

Dinâmica convectiva na borda de litosfera continental

Victor Sacek (IAG/USP)

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

The transition between continental and oceanic lithosphere generally presents an expressive variation in lithospheric thickness that can induce edge-driven convection in the asthenospheric mantle. Depending on the vigor of the convection and the rheological behavior of the mantle, part of the base of the continental lithosphere can be eroded and transported hundreds of kilometers by convective cells. Based on numerical models to simulate the convective dynamics of the mantle, I studied in which conditions the mantle of the continental lithosphere is eroded and incorporated into the asthenosphere. I concluded that the erosion of the lithospheric root is intermittent and essentially depends on the asthenospheric and lithospheric viscosity. This study can contribute to the understanding of chemical signature of intraplate magmatism and the stability of continental lithosphere.

Introdução

Ao contrário da litosfera, que preserva um comportamento essencialmente sólido ao longo de milhões de anos, o manto astenosférico flui no tempo geológico, contribuindo para o surgimento de células de convecção sob a litosfera. Essas células de convecção induzem perturbações na estrutura térmica da litosfera, controlando o fluxo de calor para a base da litosfera e, conseqüentemente, para a superfície terrestre. Como a litosfera continental geralmente apresenta uma espessura superior à litosfera oceânica, esta transição induz uma convecção de pequena escala na borda da litosfera continental denominada de *edge-driven convection* (EDC) (King & Anderson, 1998), resultando em um movimento descendente da astenosfera mais fria próximo à transição continente-oceano. Esta porção da astenosfera tornou-se mais fria pelo contato lateral deste manto com a litosfera continental relativamente mais fria. Para haver conservação de massa, há um movimento ascendente na astenosfera trazendo manto aquecido sob a litosfera em uma porção mais distal da margem, criando assim uma célula de convecção no manto superior (Figura 1).

O contínuo movimento descendente da astenosfera próximo à litosfera continental pode resultar na eventual erosão da base do manto litosférico continental, incorporado a astenosfera. A taxa de remoção da base da litosfera continental por EDC depende da viscosidade da manto astenosférico, que controla o vigor da

convecção, e da viscosidade do manto litosférico. Por ser mais fria, a base da litosfera continental é naturalmente mais viscosa que a astenosfera. Porém, diversos trabalhos (e.g. Doin et al., 1997; Lenardic & Moresi, 1999) mostraram que um importante ingrediente para a estabilidade da litosfera continental por bilhões de anos é a presença de uma diferença composicional entre o manto litosférico continental e manto astenosférico, resultando em um manto litosférico continental mais viscoso que a astenosfera sob a mesma condição de pressão e temperatura.

Para avaliar a estabilidade da borda da litosfera continental sob a influência de células de convecção para diferentes estruturas de viscosidade para o manto, neste trabalho é utilizado um modelo numérico capaz de simular a dinâmica convectiva do manto superior com variação espacial de composição, resolvendo as equações de conservação de massa, momento e energia através do método dos elementos finitos.

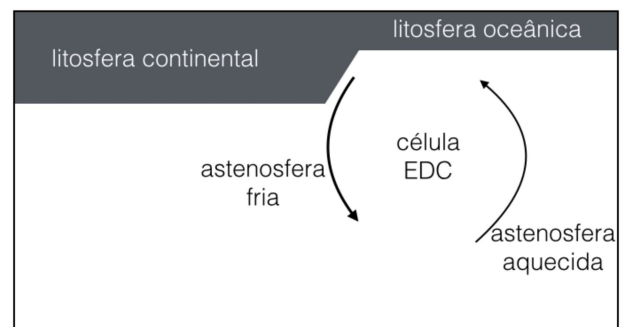


Figura 1. Esquema de convecção mantélica em borda de placa continental em margem divergente.

Metodologia

Para simular a variação da viscosidade no manto superior, utilizou-se uma lei de Arrhenius para descrever a viscosidade em função da temperatura e composição, assumindo-se uma reologia Newtoniana. Nesta formulação a viscosidade dinâmica do manto μ é dada por

$$\mu = \mu(C, T) = C\mu_r \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} \right) \right]$$

onde C é um fator composicional, T é a temperatura, μ_r é uma viscosidade de referência, $E_a = 120$ kJ/mol é a energia de ativação, R é a constante universal dos gases, $T_b = 1300^\circ\text{C}$ é a temperatura da base do modelo.

O fator composicional C tem a função de amplificar a viscosidade da manto continental em relação ao manto astenosférico, onde foi assumido $C = 1$.

