



Viscoelasticidade da litosfera na região do Cone do Amazonas

Luiz G. Souza de Oliveira, Marcelo A. Martins Neto e Maria S. Carvalho Barbosa – Departamento de Geologia - UFOP

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

We present in this work a hypothesis for the rheological model of the lithosphere in the Amazon Cone area, based on viscoelastic response (Maxwell viscoelastic material). The mechanical properties of the lithosphere in the region were studied through of the integrated analysis of geophysical data, combined with investigations about its flexural behavior and theoretical developments in heat flow. Therefore, the viscoelastic model can explain two processes in different times: 1) crustal extension (low strain rate/viscous rheology) and 2) flexural response (high strain rate/elastic rheology) during sedimentary loading.

Introdução

Localizado na Margem Equatorial Brasileira, mais precisamente na Bacia da Foz do Amazonas, o Cone do Amazonas (Figura 1) é representado por uma expressiva carga sedimentar decorrente da inversão do fluxo do rio Amazonas, ocorrida no Mioceno Médio.

Estudos executados na região por Cochran (1973) e Braga (1991) investigaram a estrutura da litosfera da região, além de propor modelos de comportamento reológico para a mesma.

Oliveira (2003), baseado na integração de dados geofísicos, aliado a modelagens numéricas (fluxo térmico) e análise flexural, propõe um comportamento viscoelástico para a litosfera na região em questão.

Mesmo baseando-se num modelo elástico para a litosfera em questão, Oliveira (2003) investiga a evolução da mesma na região em dois momentos distintos: pré e pós-deposição do Cone do Amazonas. Tanto a geometria da descontinuidade de Mohorovicic (Moho) quanto à deformação imposta pela carga sedimentar seriam respostas do comportamento reológico viscoelástico.

Sob esse contexto, esse trabalho visa discorrer sobre a validação da hipótese de uma reologia viscoelástica para litosfera na região do Cone do Amazonas.

Formulação matemática da viscoelasticidade

Em escalas de tempo geológico da ordem de 10^{11} a 10^{17} segundos, os sólidos cristalinos que compõe o manto e a crosta inferior podem apresentar um comportamento análogo ao de fluidos viscosos. Porém, em escalas de tempo menores, o manto pode comportar-se como um sólido elástico (Turcotte e Schubert, 1982).

Um material que possui tais características é conhecido como *material viscoelástico de Maxwell*.

Este comportamento é análogo ao apresentado por um sistema constituído por uma mola, com constante elástica 2μ , interligada a uma seringa contendo um fluido com viscosidade 2η (Figura 2).

Supondo que num instante $t=0$ seja aplicada uma força em cada extremidade do sistema. A resposta é imediatamente elástica durante a extensão da mola. Dando continuidade a aplicação da força, o sistema atingirá um estágio onde a mola não se deformará mais. Se o esforço for cessado, o êmbolo da seringa voltará gradualmente a sua posição inicial, e a mola recuperará sua configuração original.

Esta é a idéia de um sólido de Maxwell. Sob influência de um campo de forças, ele responde elasticamente, a princípio. Contudo, gradualmente, o material que o constitui flui até que as tensões cisalhantes sejam aliviadas.

Matematicamente, é possível descrever este comportamento em termos das propriedades intrínsecas do sólido viscoelástico. Se tomarmos ε_M e ε_S como as deformações apresentadas pela mola e pela seringa, a deformação total do sistema (ε) é dada por (Wahr, 1996):

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_S \quad (1)$$

A tensão (σ) aplicada na mola equivale a

$$\sigma = 2\mu\varepsilon_M \quad (2)$$

Já no caso da seringa, temos

$$\sigma = 2\eta\varepsilon_S \quad (3)$$

Contudo, ε e σ variam em função do tempo (d/dt). Portanto, em termos de taxa de deformação ($d\varepsilon/dt$), as equações 2 e 3 podem ser escritas como:

$$\frac{d\sigma}{dt} = 2\mu \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_M \quad (4)$$

$$\sigma = 2\eta \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_S \quad (5)$$

Mediante as considerações, e adicionando as equações 4 e 5, obtemos:

$$2\eta \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\tau_0} \sigma \quad (6)$$

onde τ_0 é denominado *tempo de relaxamento* ($\tau_0 = \eta/\mu$).

Analisando a equação 6, é possível concluir que se a viscosidade é infinita, o material comporta-se elasticamente.

Sob esse contexto, o valor da σ em $t = 0$, imediatamente após a ocorrência de uma deformação ε_0 , é dado por

$$2\mu \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\varepsilon_0}{dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\sigma(t=0)}{dt} + \frac{1}{\tau_0} \sigma(t=0) \quad (7)$$

Considerando que σ sempre deve ser finita, temos

$$\sigma(t=0) = 2\mu\varepsilon_0 \quad (8)$$

O significado físico dessa proposição é que, para tempos infinitamente pequenos, apenas a mola responderá a deformação (reologia elástica).

