

## Perturbações Gravitacionais e a Atividade Tectônica em Europa

Luiz Gabriel S. de Oliveira e Flavio Sandro L. Cassino – DEFIS/ICEB/UFOP  
 Natália Valadares de Oliveira – DEGEO/EM/UFOP

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

Orbital resonance combined with gravity tides generated by Jupiter have a strong effect on the Europa's thermal evolution and tectonic features observed at the surface of this satellite. With the energy supplied by dissipation of gravity perturbations, a process of convection was instaled on a possible subsurface ocean. This mechanism is responsible for the vast network of ridges in the Europa's surface, and can be explained for the rheological properties of ice.

### Introdução

O sistema orbital formado por Júpiter e suas luas Io, Europa e Ganimede, em especial, caracterizam um belo exemplo de dinâmica orbital complexa, onde as interações gravitacionais resultantes entre as três luas têm influência direta na evolução geológica das mesmas.

Perturbações gravitacionais mútuas entre Io e Europa e Europa e Ganimede transferem energia e momento angular entre as três luas, além de contribuir para o fenômeno de ressonância que suas órbitas apresentam. Em particular, a evolução termal dos satélites jovianos é amplamente influenciada por este fenômeno. Em Io, o intenso vulcanismo e alto fluxo térmico ( $\sim 2\text{Wm}^{-2}$ ) são provavelmente causados pela dissipação das forças de maré gravimétricas associadas à ressonância orbital (Peale et al., 1979, Veeder et al., 1994). Em Europa, o tectonismo presente pode ter sua origem vinculada a atuação dessas mesmas forças. Já o fenômeno de renovação da superfície (*resurfacing*) de Ganimede também pode ser elucidado através do estudo da ação das forças de perturbação gravitacionais (Showman e Malhotra 1997).

Com base nessa breve discussão, o objetivo deste trabalho é apresentar um modelo teórico simples para explicar a atividade tectônica presente em Europa, que é marcada pela presença de uma ampla estruturação em sua superfície, e que pode ter como força-motriz um mecanismo de convecção gerado pela dissipação de energia proveniente de marés gravimétricas.

### Europa: Características Principais

Europa é um pouco menor (raio aproximado = 1565km) e menos densa que a Lua, sendo sua superfície muito brilhante e com propriedades espectrais próximas do gelo puro (de Pater e Lissauer 2004).

Anderson et al. (1998), com base em dados de rastreamento Doppler da sonda Galileo, formularam um possível modelo de estruturação interna (Figura 1), composto por um núcleo metálico (Fe ou Fe-FeS) cercado por um manto rochoso (silicatos) e uma cobertura de gelo+água.

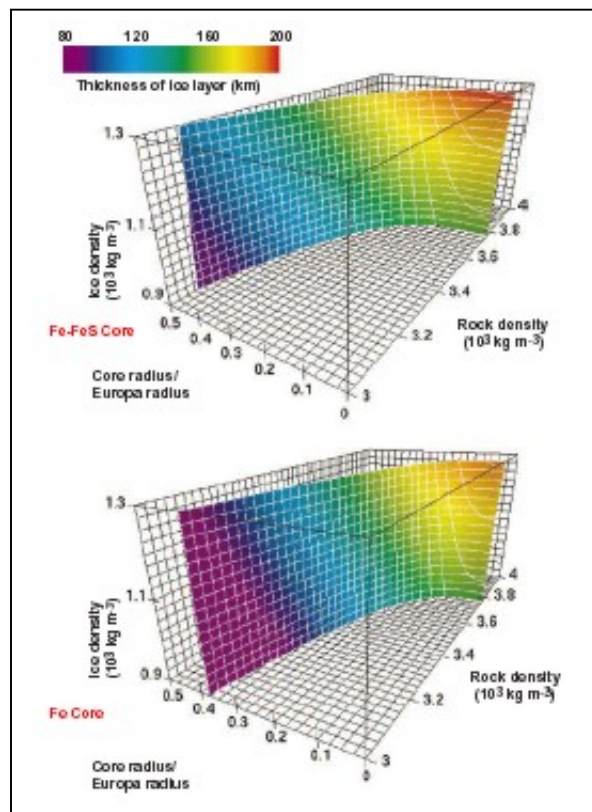


Figura 1 – Possíveis modelos de três camadas de Europa, baseado em dados de rastreamento da sonda Galileo, onde é trabalhada a hipótese de um núcleo constituído de Fe-FeS (modelo superior) e um núcleo de Fe puro (modelo inferior). Extraído de Anderson et al. (1998). A espessura da cobertura de gelo+água e o raio do núcleo são levados em consideração.

