

UMA MODELIZAÇÃO DIDÁCTICA DAS MARÉS

A. ALBERTO SILVA

Escola Superior de Educação / I. P. Porto
Rua Dr. Roberto Frias — 4200 Porto

Referem-se dificuldades sobre o ensino e a aprendizagem das marés. Realça-se a relevância de fazer cooperar abordagens em termos de referenciais inerciais e não inerciais. Foca-se a primeira, por ser a que parece menos usualmente utilizada em estudos introdutórios. Propõe-se um modelo físico simplificado e uma sua implementação informatizada para simulação, discutindo-se as suas limitações e o seu interesse.

I. Introdução

Por que há marés? É uma pergunta que todos conhecemos bem, e que tenho tratado com alunos de um Curso de Professores do Ensino Básico (1.º e 2.º Ciclos), da Variante de Matemática e Ciências da Natureza.

Nunca consegui nas minhas aulas que (boas) explicações como as de Feynman et al (1966, p. 7-5), mesmo complementadas com cálculos como os de Warren (1979, Apêndice 4), se revelassem suficientes para uma efectiva compreensão por parte dos alunos. Mais concretamente, a explicação mais usual das marés — a que recorre a referenciais não inerciais e a forças centrífugas — revelou-se sempre insuficiente para uma boa compreensão por parte dos alunos e para saciar nestes a vontade de compreender “mesmo” o que se passava, i.e., de o compreender em termos apenas de interacções fundamentais. Quanto a tentativas de explicação como a de Bello et al (1977), revelaram-se desadequadas¹. Por outro lado, não me pareceu adequado, com os meus actuais alunos, enveredar por estudos mais formais e rigorosos, como os de Withers (1993). Finalmente, revelou-se também inadequada a analogia proposta por Bueche (1981, p. 519) e que consiste em considerar um balão de borracha em movimento de translação preso por um fio e em fazer corresponder a deformação do

balão a uma deformação de maré. Após longas discussões sobre esta analogia, o fiasco emergiu: alguns alunos diziam haver apenas uma maré, “devida à força centrípeta” (do fio); outros, defendiam também uma só maré, mas “devida à força centrífuga”²; outros ainda, pensavam que na Terra existem duas marés, *mas* com um deslocamento global em relação à fonte gravítica; outros ainda, que inicialmente defendiam uma maré, depois destas discussões já não entendiam maré alguma. E eu, queria que os alunos compreendessem que havia duas marés³, mas sem um deslocamento glo-

¹ Trata-se de omitir o movimento relativo do sistema Terra-Lua e em considerar que as marés terrestres de origem lunar se devem a que a Terra se aproxima da Lua, mas as suas regiões mais próximas da Lua aproximam-se mais do que o seu centro, e este mais do que sua as regiões mais afastadas. Ora, esta seria uma boa explicação se a Terra estivesse em rota rectilínea de colisão com a Lua. Haddad (1997) refere que a explicação anterior chegou a ser proposta pelo próprio Newton.

² Curiosamente, trata-se da ideia *oposta* à referida na Nota 1.

³ O aspecto chave, é que existem dois bojos de maré na Terra, diametralmente opostos, simultaneamente. Daqui decorre, sem dificuldades para os alunos, a sucessão de duas marés altas e duas marés baixas ao longo de um dia em cada ponto do planeta (devido ao seu movimento de rotação). Também não é difícil para os alunos compreender que o período das marés não é 24 horas: devido ao movimento da Lua em torno da Terra (cerca de 28 dias), é cerca de 24/28 h (cerca de 51 min) mais.

Didáctica

Marés

Interacções
Fundamentais

Centro de Massa

Leis de Newton

Folha de Cálculo

bal e sem utilizar as designações “centrípeta” e “centrífuga” (Smith, 1992; Silva, 1994).

Por tudo isto, senti que precisava de um modelo, antes de mais para mim próprio, enquanto professor, para me dar mais imaginação, segurança e eficácia nas discussões com os alunos. Mas como conseguir para as marés um modelo constituído por um corpo deformável orbitando uma fonte gravítica, que permitisse por simulação discernir os fenómenos relevantes, que servisse de complemento (não de substituição) à abordagem em termos de referenciais não inerciais e forças centrífugas, que não recorresse a tais referenciais e forças, e que não introduzisse ruídos inaceitáveis?