Uma representação da configuração inicial e condições de contorno do modelo é apresentada na Figura 2. Para simular a formação de um rifte continental e analisar a evolução das células de convecção, simulou-se o estiramento da litosfera com uma velocidade da litosfera relativa ao centro do rifte v_{half} (Figura 2). Assumiu-se que a velocidade horizontal é nula na base do modelo.

Adicionalmente introduziu-se um aumento na viscosidade em 660 km para simular o efeito da transição de fase mineral a esta profundidade.

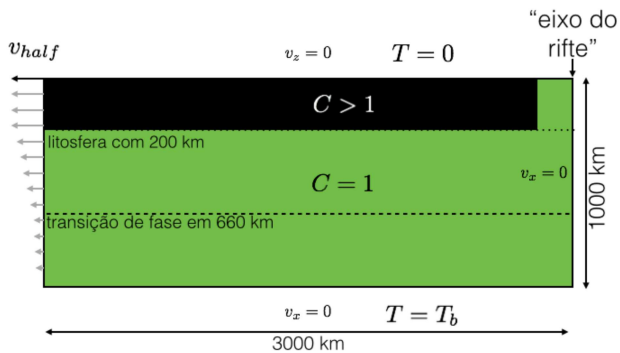


Figura 2. Configuração inicial do modelo numérico e condições de contorno.

O fator composicional é rastreado através de partículas que são transportadas pelo campo de velocidades no interior do manto.

Foram testados diferentes valores para a viscosidade de referência μ_r , para o fator composicional C e para a velocidade relativa da placa litosférica v_{half} , avaliando-se o efeito na borda da litosfera continental.

Resultados

A Figura 3, no final deste documento, apresenta a evolução da estrutura térmica do modelo com $\mu_r = 1 \times 10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $C = 10$ para o manto litosférico continental e $v_{half} = 1 \text{ cm/ano}$. Nesta figura, os pontos cinzas representam a posição de partículas do manto astenosférico, enquanto que os pontos pretos rastreiam a posição de partículas no interior da litosfera continental.

Observa-se que há surgimento de um movimento convectivo descendente próximo a borda da litosfera continental que fica evidente na Figura 3 a partir de 60 milhões de anos (Ma) do início da simulação numérica. Um movimento ascendente mais difuso ocorre em uma posição mais distal, trazendo manto astenosférico aquecido para a base da litosfera afinada.

Com a contínua atuação da célula convectiva, uma fração do manto litosférico continental é erodida, sendo transportada para o interior da astenosfera. Isto fica evidente na Figura 3 nos instantes 90 e 120 Ma, onde há partículas do manto litosférico (pontos pretos) removidos da base da litosfera.

Para verificar a eficiência desta erosão para diferentes estruturas reológicas do manto, definiu-se uma região da borda da litosfera continental com 200 km de largura e

200 km de profundidade avaliando-se quanto desta região foi removida pela convecção astenosférica após 130 Ma do início da simulação numérica.

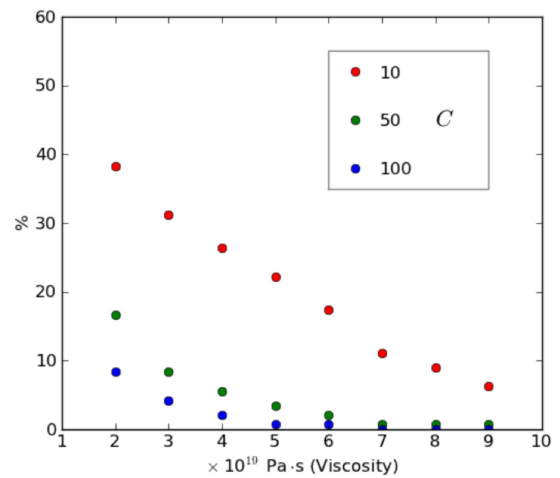


Figura 4. Fração do manto continental erodida após 130 Ma em função do fator composicional C e da viscosidade de referência μ_r .

Os resultados indicam que se o fator composicional C induzir um aumento de viscosidade da litosfera 10 vezes o valor astenosférico ($C = 10$), cerca de 40% da região da extremidade da litosfera pode ser reciclada no interior da astenosfera para o manto astenosférico com viscosidade da ordem de $1 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Figura 4). Já para um manto astenosférico mais viscoso e um contraste maior de viscosidade entre a litosfera e a astenosfera, a fração de manto litosférico erodida tende a ser menor.

Por outro lado a velocidade relativa da litosfera em relação a base do modelo tem uma influência secundária na magnitude da erosão da base da litosfera (Figura 5).

