

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Centro de Ciências Matemáticas e da Terra**  
**Observatório do Valongo**  
**Departamento de Astronomia**

Título do Trabalho

Aluno: Leonardo Sattler Cassará (OV/UFRJ)

Orientador: Wladimir Lyra (JPL/Caltech)

**Projeto de Conclusão de Curso para a obtenção do título de Astrônomo**  
**Rio de Janeiro, Brasil**

Leonardo Sattler Cassará

## TÍTULO DO TRABALHO

Monografia apresentada ao Curso de Astronomia da UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de BACHAREL em Astronomia.

Orientador: Wladimir Lyra

Rio de Janeiro

2014

# Resumo

As missões *Voyager* e *Galileo* forneceram imagens e dados que revelaram uma superfície jovem e ativa em Europa, com diversas formações geológicas como domos, depressões e tectônica de placas. O aquecimento por marés devido à sua interação com Júpiter tem um papel importante neste cenário, e diversos estudos sugerem a existência de um oceano líquido subsuperficial como explicação para as formações geológicas observadas. Os modelos propostos se baseiam na presença de uma casca de gelo flutuante, onde derretimento parcial ocorre a partir de uma energia de ativação proveniente da dissipação das marés. Material quente boiaria até formar várias das estruturas observadas na superfície de Europa. Entretanto, este processo convectivo não é muito entendido, necessitando mais investigação. Apresentamos aqui um modelo numérico 2D para ilustrar a possibilidade de convecção no interior de Europa, testando diferentes cenários de profundidade da casca de gelo (de 15 km a 20 km). Com uma temperatura de fundo  $T_{\text{fundo}} = 270\text{ K}$  e uma temperatura de superfície  $T_{\text{sup}} = 100\text{ K}$ , sob reologia Newtoniana, nós reproduzimos um modelo térmico convectivo que é consistente com a presença de um oceano líquido sob a superfície de Europa, e com as estruturas nela encontradas (como altura e extensão dos domos e depressões).

**Palavras chave:** Europa, Aquecimento por marés, oceano, convecção, reologia.

# Abstract

The *Voyager* and *Galileo* missions provided images and data that revealed an active and young surface in Europa, with several geological formations such as domes, pits and evidence for plate tectonics. Tidal heating due to interaction with Jupiter plays an important role in this scenario, and several studies suggest the existence of a liquid subsurface ocean to explain the observed features. Proposed models rely on the presence of a floating ice shell, where partial melting takes place with activation energy aided by tidal dissipation. Buoyant warm material would reach the surface to form many of the observed features on Europa's surface. However the process that drives this convection is only marginally understood, warranting further investigation. Here we present a 2D numerical model to illustrate the possibility of convection in Europa's interior, testing two different scenarios with ice shell depth of 15 km and 20 km. With a bottom temperature  $T_{\text{bott}} = 270 \text{ K}$ , a surface temperature  $T_{\text{surf}} = 100 \text{ K}$  and under Newtonian rheology, we reproduce a convective thermal model that is consistent with the presence of a subsurface liquid ocean, and with the terrain's morphology (such as height and extension of pits and ridges).

**Keywords:** Europa, Tidal heating, ocean, convection, rheology.

# Agradecimentos

A escrever...

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>A criar</b>	<b>9</b>
2.1	Subseção . . . . .	9
<b>3</b>	<b>A criar</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>A criar</b>	<b>11</b>
<b>A</b>	<b>A criar</b>	<b>12</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>13</b>

# Lista de Figuras

1.1	Legenda figura. . . . .	8
4.1	Legenda figura. . . . .	11

# Lista de Tabelas

3.1 Legenda tabela. . . . . 10



# Capítulo 1

## Introdução

Ocorrências geológicas na superfície de Europa são consequência de um oceano líquido interno. Algumas dessas ocorrências são (Pappalardo et al. 1999): crateras, lenticulae, criovulcões, bandas de separação, regiões caóticas e cristas. Esses eventos foram observados pelos satélites *Voyager* e *Galileo*, e desde então vários processos termais foram propostos para explicá-los, baseados em suas medidas, pela órbita de Europa e por sua estrutura global. A maioria destes modelos viabilizam a existência de um oceano interno, abaixo da casca de gelo onde estas estruturas são observadas.

