexa





A causa das marés

Contudo, tanto a amplitude das marés varia com o tempo (Lua), quanto a reincidência das mesmas varia com período diferente de 24 horas.

Além disso, há uma variação anual importante com relação às marés.





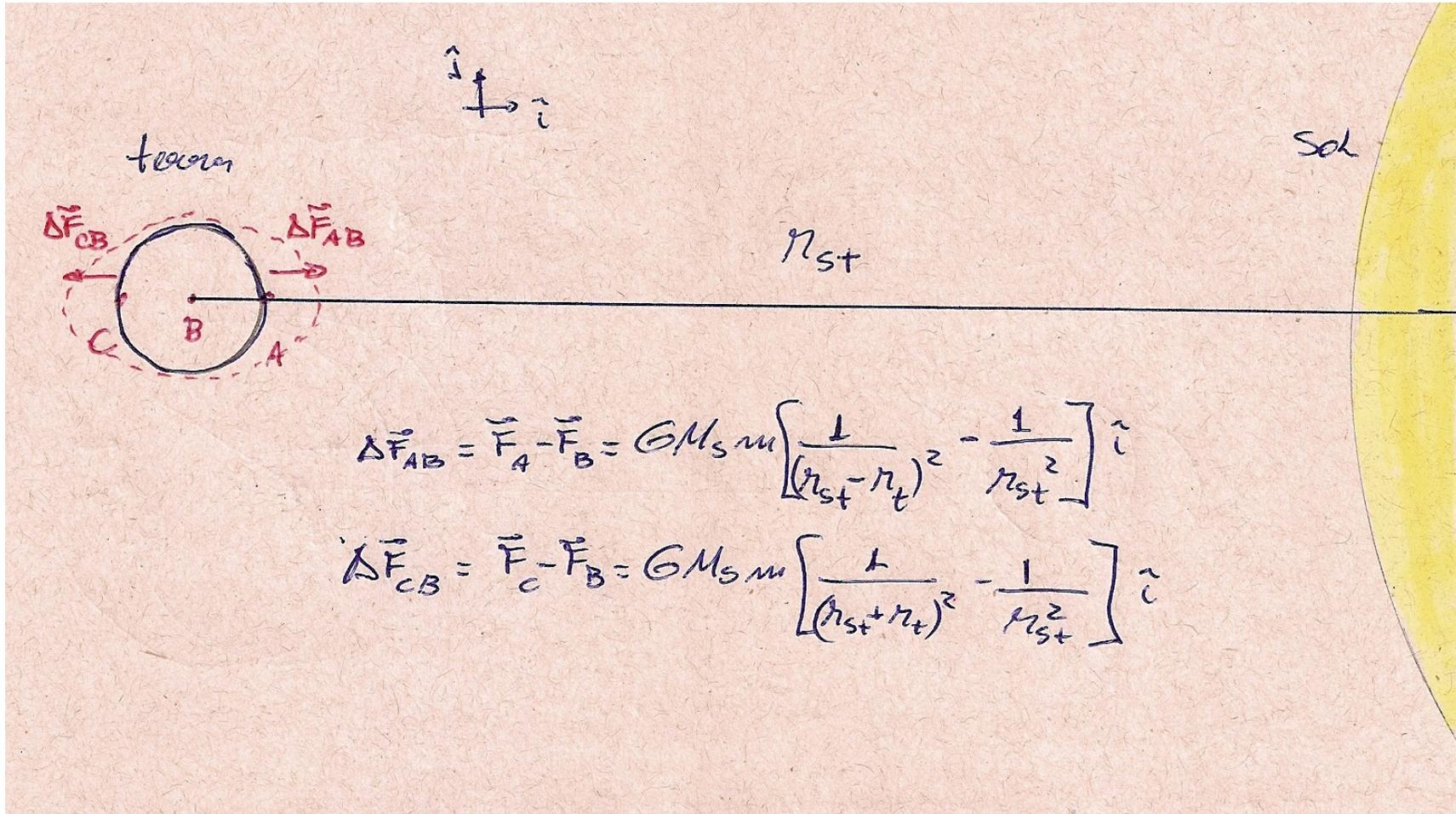
A causa das marés: o papel do Sol

Podemos fazer o mesmo cálculo das *forças diferenciais* que uma partícula sofre na superfície da Terra, mas agora considerando o Sol ao invés da Lua. Nas equações obtidas anteriormente, basta substituímos a distância Lua-Terra pela distância Sol-Terra.





A causa das marés: o papel do Sol



ESTIMATIVA PARA AS INTENSIDADES DAS MARÉS CAUSADAS
PELO SOL E PELA LUA:

$$|\Delta \vec{g}| = \frac{|\Delta(\Delta \vec{F})|}{m} = \frac{|\Delta \vec{F}_{AB} - \Delta \vec{F}_{CB}|}{m}$$

PARA A LUA: $|\Delta \vec{g}|_L = GM_L \left[\frac{1}{(r_{tL} - r_t)^2} - \frac{1}{(r_{tL} + r_t)^2} \right]$

$$|\Delta \vec{g}|_L \approx 2,28 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

PARA O SOL: $|\Delta \vec{g}|_S = GM_S \left[\frac{1}{(r_{st} - r_t)^2} - \frac{1}{(r_{st} + r_t)^2} \right]$

$$|\Delta \vec{g}|_S \approx 1,0 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

→ MARÉS LUNARES SÃO $\approx 2,2 \times$ MAIS
INTENSAS DO QUE AS SOLARES!!