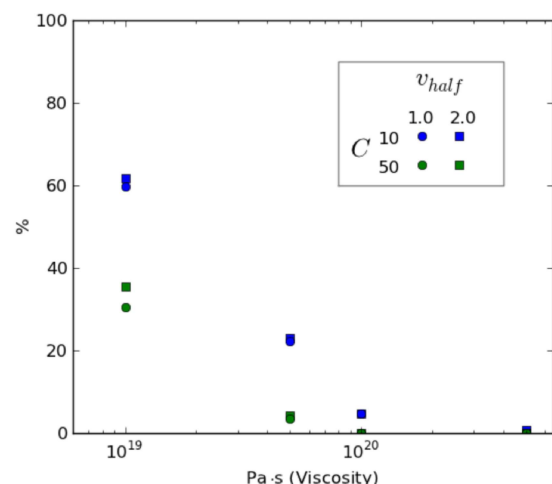


Figura 5. Fração do manto continental erodida após 130 Ma em função do fator composicional C , da viscosidade de referência μ_r e da velocidade relativa v_{half} .

Discussão e Conclusões

Através dos experimentos numéricos, foi possível concluir que a ocorrência e magnitude da erosão da base da litosfera continental por células de convecção de pequena escala na borda da placa é função da viscosidade do manto litosférico e astenosférico. Quanto mais viscosa é a litosfera com relação ao manto astenosférico, menor é a magnitude da erosão sublitosférica. Outro ponto importante sobre a dinâmica mantélica é que o vigor da convecção não atinge uma configuração estacionário ou varia monotonicamente, mas oscila de forma intermitente. Isso faz com que existam pulsos de erosão seguidos por intervalos onde o movimento descendente na borda da placa sejam menos expressivos. Esse comportamento pode ser visto no gráfico da Figura 6, onde a velocidade máxima de deslocamento descendente do manto astenosférico próximo a borda da litosfera continental é representado em função do tempo, para o modelo da Figura 3. Para este modelo, observa-se três picos de deslocamento descendente da astenosfera.

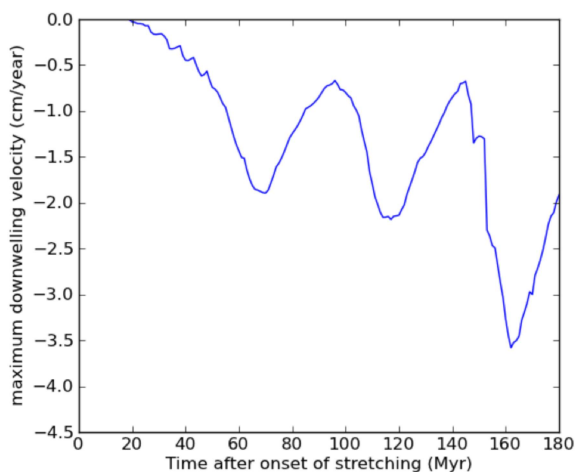


Figura 6. Velocidade máxima de deslocamento descendente do manto astenosférico próximo a borda do continente em função do tempo para o modelo da Figura 3: $\mu_r = 1 \times 10^{20}$ Pa \cdot s, $C = 10$ para o manto litosférico continental e $v_{half} = 1$ cm/ano.

Esta variação intermitente pode ter implicações importantes para a evolução do fluxo térmico em margens divergentes (e.g. Lucazeau *et al.*, 2008), modificando a história de subsidência de bacias marginais (e.g. Petersen *et al.*, 2010) e contribuindo para a modificação da assinatura geoquímica de eventual magmatismo intraplaca.

A variação temporal do vigor convectivo depende essencialmente da eficiência relativa do transporte de calor por condução no interior da litosfera e do transporte de calor por convecção na astenosfera, sendo significativamente influenciado pela geometria da borda da placa litosférica (Sacek & Ussami, 2013).

Adicionalmente, constatou-se que a variação da velocidade relativa da litosfera continental em relação a base do manto superior não resulta em uma modificação significativa no vigor da convecção de borda, conseqüentemente não alterando expressivamente a magnitude da erosão da base da litosfera.

Agradecimentos

Este projeto foi financiado pela FAPESP, processo 2013/21084-8.

Referências

- Doin, M., Fleitout, L., & Christensen, U., 1997. Mantle convection and stability of depleted and undepleted continental lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 102, 2771–2787.
- King, S., & Anderson, D., 1998. Edge-driven convection. *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 289–296.
- Lenardic, A., & Moresi, L. N., 1999. Some thoughts on the stability of cratonic lithosphere: effects of buoyancy and viscosity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B6), 12747-12758.
- Lucazeau, F. et al., 2008. Persistent thermal activity at the Eastern Gulf of Aden after continental break-up. *Nature Geoscience*, 1(12), 854-858.
- Petersen, K. D. et al., 2010. Small-scale mantle convection produces stratigraphic sequences in sedimentary basins. *Science*, 329(5993), 827-830.
- Sacek, V., & Ussami, N., 2013. Upper mantle viscosity and dynamic subsidence of curved continental margins. *Nature communications*, 4.