Na Parte II, de um modo qualitativo e introdutório, recorro aspectos físicos chave para a compreensão das marés e proponho um modelo físico simples. Na Parte III, apresento uma implementação informatizada deste modelo e algumas simulações.

II. Aspectos físicos – chave sobre marés

II.A. A Terra anda à volta da Lua

Cito Bueche (1981, p. 518), referindo-se à explicação das marés: «Basic to the explanation is the fact that the earth orbits the moon — no, that is not a typographical error, the moon orbits the earth but the earth also orbits the moon!». Sobre o mesmo assunto, cito Feynman et al (1966, pp. 7-4 - 7-5): «The moon does not just go around the earth, the earth and the moon both go around a central position, each falling toward this common position [...]». Assim — ver também Withers (1993) e Westphal (1951, p. 139) — o primeiro aspecto chave para a compreensão das marés consiste em que a Terra e a Lua giram em torno do CM (Centro de Massa) do sistema que constituem. As aprendizagens sobre marés por parte dos meus alunos redundaram em fracasso total sempre que este ponto não foi suficientemente explanado.

A equação central é $\vec{F}^{externas} = M_{sist} \vec{a}_{CM}$, onde: M_{sist} é a massa total do (sub)sistema considerado; $\vec{F}^{externas}$ é a soma de todas as forças *externas* actuando sobre ele; \vec{a}_{CM} é a aceleração do CM. Assim, e considerando o sistema Terra - Lua, o seu CM descreverá em torno do Sol, principal fonte gravítica *externa*, uma trajectória independente das forças *internas* (de interacção Terra-Lua). Assim, à medida que a Lua gira em torno daquele CM, a Terra terá que o fazer também: ambas giram em torno do Sol “zigzagueando” um pouco; e fazem-no de tal modo que o seu CM descreve em torno do Sol uma elipse sem “zigzagues” (à parte efeitos aqui não considerados).

O mesmo se passa no sistema Sol-Terra: ambos giram em torno do $CM_{Sol-Terra}$ ⁴.

II.B. Queda livre e condições iniciais

O segundo aspecto chave, consiste em que a Terra e a Lua estão em *queda livre* uma em relação à outra, e ambas em relação ao Sol. Em queda livre, isto é, em *interacção apenas gravítica*; mas sem colidirem, devido a *condições iniciais*. Queda livre *não* significa necessariamente rota de colisão.

II.C. O que é uma força?

O terceiro aspecto chave (Feynman et al, 1966, Cap. 9 e 12; Hood, 1992) consiste em que na 2.^a Lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$:

- O lado direito envolve relações cinemáticas. Na situação em estudo, por questões de simetria, podemos escrever $a = v^2 / r$.

- No lado esquerdo especificam-se as força(s) envolvidas(s). Na situação em estudo é $F = G M m / r^2$. Trata-se de *uma* contribuição de Newton (Lei da Gravitação).

- Escrever $G M m / r^2 = m v^2 / r$, ou $G M / r = v^2$, isto é, igualar os lados esquerdo e direito da equação, constitui *uma outra* contribuição de Newton (2.^a Lei).

Da equação $G M / r = v^2$ decorre que um corpo em queda livre orbita uma fonte gravítica com uma velocidade tanto maior quanto menor for a distância à fonte. Assim, os planetas interiores do sistema solar giram com velocidades maiores do que os exteriores, o que se aplica também a satélites artificiais que orbitam a Terra (Silva, 1995; Silva, 1997, Vol. II, pp. ε-16 a ε-18).

II.D. Não somos assim tão pequenos, nem tão firmes

O quarto aspecto chave, consiste em que a Terra não é uma partícula ideal, nem um corpo rígido: tem um raio que é *não* desprezável em comparação com as distâncias médias Terra-Sol e Terra-Lua; e tem um núcleo fundido, oceanos, crosta e atmosfera, todos eles deformáveis. Ilustre-se com o sistema Terra-Sol:

- Na parte da Terra *mais próxima* do Sol, exerce-se uma força atractiva *maior* do que a exercida na vizinhança do seu CM, e aquela parte tende a mover-se *mais depressa* e *mais perto* do Sol; na parte *mais afastada* exerce-se uma força atractiva *menor* do que a que é exercida na vizinhança do seu CM, e aquela parte tende a mover-se *mais lentamente* e *mais longe* do Sol.