MAS ...





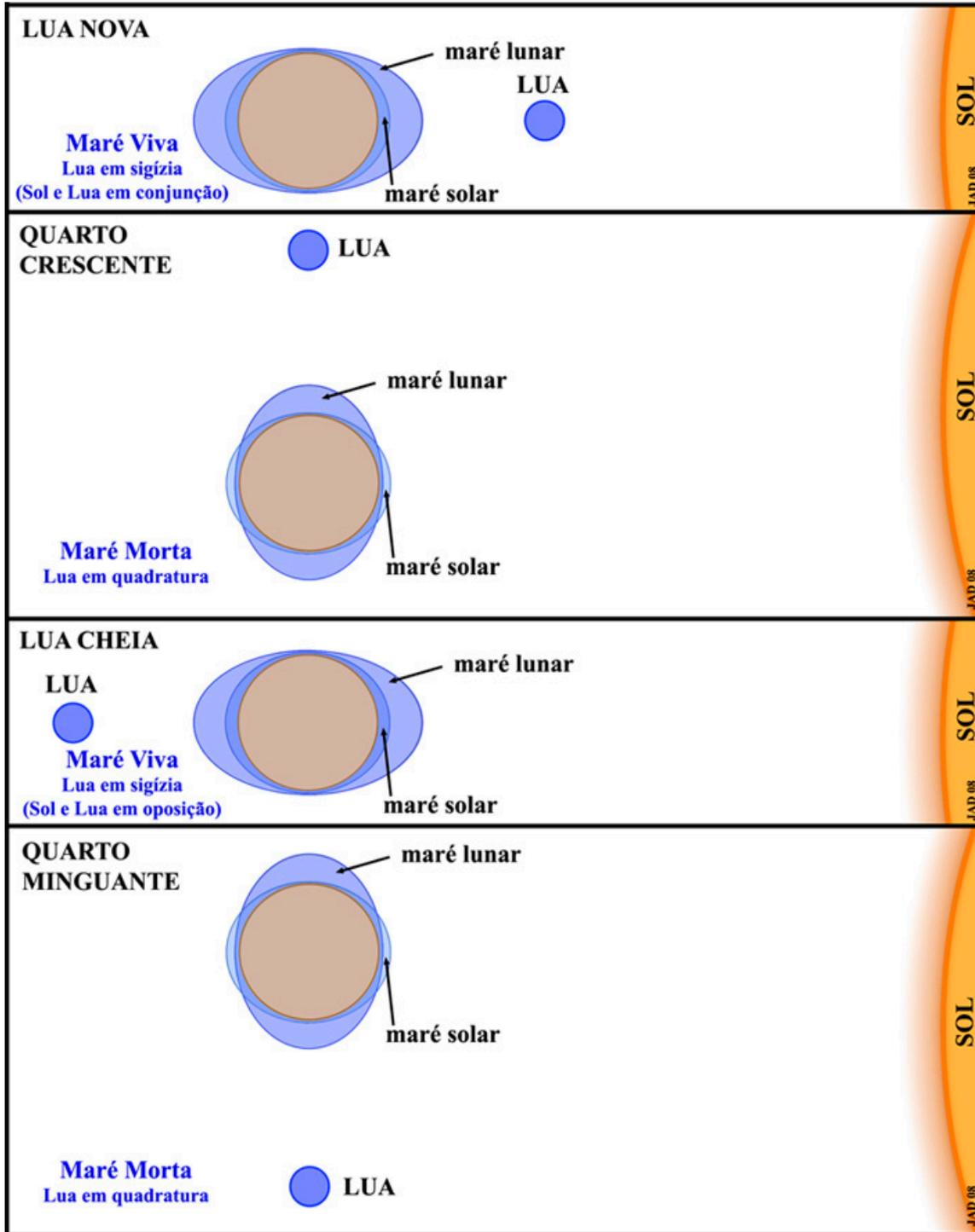
A causa das marés: o papel do Sol

... isto será suficiente para entendermos que este efeito combinado do Sol e Lua, com suas diferentes intensidades de maré, será o responsável por uma das variações temporais da amplitude das marés (e sua associação com as fases da Lua).



Maré de Sizígia

Maré de quadratura





Conclusões Preliminares:

1 - A dinâmica das marés é determinada, primordialmente, pela Lua e pelo Sol;

2 - As fases da Lua estão intrinsecamente relacionadas com as marés. As marés (de águas) vivas (ou de sizígea) estão associadas às luas nova e cheia, enquanto que as marés (de águas) mortas (ou de quadratura), estão associadas às luas crescente e minguante.

3 - Percebam o papel importante do Sol sobre as Marés.





Efeitos secundários, mas importantes:

1) Aumento das marés vivas nos **equinócios de outono** (21 de março) e no **equinócio da primavera** (23 de setembro) (que é quando o Sol passa pelo equador celeste). As **marés vivas equinociais** são utilizadas na legislação sobre zonas costeiras, no Brasil e em Portugal;

2) O alinhamento de planetas com o sistema Sol+Terra+Lua também é responsável por um acréscimo na amplitude das marés (sobretudo Vênus).





O que vimos até agora?

Intensidade das marés varia com as fases da Lua, devido à posição relativa da Lua com relação ao Sol e a Terra; em outras palavras, devido à soma dos efeitos gravitacionais da Lua e do Sol sobre a Terra quando alinhados (luas nova e cheia).