A combinação de dados espectrais e informações sobre a distribuição interna de densidades sugere que a camada de gelo+água possui uma espessura de aproximadamente 100km (de Pater e Lissauer 2004). Imagens colhidas pela sonda Galileo mostram que a superfície de Europa não apresenta grandes desníveis topográficos, com poucas crateras de impacto.

Essas imagens também permitiram a visualização de um complexo sistema de fraturas, sulcos e falhas em sua superfície (Figura 2). Este fato sugere que Europa tenha

passado por uma intensa atividade tectônica no decorrer de sua evolução geológica.

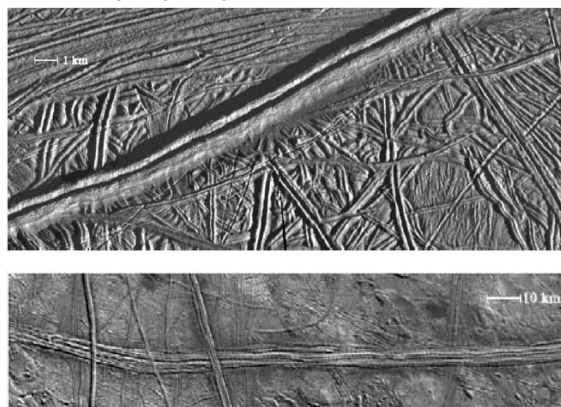


Figura 2 – Morfologia da superfície de Europa, marcada pela presença de intensos lineamentos e sulcos proeminentes (imagem superior) e de estruturas intralçadas (imagem inferior). Extraído de Greenberg et al. (1998).

### Dissipação da Energia de Maré Gravimétrica

Segundo Showman e Malhotra (1997), a energia dissipada pelas perturbações gravitacionais depende da relação entre a excentricidade da órbita do satélite e da relação entre os fatores de dissipação de energia de Europa ( $Q'_2$ ) e de Júpiter ( $Q'_J$ ). Portanto, para um satélite homogêneo e sincronizado em sua rotação, a energia dissipada pelas marés gravimétricas ( $E_d$ ) é dada por

$$E_d = \frac{21}{2} \frac{k}{Q} \frac{R^5 GM_p^2 n e^2}{a^6} \quad (1)$$

onde  $R$  é o raio do satélite,  $a$  é o semi-eixo maior, e a excentricidade,  $n$  o movimento médio,  $M_p$  a massa primária (Júpiter),  $Q$  a função efetiva de dissipação de energia de maré do satélite e  $k$  o número Love ( $2^\circ$  grau) do satélite.

Portanto, a energia proveniente das perturbações gravitacionais que afetam Europa (ressonância orbital + marés gravitacionais provenientes de Júpiter) deve ser capaz de fornecer calor suficiente para promover a instalação de células convectivas na parte líquida de sua camada mais externa.

Com o processo de convecção instalado, é necessário o entendimento das propriedades reológicas do gelo nas condições encontradas em Europa, para que um modelo tectônico seja capaz de explicar a presença das feições observadas na sua superfície.

### Modelo Tectônico Baseado nas Propriedades Reológicas do Gelo

Uma vez que o processo de convecção é ocorrente, a crosta constituída por gelo deve reagir segundo a ação de esforços atuantes em sua base.

Durhan e Stern (2001), com base em ensaios laboratoriais e modelos teóricos, investigaram o

comportamento reológico do gelo em condições variadas de pressão e temperatura, no intuito de verificar a resposta do material à solitação de um campo de tensões, nas condições encontradas em algumas luas geladas de Júpiter (incluindo Europa).

Com base em diagramas (Figura 3), a resposta do gelo em relação à taxa de deformação pode ser dividida em dois comportamentos distintos: escorregamento basal (*basal slip*), *creep* sensível ao tamanho do grão (GBS ou *GSS creep*) e o deslocamento por *creep* (*dislocation creep*).