- Pelo facto de a parte mais afastada da Terra tender a andar mais devagar e a outra mais depressa, os dois bojos não tendem a formar-se exactamente ao longo

⁴ Considerar os sistemas Terra-Lua e Terra-Sol separadamente é útil para fins analíticos. Mas as marés na Terra devidas ao Sol e à Lua existem simultaneamente e combinam-se, dando origem a *marés vivas*, na Lua Nova e na Lua Cheia; e *marés mortas*, nos Quartos Crescente e Minguante lunares. Este aspecto não apresenta grandes dificuldades para os alunos.

da linha que une o CM da Terra ao do Sol, e sobre a Terra exerce-se binário que se opõe à sua rotação.

• Pelo facto de uma parte da Terra tender a afastar-se e outra a aproximar-se do Sol, a Terra está em tensão tractiva e tende a distender-se (aproximadamente) ao longo da linha que une o seu CM ao do Sol⁵, formando-se dois bojos de maré.

O que determina a intensidade das *forças de maré* num planeta, é a relação entre o seu raio e a sua distância em relação à fonte gravítica em estudo. É por isso que as forças de maré na Terra devidas à Lua são maiores (mais que o dobro: Warren, 1979; Strahler, 1986) do que as devidas ao Sol, apesar da força gravítica deste sobre a Terra ser muitíssimo maior do que a da Lua. Mas a *amplitude das marés* depende ainda das características físicas (como a fase, a viscosidade e a elasticidade) do meio. É por isso que na Terra as marés oceânicas têm uma amplitude maior (cerca de 6 vezes, em média:

de aspectos fundamentais. Trata-se de um corpo a duas dimensões, circular quando não deformado, deformável, constituído por massas concentradas e interligadas. As interligações — elásticas e com atrito — são modelizadas por molas que ligam as diversas massas concentradas entre si, quer ao longo da circunferência exterior, quer ao longo da direcção radial. Ao longo desta direcção, deve subentender-se que existem camadas de massas concentradas semelhantes à camada exterior (portanto, também ligadas entre si, quer ao longo de uma circunferência, quer radialmente). Para efeitos de visualização, usa-se o esquema simplificado apresentado na Figura 1 b). Na Figura 1 a), apresenta-se um corpo rígido de referência.

Usar-se-ão unidades arbitrárias para as grandezas em jogo, para evitar valores "astronómicos" difíceis de manipular (e que conduziriam a erros de arredondamento demasiado grandes, com a ferramenta informática utilizada).

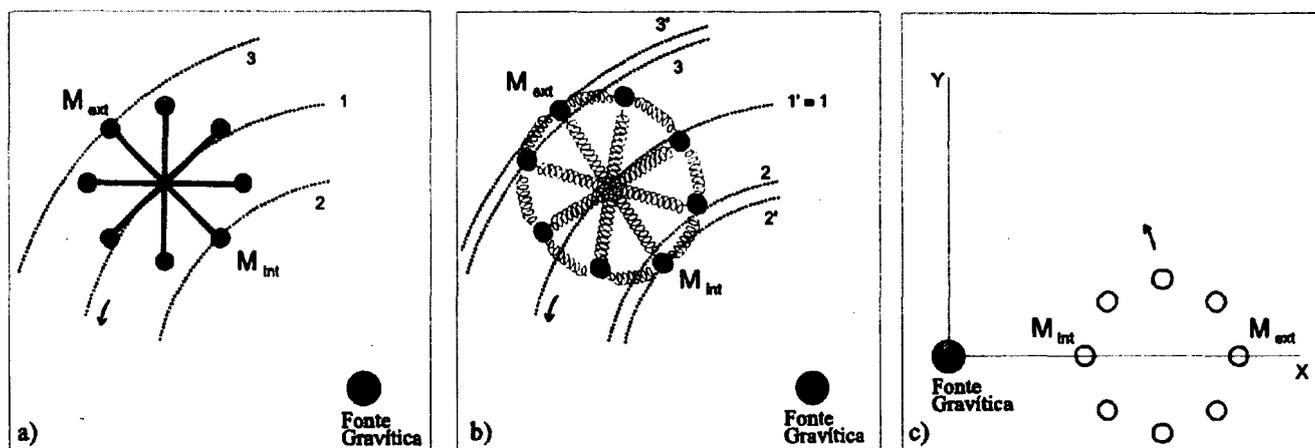


Fig. 1.a): corpo rígido de referência; b): modelo físico, constituído por pequenas massas ligadas por osciladores amortecidos; c): posição inicial.