Os experimentos de gravidade de *Galileo* indicam que Europa é diferenciada, provavelmente possuindo um núcleo metálico com 700 Km de raio, uma manto rochoso de silicato e uma litosfera de 150 km de espessura, com densidade de água líquida ou sólida. Europa apresenta acoplamento de maré com Júpiter e possui rotação praticamente síncrona (ver Geissler et al. (1998) para detalhes sobre rotação não-síncrona em Europa). Seu período orbital é de 3.5 dias terrestres. Sua órbita é caracterizada por estar em ressonância com Io e Ganimedes. Io é a lua mais próxima de Júpiter, seguido por Europa e Ganimedes (Calisto, a quarta e mais distante das Galileanas, não está em ressonância com as outras). Em uma razão 1 : 2 : 4, quando Ganimedes gira ao redor de Júpiter uma vez, Europa gira exatamente duas e Io quatro vezes. Neste sistema, eventualmente Europa e Io se alinham com Júpiter, numa configuração conhecida como *conjunção*. Neste caso Europa está em seu apocentro (ponto de sua órbita mais distante de Júpiter). O mesmo alinhamento ocorre entre Europa e Ganimedes, mas nesse caso Europa está em seu pericentro (seu ponto mais próximo de Júpiter). Isto é responsável pela excentricidade da órbita de Europa, devido à interação gravitacional destes corpos.

Ex. de figura:

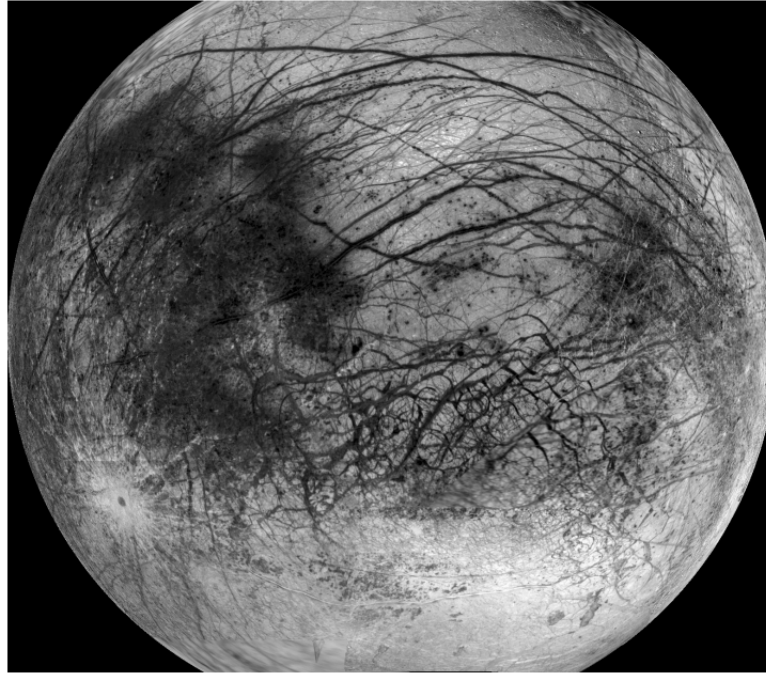


Figura 1.1: Legenda figura.

# Capítulo 2

## A criar

A escrever...

Ex. de citação: (Han & Showman 2010)

### 2.1 Subseção

A escrever...

# Capítulo 3

## A criar

A escrever...

Exemplos de citação: (Gerya 2010), (see Giordano & Nakanishi 2006, Chap. 5).

Ex. de tabela:

Physical Parameter	Symbol	Values
Gravity	$g$	$1.3 \text{ m s}^{-1}$
Density	$\rho$	$917 \text{ kg m}^{-3}$
Thermal expansivity	$\alpha$	$1.65 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Thermal diffusivity	$\kappa$	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Specific heat	$c_p$	$2000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Surface temperature	$T_t$	100 K
Bottom temperature	$T_b$	270 K
Melting-temp. viscosity	$\eta_0$	$10^{13} \text{ Pa s}$
Rigidity of ice	$\mu$	$4 \times 10^9 \text{ Pa}$
Amplitude of tidal flexing	$\epsilon_0$	$2.1 \times 10^{-5}$
Thickness of ice shell	$d$	15 – 20 Km

Tabela 3.1: Legenda tabela.

# Capítulo 4

## A criar

A escrever...