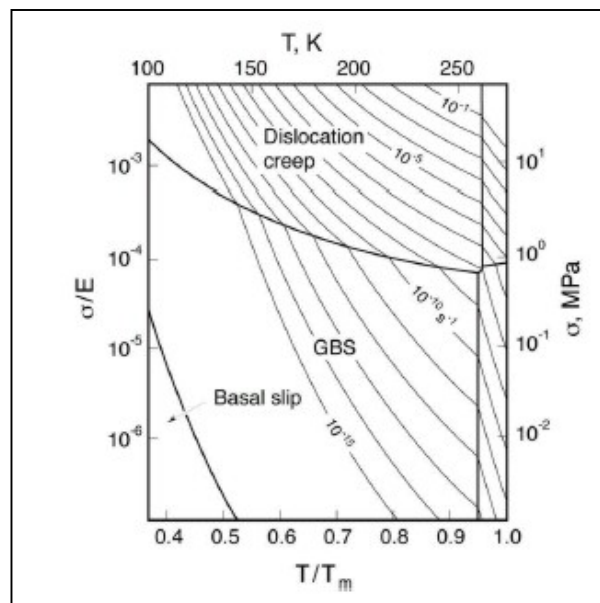


Figura 3 – mapa de deformação para o gelo policristalino, em função da temperatura ( $T$ ) e da tensão diferencial ( $\sigma$ ). Coordenadas normalizadas pela temperatura de fusão ( $T_m$ ) e pelo módulo de Young ( $E$ ). Extraído de Durham e Stern (2001)

Com base nos dados apresentados, é possível formular uma hipótese para o comportamento do gelo na crosta gelada de Europa (Figura 4).

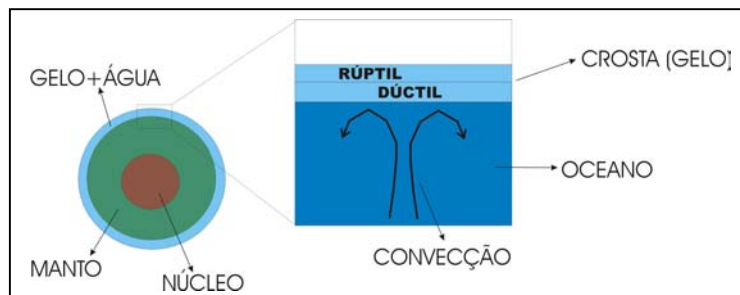


Figura 4 – modelo de estruturação da crosta em Europa, baseado no comportamento reológico do gelo em resposta ao processo convectivo gerado pela dissipação de energia das marés gravimétricas.

Neste modelo, partes superiores da crosta reagiriam rúptilmente ao padrão de esforços implantado em decorrência da deformação dúctil da porção inferior da crosta, onde a atuação do mecanismo de *creep* poderia explicar tal comportamento. Com a tendência ao fluxo da

parte inferior, a parte superior da crosta apresentaria, como consequência, a formação de estruturas em sua superfície, típicas de processos distensivos, como lineamentos, sulcos e vales.

### **Discussão e Conclusões**

Neste trabalho foi apresentado um modelo tectônico simples para Europa, baseado na dissipação de energia de marés gravimétricas provenientes de ressonâncias orbitais combinadas com a ação do campo gravitacional de Júpiter.

A dissipação de energia seria responsável pelo fornecimento de calor no interior de Europa, promovendo o aquecimento e subsequente convecção do oceano existente abaixo da crosta de gelo.

Uma vez que o gelo, dependendo das condições de temperatura e pressão, pode se comportar tanto ruptilmente como ductilmente, as feições observadas na superfície de Europa podem ser explicadas perfeitamente pela resposta rúptil da porção superior da crosta mediante a esforços gerados pelo comportamento dúctil da porção inferior, que foi diretamente afetada pela pluma convectiva.

### **Referências**

**Anderson, J. D., Schubert, G., Jacobson, R. A., Lau, E. L., Moore, W. B. e Sjogren, W. L.,** 1998, Europa's differentiated internal structure: inferences from four Galileo encounters: *Science*, Vol. 281, p2019-2022.

**Durham, W. B. e Stern, L. A.,** 2001, Rheological properties of water ice – applications to satellites of the outer planets: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 29, p295-330.

**Greenberg, R. et al.,** 1998, Tectonic process on Europa: tidal stress, mechanical response, and visible features: *Icarus*, Vol. 135, p64-78.

**de Pater, I e Lissauer, J. J.,** 2004, *Planetary Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

**Peale, S. J., Cassen, P. e Reynolds, R. T.,** 1979, Melting of Io by tidal dissipation: *Science*, Vol. 203, p894-894.

**Showman, A. P. e Malhotra, R.,** 1997, Tidal evolution into the Laplace resonance and the resurfacing of Ganymede: *Icarus*, Vol. 127, p93-111.

**Veeder, J. G., Matson, D. L., Johnson, T. V., Blaney, D. L. e Goguen, J. D.,** 1994, Io's heat flow from infrared radiometry: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, p17095-17162.