Warren, 1979) do que as continentais (em Paris, a maré continental tem uma amplitude de cerca de 40 cm: Guillemot, 1993). A Terra podia mesmo explodir por efeito de maré se as suas forças internas de coesão fossem menos intensas⁶. Estas forças internas, de origem gravítica e electromagnética, mantêm a sua coesão. As forças electromagnéticas são também responsáveis por forças de atrito (Gass et al, 1984) que se opõem a movimentações relativas de massas da Terra (dos oceanos sobre os fundos e ao longo das irregularidades das costas, por exemplo), originando transformações de energia cinética macroscópica em energia de vibração térmica.

II.E. O modelo físico

O modelo físico do corpo que se usa a seguir para modelização e simulação informatizadas é extremamente simplificado, e apenas adequado para explicações intro-

III. Modelização e simulação informatizada

III.A. Modelização

O modelo físico foi formalizado matematicamente numa Folha de Cálculo:⁷ ver Figura 2. São necessárias cerca de 50 colunas e 500 linhas, mas basta digitar as

⁵ Direcção apenas aproximada: pelo que é dito no item anterior; e também porque, tratando-se de mover grandes massas, existe um atraso inercial das respostas às forças de maré (os valores máximos das elongações num local ocorrem depois de nesse local a força de maré ter passado por um máximo).

⁶ Como aconteceu ao cometa Shoemaker-Levy 9: em 1992, passando a 43 000 km de Júpiter, foi partido em 20 bocados pelo efeito de maré daquele planeta, onde viria a despenhar-se em 1994. Também em galáxias existem deformações por efeito de maré (Dardel, 1993; Brunier, 1997).

⁷ Terei muito gosto em enviar o ficheiro a quem o solicitar. Utilizei o Microsoft Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	U	V	W	X	Y	Z
1	Δt	0.0001																			
2		GM			2																
3			kapa		0.00E+00	Const	0	beta	0												
4			x0c		ax0c	yo0c	vy0c	ay0c													
5			0.050		-800.000	0.000	6.325	0.000													
7			xc		axc	yc	vyc	ayc													
8			0.050		-800.000	0.000	6.325	0.000													
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					

Fig. 2 — Modelo em Folha de Cálculo. Por questões de espaço não se afixam algumas colunas das componentes v e de M_{int} , nem as de M_{ext} (semelhantes às de M_{int}).

linhas (1, 2, 4 e 5) com as designações dos parâmetros e para introdução dos valores destes; a linha (7) com títulos de colunas; e as linhas (8, 9, 10 e 11) com as fórmulas de integração numérica das equações de movimento. Depois, as duas últimas linhas (10 e 11) são copiadas para baixo (operação trivial em Folhas de Cálculo). As fórmulas principais estão afixadas em etiquetas auxiliares.

A integração das Leis de Newton é efectuada numericamente, utilizando o método de Euler com meios-passos (Feynman et al, 1966, Cap. 9; Misner & Cooney, 1991, Cap. 4). Sendo Δt passo de integração temos, para as componentes x (para y é semelhante):

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t + \Delta t / 2) \Delta t$$

$$v_x(t + \Delta t / 2) = v_x(t - \Delta t / 2) + a_x(t) \Delta t;$$

$$v_x(\Delta t / 2) = v_x(0) + a_x(0) \Delta t / 2.$$

Os valores de $a(t)$ são calculados localmente a partir de $\vec{a} = \vec{F} / m$. Se existir só a força gravítica, é: $F = G M m / r^2$; $F_x = -G M m x / r^3$; $a_x = -G M x / r^3$. Adiante, considerar-se-ão forças elásticas e de atrito.

Para simplificar a modelização e facilitar as representações gráficas, considera-se uma fonte de gravidade com uma massa altamente concentrada e muito maior que a do corpo em estudo, o que permite considerar o CM do sistema coincidente com o CM da fonte e com a origem de um referencial XY de inércia⁸. Portanto, a modelização e a simulação particulares que aqui se apresentam têm um objectivo limitado, mas apontado ao cerne da compreensão das marés: compreender porque é que, quando uma massa não pontual orbita uma fonte gravítica, há marés nessa massa não pontual (e isto, sem falar em forças centrífugas). Para este objectivo específico, não é relevante que a fonte seja ou não pontual, ou que tenha uma massa pequena ou grande, ou que esteja muito longe ou muito perto. O que é relevante, e crucial, é atentar em que a massa na qual se querem estudar as marés é não pontual e orbita um ponto que não está no seu próprio CM.