As marés altas (e baixas) em um mesmo dia não são de mesma intensidade. Motivo: obliquidade da órbita da Lua com relação ao equador terrestre.





A translação da Lua e seu efeito sobre as Marés:

Alguns fatos interessantes:

Mês sinódico (lunação): intervalo de tempo entre duas fases iguais consecutivas da Lua, que é de aproximadamente 29,5 dias;

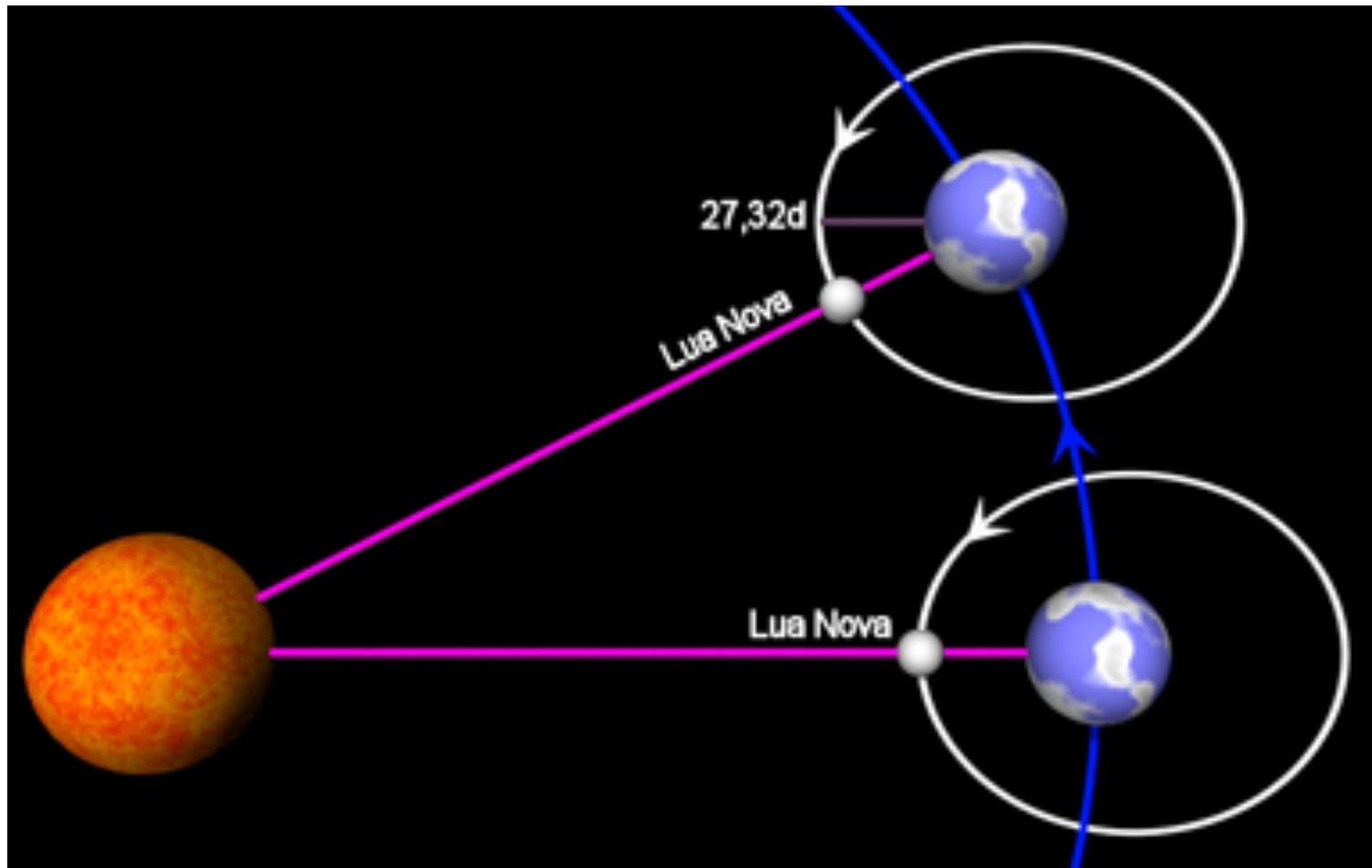
Mês sideral: deslocamento de 360° da Lua sobre a Terra (uma volta completa), em aproximadamente 27,3 dias.





A translação da Lua e seu efeito sobre as Marés:

Porque existe esta diferença?





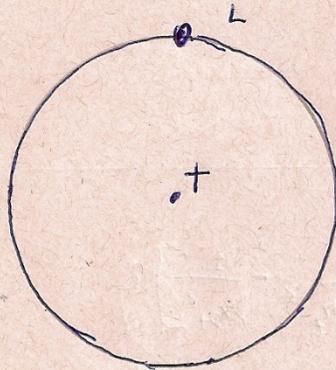
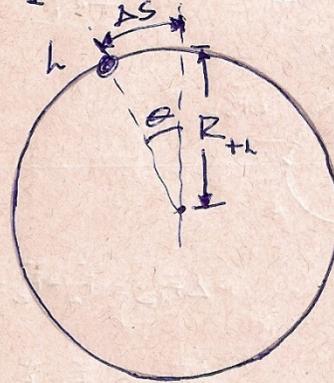
A translação da Lua e seu efeito sobre as Marés:

Qual a relevância disto para as marés?