Ex. de figura:

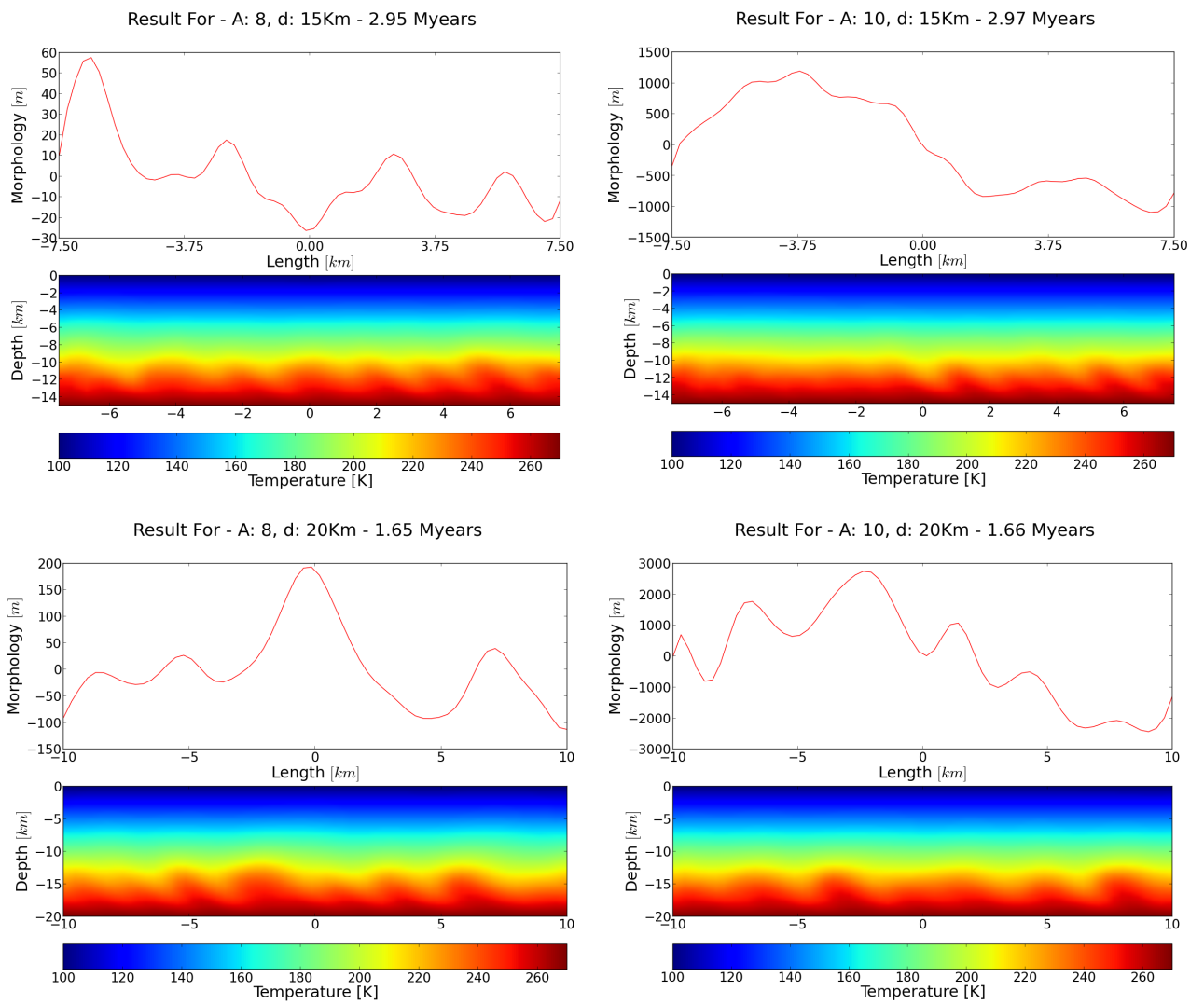


Figura 4.1: Legenda figura.

# Apêndice A

## A criar

A escrever apêndice...

# Referências Bibliográficas

Geissler, P. E., Greenberg, R., Hoppa, G., et al. 1998, Nature Vol. 391

Gerya, T. 2010, Numerical Geodynamical Modelling (Cambridge University Press)

Giordano, N. J. & Nakanishi, H. 2006, Computational Physics, Second Edition (Pearson Prentice Hall)

Han, L. & Showman, A. P. 2010, Elsevier

Pappalardo, R. T., Belton, M. J. S., Brenemmn, H. H., et al. 1999, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. E10, Pages 24,015-24,055