III.C. Simulação

Consideremos os corpos representados nas Figuras 1 a) e b). Eles serão lançados de um ponto com $x > 0, y = 0$ do referencial XY, como se pode ver na Figura 1 c) e também nas Figuras 3, 4 e 5. Ambos são lançados com uma velocidade de rotação tal que terão sempre a mesma face voltada para a fonte de gravidade⁹,

⁸ Terei muito gosto em enviar, a quem o solicitar, um ficheiro de Excel sobre o movimento do CM de um sistema de dois corpos.

⁹ Note-se que o facto de se lançarem os corpos com uma certa velocidade de rotação não significa que eles estejam sujeitos a qualquer força exterior para além da gravítica. Trata-se apenas de uma condição inicial. Uma vez lançados os corpos, cada uma das suas partes fica submetida apenas a uma força externa (gravítica) e a forças de interacção (elástica e de atrito) internas.

para podermos centrar a atenção nos movimentos de duas massas concentradas específicas: M_{int} e M_{ext} . Apenas os movimentos destas são tratados numericamente e graficamente na folha de cálculo.

Consideraremos que cada parte do corpo ficará submetida à força gravítica e ainda a uma força do tipo $\vec{F} = -k\alpha (\Delta\vec{r}_{rel}) - \beta (\vec{v}_{rel}) - Const \vec{v}_{rel} / |\vec{v}_{rel}|$ com três contribuições: uma elástica, proporcional ao deslocamento relativo (deslocamento em relação à posição inicial, i.e., antes da deformação); uma de atrito, proporcional e oposta à velocidade associada a tal deslocamento ($\vec{v}_{rel} = d\vec{r}_{rel} / dt$); outra de atrito, oposta àquela velocidade e de grandeza constante.

Os corpos são lançados com uma velocidade tal que os seus CM seguirão a trajectória circular representada pela linha 1¹⁰. Esta velocidade, v_c , está assim relacionada com a distância, r_c , entre aqueles CM e a fonte de gravidade: $GM / r_c = v_c^2$. Note-se que as partes M_{int} e M_{ext} não foram lançadas com velocidades iniciais correspondentes às linhas 2 e 3, pelo que estas serão trajectórias de M_{int} e M_{ext} apenas no caso do corpo rígido.

Nas Figuras 3, 4 e 5, as trajectórias correspondentes ao corpo rígido são designadas por: 1, para o CM; 2 para M_{int} ; e 3 para M_{ext} . As trajectórias correspondentes para o corpo elástico são respectivamente designadas por 1', 2' e 3'.

Na Figura 3, o valor de $k\alpha$ é suficientemente grande para que o corpo possa ser considerado rígido. Como seria de esperar, não se podem distinguir as trajectórias 2 e 3 de 2' e 3', respectivamente (o corpo comporta-se como rígido).

Δt	GM	2		
0.0001	$k\alpha$	1.00E+07	Const	0
			beta	0

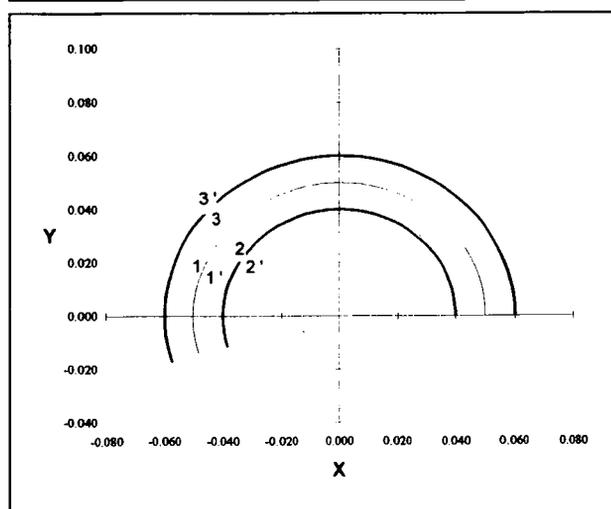


Fig. 3 — Um caso em que o parâmetro $k\alpha$ tem um valor suficientemente grande para que o corpo se comporte como rígido.