O fato do mês sideral ter 27,3 dias ocasiona um "atraso" diário no nascimento ou ocaso da Lua (e, certamente, na reincidência de uma determinada maré).

Obviamente, podemos calcular este atraso:



$t_0 = 0$  $t_1 = 24h \Rightarrow \Delta t = 24h$ 

As órbitas da lua
em torno da Terra.

$$\theta = \frac{L}{R_{+L}} = \frac{v \cdot \Delta t}{R} = \frac{\omega R_{+L} \cdot \Delta t}{R_{+L}} = \omega \cdot \Delta t = \frac{2\pi}{T} \cdot \Delta t$$

onde: θ = deslocamento angular da lua;
 v = velocidade da lua (em órbita)
 R_{+L} = distância da Terra à lua
 ω = velocidade angular
 Δt = intervalo de tempo em estudo (24h)
 T = mês sideral = 27,3 dias

fazendo as contas:

$$\theta \approx 13,18^\circ$$

Ou seja, como a cada 15°
corresponde a 1h, o "atraso"
da lua será de $\approx 53'$





A translação da Lua e seu efeito sobre as Marés:

Desta forma, somos levados a crer que o intervalo de tempo entre duas marés consecutivas em um mesmo dia (maré lunar direta e reflexa) é de $(24\text{h } 53\text{m} / 2) \sim 12\text{h } 25\text{m}$

Em outras palavras, a translação da Lua em torno da Terra é responsável pelo “atraso” de aproximadamente 1 h observada na Tábua de Maré no início deste seminário.





A translação da Lua e seu efeito sobre as Marés:

Coisas práticas: se alguém lhe convidar para ver os corais em Taipus de Fora na baixa-mar, na mesma hora em que ele lá esteve no dia anterior, busque outras atividades para fazer enquanto espera a Terra se deslocar de 13 graus (ou 1 hora) e a maré estiver vazando...

Se alguém lhe convidar para ver os corais em Taipus de Fora na baixa-mar, na mesma hora em que ele lá esteve há semanas atrás, você tem três alternativas: i) reze por uma coincidência, ii) consulte um pescador/prático ou uma tábua de marés, ou iii) vá assim mesmo e curta a praia (mas sabendo o que encontrará).





Problemas com nosso modelo estático...

Embora aparentemente o modelo apresentado tenha algum sucesso, ele tem uma falha.

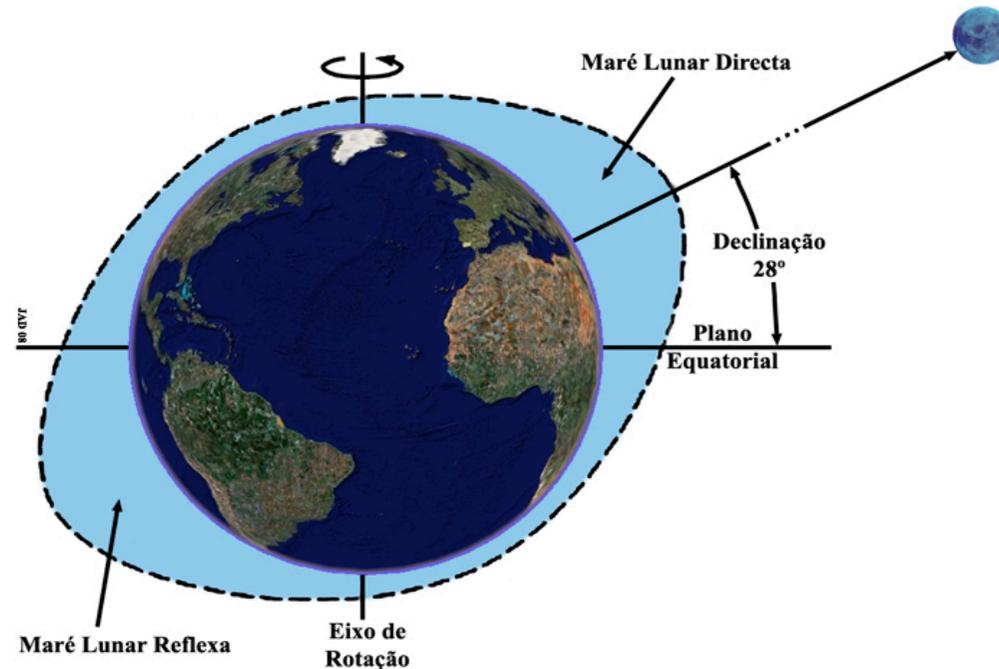
Fizemos todas os raciocínios considerando a Terra um sistema estático, sem rotação (a rotação foi incluída apenas indiretamente no cálculo do atraso das marés).

Vamos investigar, em primeiro lugar, o porque da necessidade de se incluir a rotação da Terra em um modelo dinâmico para as marés. E a indicação está na própria Tabela de Marés.





A necessidade de um modelo dinâmico para as marés:



O modelo estático prevê que a maré cheia ocorrerá na passagem da Lua pelo meridiano local (maré direta). Obviamente, uma maré cheia também ocorrerá na passagem da Lua pelo antimeridiano (maré reflexa).