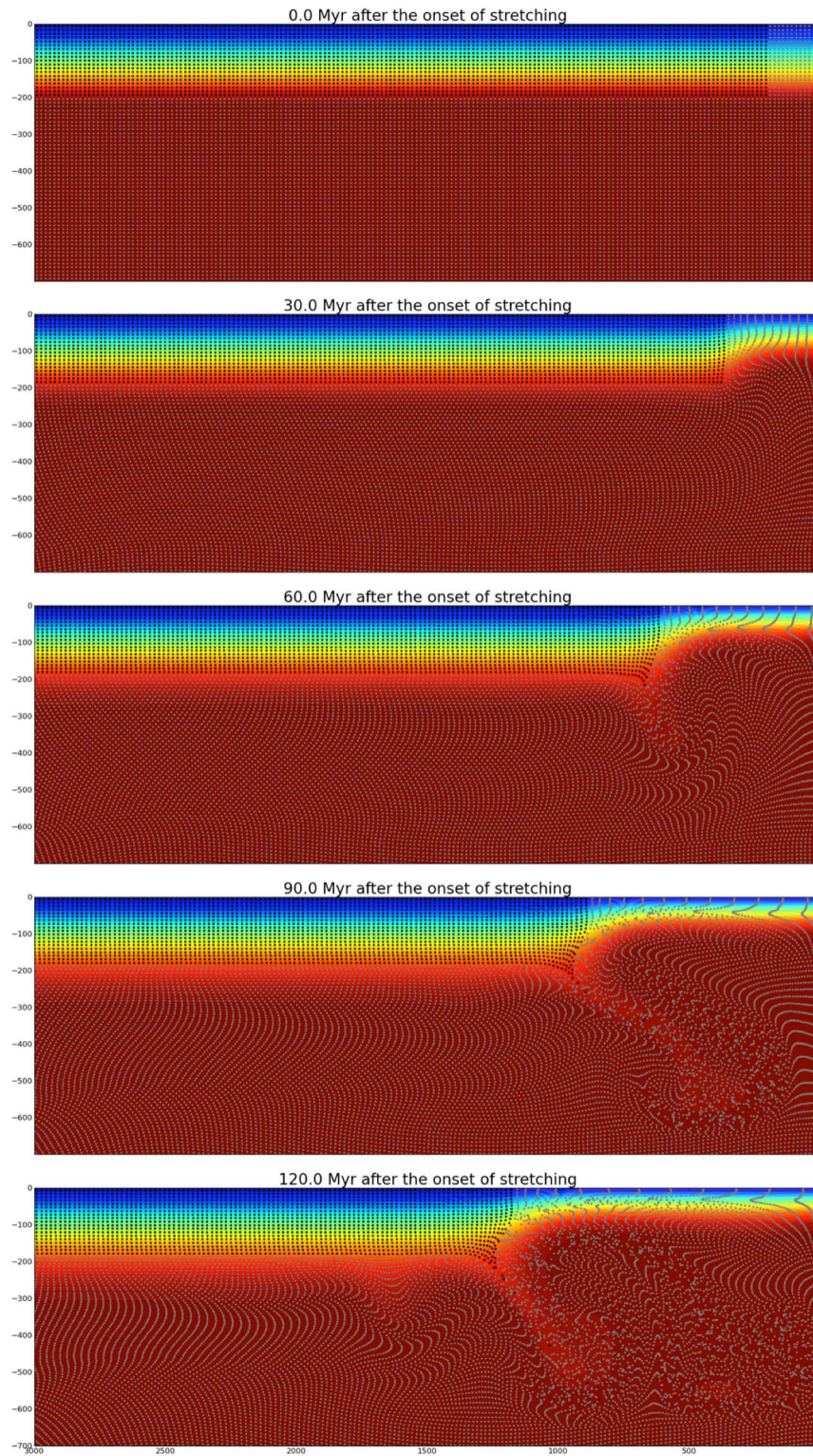


Figura 3. Evolução da estrutura térmica e composicional para o modelo com $\mu_r = 1 \times 10^{20}$ Pa \cdot s, $C = 10$ para o manto litosférico continental e $v_{half} = 1$ cm/ano. A litosfera continental original é representada pelos pontos pretos enquanto que os pontos cinzas indicam o manto astenosférico.