Mais interessantes são os casos em que o corpo é deformável e tem por isso um comportamento diferente do do corpo rígido. Refiro algumas ilustrações:

- Na Figura 4, os valores de $k\alpha$, Const e β têm valores intermédios entre o caso anterior e o seguinte: o corpo não é rígido, mas as suas partes estão em interacção. Como se vê na Figura, M_{int} e M_{ext} seguirão trajectórias 2' e 3', distintas de 2 e 3. As forças de coesão opõem-se à deformação, mas esta existe (por efeito de maré).

Δt	GM	2		
0.0001	$k\alpha$	1.00E+05	Const	80
			beta	800

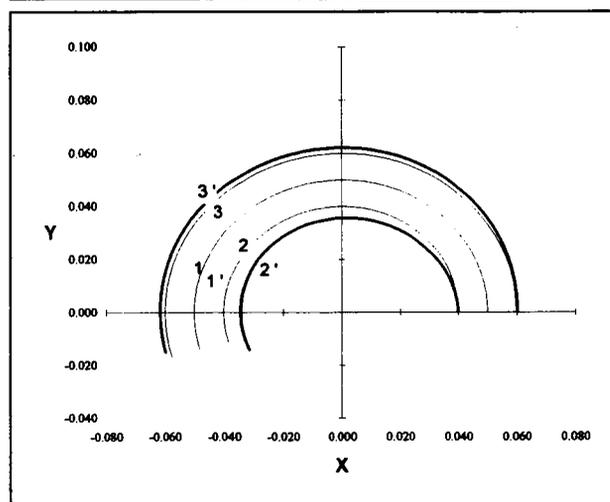


Fig. 4 — Caso intermédio, representativo do marés como as da Terra. Note-se que 2' se aproxima da fonte e avança em relação a 2, enquanto que 3' se afasta da fonte e se atrasa em relação a 3.

- Na Figura 5, apresenta-se o caso extremo em que são iguais a zero os valores de $k\alpha$, Const e β (consideradas desprezáveis as interacções entre as partes do corpo em estudo). Como seria de esperar, M_{int} e M_{ext} seguem trajectórias independentes.

- Uma breve referência a casos que, por razões de espaço, não elaboro neste artigo: o caso trivial de velocidade inicial nula (caso em que o corpo seguiria uma rota rectilínea de colisão com a fonte de gravidade); casos interessantes e espectaculares que se podem simular alterando as posições e as velocidades iniciais e os valores dos coeficientes de elasticidade e de atrito (e.g., casos de oscilações amortecidas).

¹⁰ Tal como referido na Nota 9, também aqui se trata apenas de especificar uma condição inicial.

Δt	GM	2		
0.0001	κ	0.00E+00	Const	0 beta 0

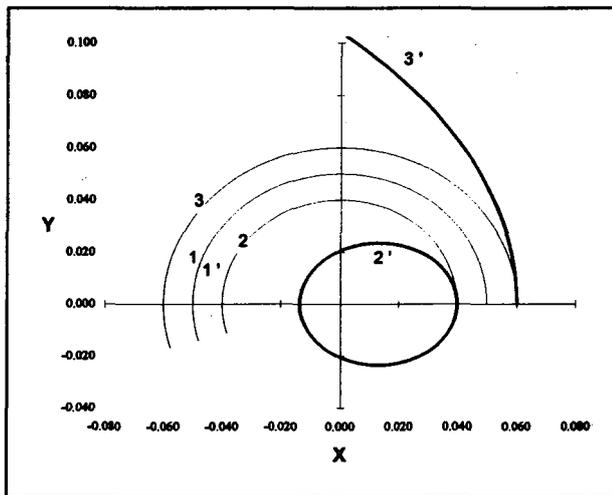


Fig. 5 — Caso em que o corpo elástico explode, seguindo M_{int} e M_{ext} trajectórias independentes.