A Tábua de Marés:

| | | |
|--------------|-------|-----|
| SEG 29/06/09 | 02:21 | 0.6 |
| | 08:51 | 1.7 |
| | 15:04 | 0.6 |
| | 21:24 | 1.6 |

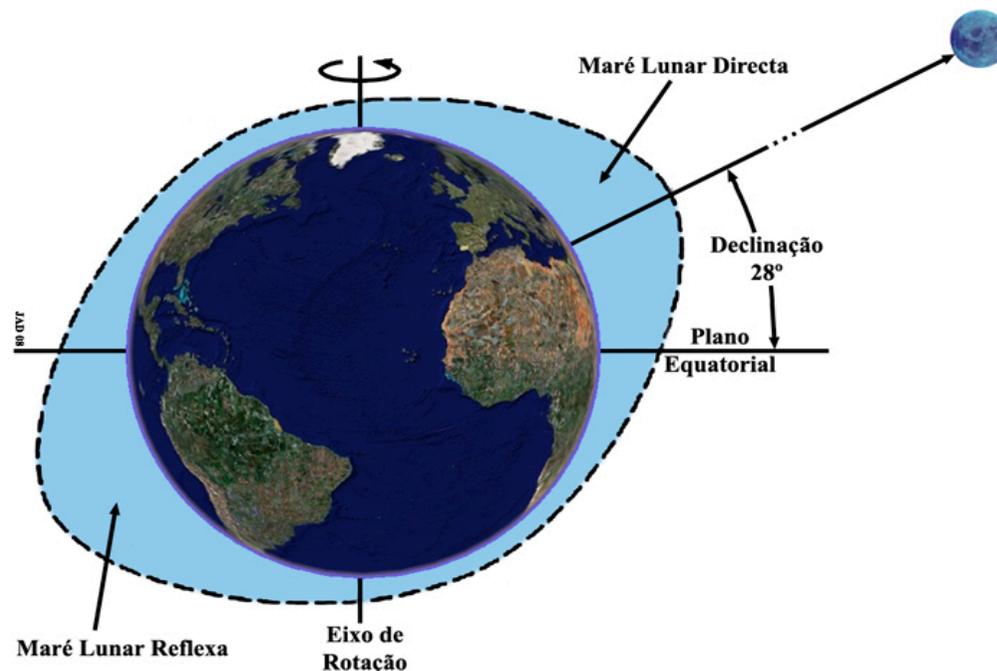
Previsão para hoje: marés altas às 08:51h e 21:24h. Vamos dar uma olhada no céu de hoje para ver onde a Lua se encontra a estas horas...





O modelo dinâmico: bojos de marés na Terra...

1 - Os bojos de massa de água formados na Terra devido à força diferencial de maré deveriam se alinhar com o sistema Terra-Lua, como na nossa já conhecida figura abaixo.





lato

O modelo dinâmico:

Mas isto não ocorre...

O bojo (massa de água) tende a "seguir" o movimento de rotação da Terra, que por sua vez é frenado pelo atrito com o fundo do oceano.

Isto faz com que a elevação da massa de água esteja um pouco "adiante" da linha Terra-Lua (desalinhado, portanto, com os centros de massa dos sistemas), devido à rotação da Terra.

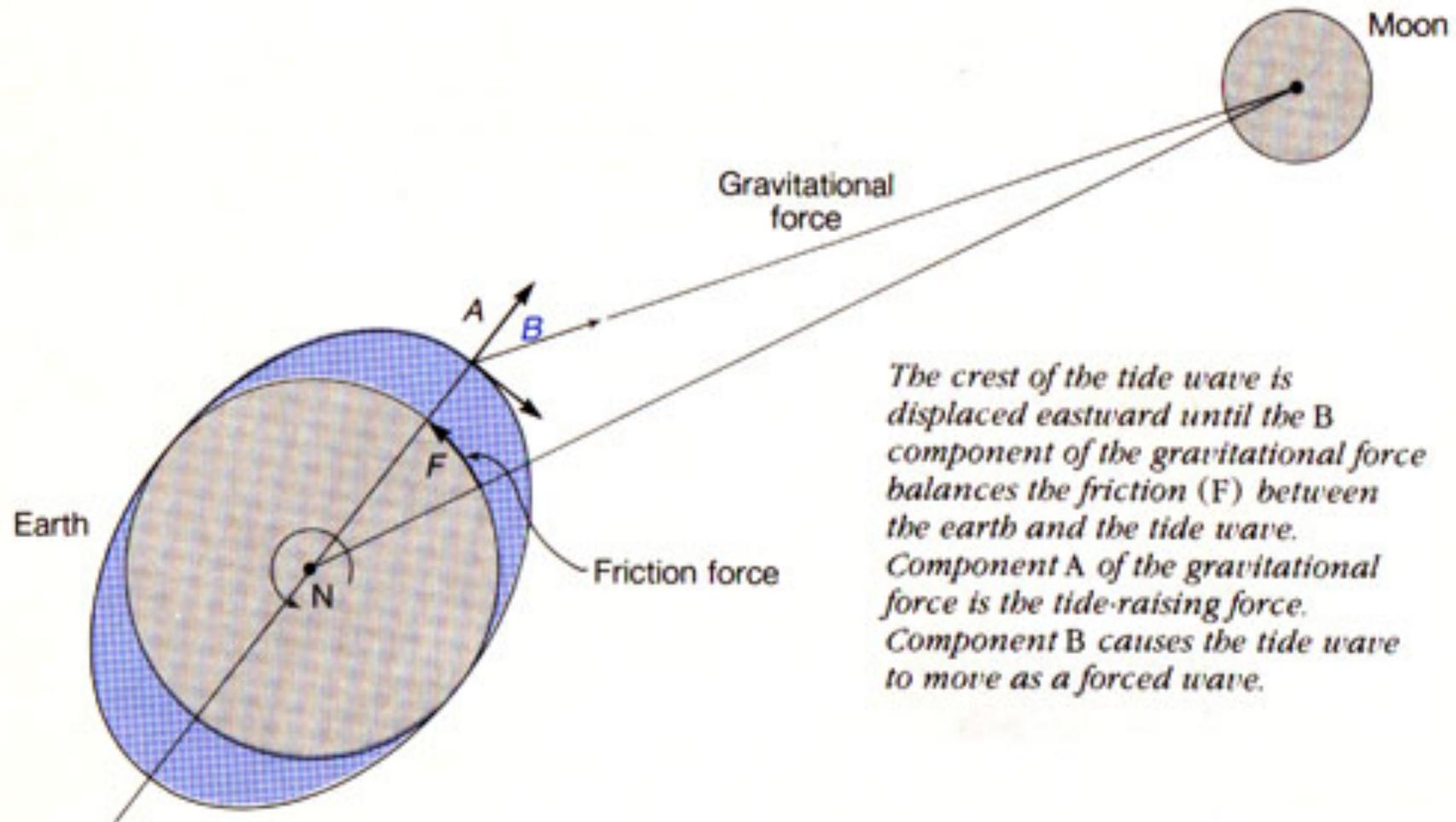
O quão adiante o bojo se desloca é determinado pelo equilíbrio entre a projeção da força gravitacional tangencial e a força de atrito:





to

O modelo dinâmico:



The crest of the tide wave is displaced eastward until the B component of the gravitational force balances the friction (F) between the earth and the tide wave. Component A of the gravitational force is the tide-raising force. Component B causes the tide wave to move as a forced wave.





O modelo dinâmico:

Este “adiantamento” do bojo reflete-se em um “atraso” no pico da maré alta. Ou seja, ela NÃO ocorre com a passagem da Lua pelo meridiano (antimeridiano) do local.

Este atraso pode ser de até 30 horas, dependendo do local. Freqüentemente, a maré pode ser cheia quando a lua estiver se pondo, o que causa uma certa confusão.

(O tempo decorrido entre a passagem da Lua pelo meridiano e o momento da maré alta na lua cheia ou nova é conhecido como “idade da maré”).





O modelo dinâmico:

Na prática, surgirão torques que farão com que a Terra diminua seu período de rotação...

Considerando o sistema Terra-Lua, se a Terra diminuir seu período de rotação (diminuindo seu momento angular intrínseco), a Lua se afasta da Terra.

Sabemos hoje que este afastamento se dá a uma taxa de 3 cm por ano.





O modelo dinâmico:

O mesmo raciocínio se aplica ao sistema Terra-Sol: as forças de marés do Sol sobre a Terra faz com que a mesma diminua sua velocidade de rotação. Ambos os efeitos somados levam a uma diminuição efetiva de 0.0016 s por século.

Usando a lei de conservação do momento angular, conclui-se que a órbita da Terra também aumenta com o tempo.





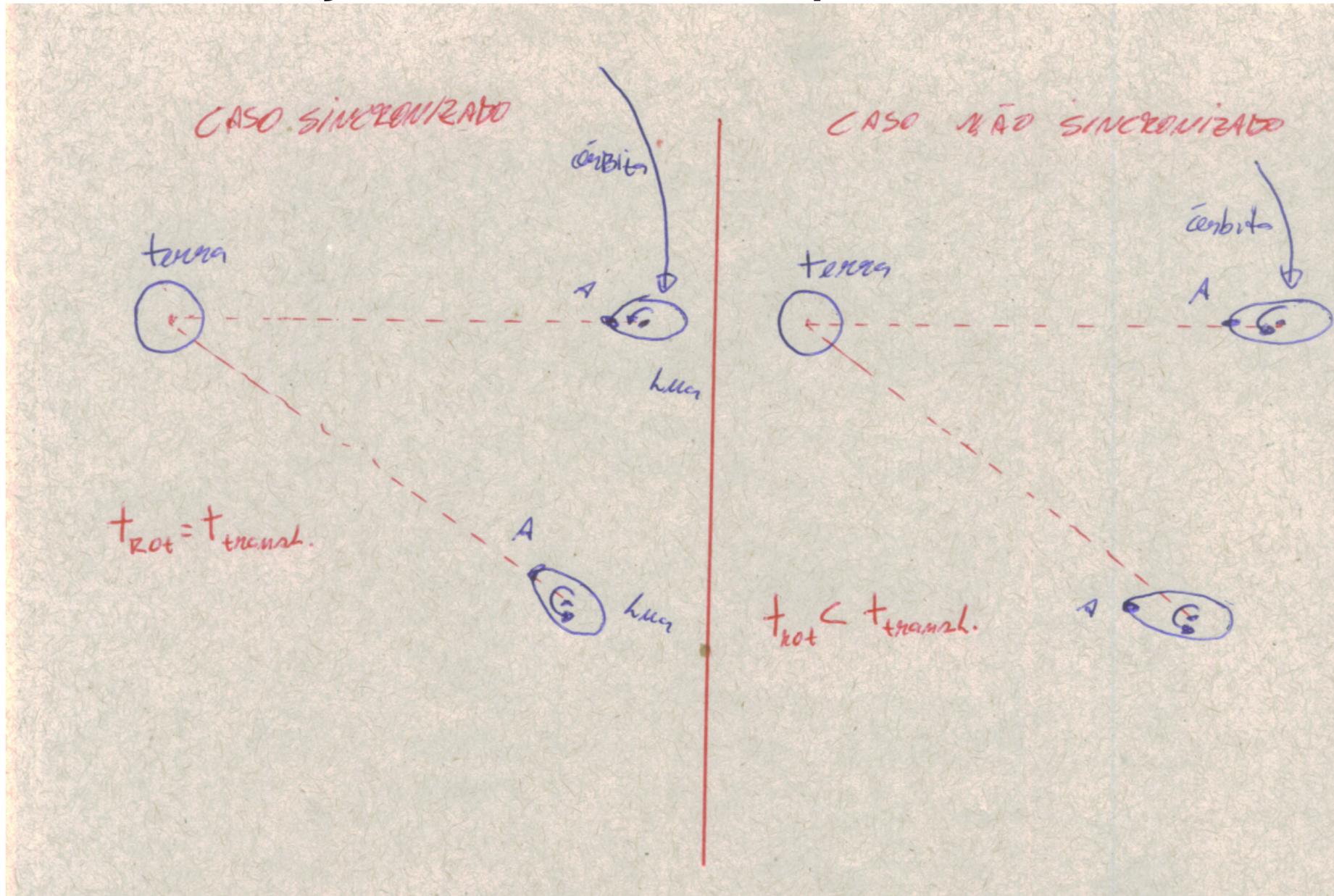
O modelo dinâmico: ... e a evolução do sistema TL...