Atentemos de novo na Figura 4. Existem dois tipos de diferença em relação ao que aconteceria se o corpo fosse rígido. Em M_{int} , tais diferenças manifestam-se em que ela tende a adiantar-se e a ter um raio orbital menor. Quanto a M_{ext} , ela tende a atrasar-se e a ter um raio orbital maior. As variações nos raios são responsáveis por dois bojos de maré opostos; e o avanço e o atraso estão associados a um binário que se opõe à rotação imposta inicialmente. Se o nosso corpo modelizasse a Terra, tal momento opor-se-ia ao seu movimento diário de rotação (24 horas, actualmente). Assim, apesar das suas simplificações, o modelo permite visualizar uma razão para o aumento da duração do dia terrestre (21,9 h há 370 milhões de anos: Gass et al, 1984)¹¹.

IV. Discussão

Impõem-se algumas considerações adicionais sobre a aceitabilidade do modelo utilizado. Nos casos extremos das Figuras 3 e 5 não se colocam problemas especiais, pois num caso não há deformação, e no outro as partes são independentes. Mas no caso intermédio da Figura 4 — o mais interessante — há que ter em atenção as extremas simplificações do modelo:

- O modelo não permite contemplar as grandes movimentações de massas características de marés reais

(como as dos oceanos terrestres, por exemplo, que envolvem deslocamentos da ordem de grandeza das dimensões do planeta). A consideração destes fenómenos de transporte obrigaria a entrar com aspectos físicos e matemáticos que estão para além dos objectivos deste trabalho. Se não se tiver presente esta limitação, poderemos ser induzidos a pensar, por exemplo, em forças elásticas proporcionais a um deslocamento em relação a um ponto que “já foi esquecido na história da deformação do corpo”. Seria como considerar que uma força elástica no interior de uma rocha é proporcional a um deslocamento em relação a um ponto do qual a rocha já se afastou por movimentações de placas tectónicas. Tal inválida assunção corresponderia mesmo a “inventar” interacções externas ao sistema. O mesmo se passa com a força de atrito proporcional à velocidade: esta tem que ser relativa a massas com as quais há contacto macroscópico, não relativa a massas longínquas. Naturalmente, no que respeita aos problemas aqui em discussão, o modelo tende para ser mais aceitável à medida que o número de massas concentradas tende para infinito.

- Mas, mesmo antes de o modelo ser invalidado pelas razões acabadas de referir, ele já estaria invalidado, porque considerar uma “força elástica proporcional ao deslocamento” só é aceitável para deformações relativamente pequenas.

- Assim, o modelo apresentado:

- Não contempla deformações plásticas nem fenómenos de difusão ou transporte.
- Só é válido para deformações pequenas, i.e., dentro dos limites (idealizados) em que é razoável considerar que as únicas forças internas são a elástica e as de atrito.
- É um modelo de massas concentradas, e explicita apenas o movimento de duas massas (ambas junto da superfície).
- Tem como objectivo ajudar a compreender que um corpo elasticamente deformável, quando orbita uma fonte gravítica, fica com dois bojos de maré.

¹¹ O dia na Terra tende a ser igual ao ano. Algo semelhante já aconteceu na Lua, no que respeita à sua interacção com a Terra: aquela gira em torno de si própria durante o mesmo tempo em que gira em torno do nosso planeta. É por isso que da Terra vemos sempre a mesma face da Lua.

O modelo físico permitiu uma visualização de apoio à intuição, revelou-se útil para acompanhar a interpretação dos dois bojos de maré e a influência desta no movimento de rotação. Também facilitou a compreensão de que não há apenas marés oceânicas. A implementação informatizada revelou-se pouco adequada para utilização em aula com (todos) os alunos que tenho actualmente, devido à sua formação prévia (não tiveram Física no 12.º ano) e ao objectivo do seu Curso (ensino nos 1.º e 2.º Ciclos). No entanto, ela tem-se revelado adequada como instrumento de reserva a utilizar com os alunos mais interessados em aspectos matemáticos e informáticos. Tendo utilizado abordagens diversificadas ao longo de vários anos, foi depois de melhor ter arrumado as minhas próprias ideias, com base na modelização aqui apresentada, que consegui melhores resultados com os alunos. Desde então, tenho sempre discutido com os alunos todos os aspectos físicos tratados na Parte II, e isto independentemente de com os alunos usar ou não a modelização informatizada.