As forças de marés também são responsáveis por outro fenômeno: a rotação sincronizada do sistema Terra-Lua.

Observação direta da Lua nos mostra que ela apresenta sempre a mesma face. Porque isto ocorre?

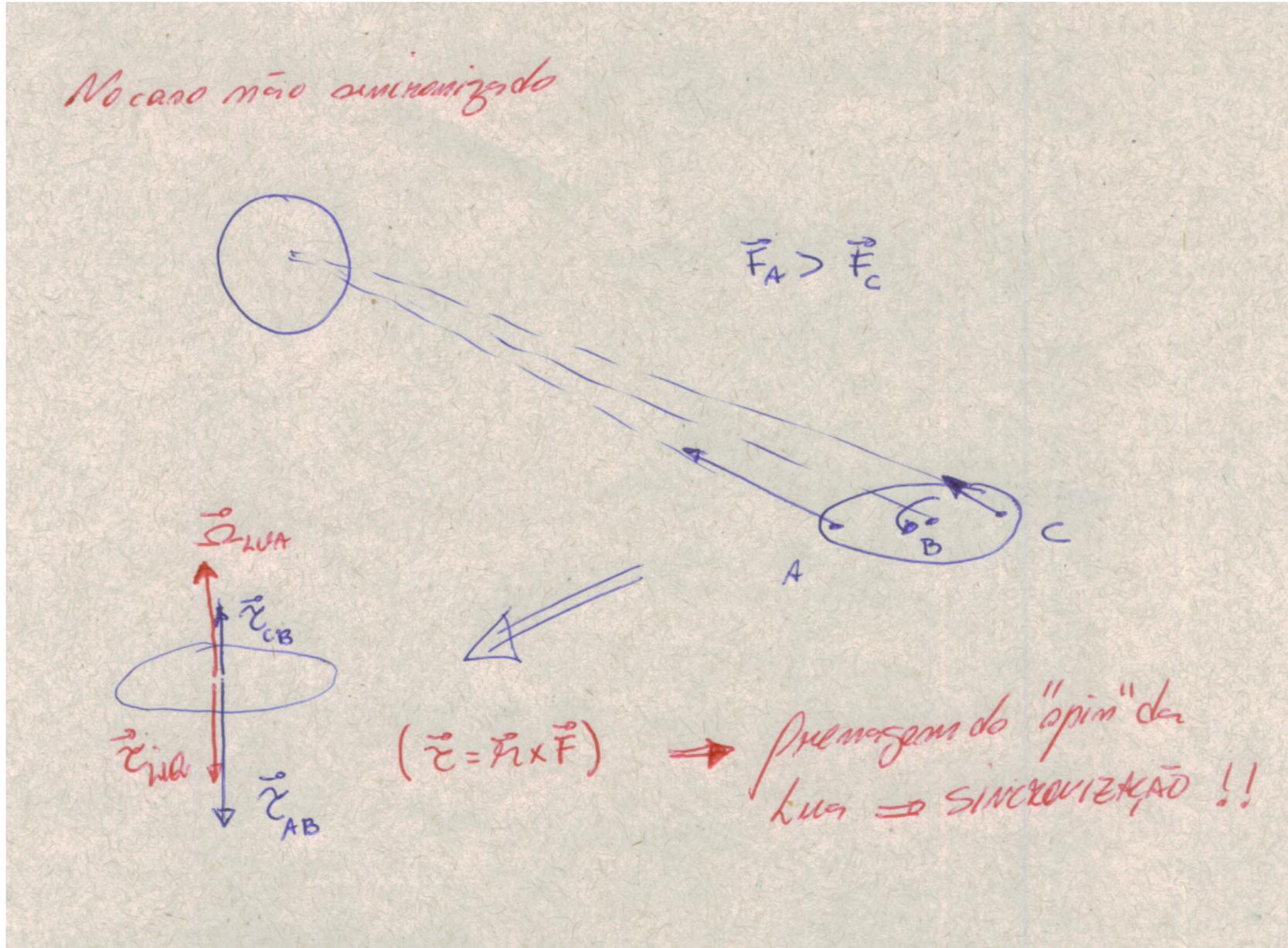


Rotação sincronizada: sempre a mesma face





Rotação sincronizada: sempre a mesma face





Rotação sincronizada:

Em outras palavras, ao longo dos anos, os torques ocasionados pelas forças de maré da Terra sobre a Lua fizeram com que a Lua, hoje, apresente-se sempre com a mesma face (a translação é sincronizada com a rotação).

Em resumo: rotação da Terra é necessária para se explicar vários fenômenos, inclusive o fato de que uma maré alta não se dá na passagem da Lua pelo meridiano do local.





As Tábuas de Marés: previsões, análise harmônica

Os modelos que vimos nos permitiu vislumbrar i) como as marés são formadas, ii) sua distribuição ao longo do dia, iii) suas relações com as fases da Lua, iv) a importância do Sol no contexto das marés e v) o papel das marés na evolução orbital da Terra e da Lua.

Falta entender como são feitas as previsões das mesmas, uma vez que sabemos tudo sobre marés agora! E é aí que os problemas começam...





As Tábuas de Marés: previsões, análise harmônica

É possível fazer modelos matemáticos para prever a amplitude das marés. Mas é muito difícil, por alguns motivos:

- 1) O fundo dos oceanos é variável e complexo;
- 2) As costas são recortadas, com profundidades variáveis
- 3) Isto para citar apenas alguns problemas...

Como se procede, nestes casos?





As Tábuas de Marés: previsões, análise harmônica

Solução: decompor séries temporais históricas em harmônicos e, então, fazer previsões futuras a partir da solução. Tipicamente, 40 componentes são utilizadas para prever as marés (inclusive pela Marinha do Brasil).





O que falta?

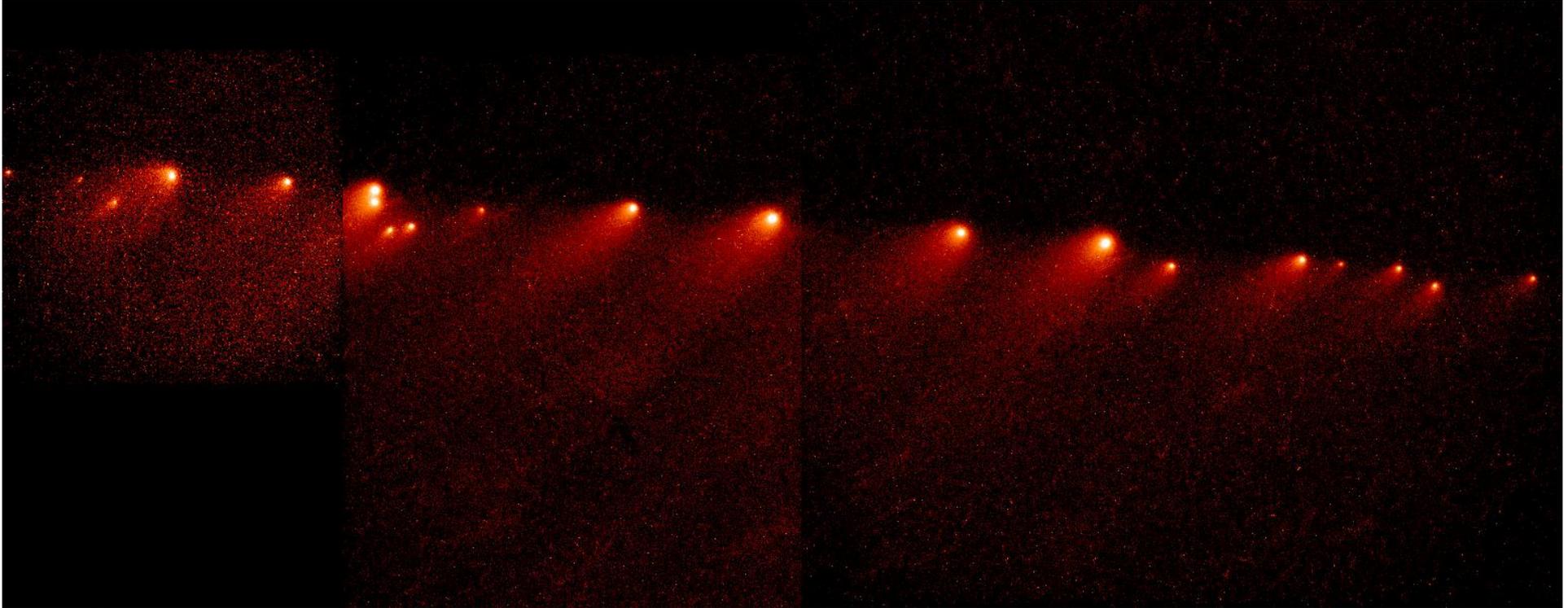
Influência da atmosfera (clima) sobre as marés: diferentemente das astronômicas, difícil de serem previstas porque dependem de fenômenos climáticos.

Outros corpos celestes:





O que falta?









- ◆ <http://astro.uesc.br/>
- ◆ Física na UESC: Bacharelado e Licenciatura
- ◆ Pós-Graduação: Mestrado em Física (Astrofísica e Física Nuclear)
- ◆ Próximo evento: semana de Física (equinócio da primavera, 22 de setembro).