A modelização física requer apenas conhecimentos básicos. A sua implementação informatizada não requer conhecimentos sobre integração analítica de equações diferenciais, nem competências especiais na utilização de uma Folha de Cálculo. Assim, conjeturo que em disciplinas introdutórias de Cursos como os de Física, Engenharia, Astronomia e outros, poderá ser adequada a utilização da modelização informática, e mesmo o seu desenvolvimento orientado por parte de alunos (que poderão mesmo criar e implementar melhorias em relação ao aqui exposto, inclusive no modelo físico).

Relatarei sobre a conjectura anterior, com base na minha própria experiência, noutra oportunidade. Entretanto, fico na expectativa de que outros professores e alunos se interessem por estas ideias. Elas pareceram-me suficientemente interessantes para serem desde já partilhadas, antes de mais com alunos e professores dos Ensinos Secundário terminal e Superior introdutório. Mas, naturalmente, elas são susceptíveis de serem melhoradas e aprofundadas, nomeadamente a nível físico e didáctico e quanto a modalidades e ferramentas de modelização e simulação¹².

Agradeço ao meu amigo Nuno Brandão, Professor de Matemática no Ensino Secundário e Astrónomo Amador, a sua disponibilidade para conversar sobre estes assuntos e as suas úteis sugestões.

¹² Aproveito para agradecer ao "referee" da Gazeta de Física as suas pacientes e construtivas revisões, que conduziram ao esclarecimento de vários aspectos chave e a importantes melhorias do texto inicial. Este enriquecedor processo indicia que as ideias aqui em explanação estão abertas a futuros melhoramentos.

Referências bibliográficas

- BELLO, A., PORTELA, C., CALDEIRA, H., 1997. *Ritmos e Mudanças — Física 12.º ano*, Porto Editora, Porto, Portugal, p. 270.
- BRUNIER, S., 1997. Collision galactique à 60 millions d'années-lumière, *Ciel et Espace*, N.º 331, pp. 42-44.
- BUECHE, F. J., 1981. *Understanding the world of physics*, McGraw-Hill Book Company, New York, EUA.
- DARDEL, F., 1993. Marées Galactiques, *Science et Vie Micro*, N.º 105, pp. 194-198.
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M., 1966. *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, EUA, Vol I.
- GASS, I. G., SMITH, J. P., WILSON, R. C. L., 1984. *Vamos compreender a Terra*, Livraria Almedina, Coimbra, Portugal.
- GUILLEMOT, H., 1993. Les Physiciens surpris par les marées, *Science et Vie*, N.º 907, pp. 36-42.
- HADDAD, L., 1997. Des hauts et des bas, *Ciel et Espace*, N.º 330, pp. 82-83.
- HOOD, C. G., 1992. Teaching Newton's second law — another viewpoint, *The Physics Teacher*, 30 (6), pp. 358-359.
- MISNER, C., COONEY P., 1991. *Spreadsheet Physics*, Addison Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, EUA.
- SILVA, A. A., 1994. Overcome Inertia: Go to an amusement park!, *Physics Education*, 29, pp. 295-300.
- SILVA, A. A., 1995. Tides and real forces, *School Science Review*, 77 (279), pp. 99-102.
- SILVA, A. A., 1997. *Uma Modelização Didáctica Social-Construtivista e Ecológica*, Universidade de Aveiro, Portugal (Tese de Doutoramento).
- SMITH, P. A., 1992. Let's get rid of "Centripetal Force", *The Physics Teacher*, 30 (5), pp. 316-317.
- STRAHLER, A. N., 1986. *Geografia Física*, Ediciones Omega, S. A., Barcelona, Espanha.
- WARREN, J. W., 1979. *Understanding force*, John Murray, Londres, Reino Unido.
- WESTPHAL, W. H., 1951. *Tratado de Física*, Editorial Labor, Portugal.
- WITHERS, M. M., 1993. Why do tides exist?, *The Physics Teacher*, 31 (7), pp. 394-398.

António Alberto Silva é Licenciado em Engenharia Electrotécnica (U. Porto), Mestre em Física (U. Porto) e Doutor em Didáctica (U. Aveiro). Foi Assistente na Faculdade de Engenharia (U. Porto) e é Professor Adjunto na Escola Superior de Educação (I. P. Porto). Lecionou Física, Electrotecnia e Informática Educativa, na formação inicial de Engenheiros e na formação inicial, contínua e especializada de Professores. O seu principal interesse actual é a Didáctica da Física, com ênfase na evolução conceptual e na investigação interpretativa em ambiente natural de sala de aula.