Assim, para $\varepsilon_0 = 0$ ($t > 0$), temos a seguinte formulação matemática:

$$\sigma = 2\mu\varepsilon_0 \quad \text{para } t = 0 \quad (9)$$

$$(d\sigma/dt) + (1/\tau_0)\sigma = 0 \quad \text{para } t > 0$$

O sistema de equações 9 apresenta seguinte solução:

$$\sigma = (2\mu\varepsilon_0)e^{-t/\tau_0} \quad (10)$$

que demonstra claramente que a tensão decai exponencialmente com $t \rightarrow \infty$.

Sendo assim, um sólido apresentando comportamento viscoelástico responde *elasticamente* quando é submetido a uma taxa de deformação muito alta. Em contrapartida, se a taxa de deformação for menor, ele tenderá a apresentar um comportamento *viscoso*.

É perfeitamente possível transportar os conceitos supracitados para o modelamento da reologia da litosfera

sob a ótica da viscoelasticidade. Turcotte e Schubert (1982) demonstraram que

$$\tau_0 = \frac{3}{2EC_1\sigma_0^2} e^{E_a/RT} \quad (11)$$

onde E é o módulo de Young, T a temperatura e R , C_1 e E_a constantes. Fica evidente o forte controle que a temperatura, tensão inicial (σ_0) e os parâmetros reológicos exercem sobre o tempo de relaxamento.

Dados e técnicas de análise

O modelo reológico para a litosfera no Cone do Amazonas proposto por Oliveira (2003) é suportado pela integração de dados gravimétricos e de sísmica de reflexão, que foram utilizados para determinar a estruturação crustal na área de estudo.

Uma técnica de inversão de dados gravimétricos também foi utilizada por Oliveira (2003), no intuito de refinar as profundidades da Moho obtidas pelas modelagens 2D. O mapa de profundidades da Moho (Figura 3) resultante da inversão mostrou-se suavizado, com profundidades mais coerentes em relação a dados de sísmica de refração (Braga 1991).

Com base no mapa de profundidades do embasamento acústico obtido por modelagens gravimétricas 2D, foi realizada a análise flexural (Figuras 4a, 4b e 4c) objetivando determinar o valor da espessura efetivamente elástica (T_e) para a litosfera no Cone do Amazonas. Baseado no método de comparação entre as profundidades do embasamento e o perfil flexural universal (Turcotte e Schubert, 1982), o valor de 25 km foi determinado para T_e . É ressaltado aqui que este resultado deve ser entendido como um valor médio que sofreu variação durante o tempo geológico, mas que é capaz de atender à solicitação imposta pela carga sedimentar. Mesmo assim, não difere muito dos resultados obtidos por Cochran (1973) e Braga (1991).

Determinações teóricas do fluxo térmico na região também foram executadas, com base no fator de estiramento crustal (β) determinado via modelagens gravimétricas 2D.

A curva de fluxo térmico (Figura 5), construída com base no modelo de estiramento crustal uniforme teorizado por McKenzie (1978), atesta um resfriamento lento da litosfera na região. A análise de dados de sísmica de reflexão evidencia este fato, devido à ausência de seqüências vulcânicas expressivas mapeadas.

Uma hipótese de reologia viscoelástica para a litosfera na região do Cone do Amazonas

A hipótese apresentada em Oliveira (2003) relativa a reologia da litosfera na região do Cone do Amazonas presume um comportamento viscoelástico para a mesma.

Este comportamento é capaz de explicar a evolução da litosfera em um estágio *pré-deposicional* seguido por um estágio *pós-deposicional*, em relação ao Cone do Amazonas.

No estágio *pré-deposicional*, que se situa entre a ruptura do Gondwana, originando o Atlântico Equatorial, até o momento que antecipa a formação do Cone do Amazonas, a litosfera pode Ter seu comportamento vinculado a uma reologia viscosa.

Os resultados alcançados pela inversão de dados gravimétricos atestam uma geometria suavizada para a Moho na região. Esta observação pode ser associada a um processo de extensão crustal contínuo, que envolveria uma taxa de deformação pequena. Além disso, o baixo fluxo térmico forneceria um cenário propício para o desenvolvimento deste processo, uma vez que o calor favorece o domínio da reologia viscosa, como foi mostrado na equação 11.

Já o período *pós-deposicional* iniciou-se a partir do Mioceno Médio, com a inversão da drenagem do rio Amazonas, decorrente do processo de edificação dos Andes.

Torna-se evidente o fato que este estágio envolve um processo de sedimentação intenso, ocorrido num intervalo de tempo menor (em relação ao processo de extensão crustal). Portanto, em termos de taxa de deformação, o estágio *pós-deposição* possui uma magnitude maior que o estágio *pré-deposição*.

Sendo assim, o comportamento elástico atenderia satisfatoriamente à resposta da litosfera frente à deformação imposta pelo carregamento sedimentar.

Levando-se em consideração as limitações pertencentes à metodologia usada, e a aproximação elástica da reologia da litosfera na área de estudo, o comportamento viscoelástico pode perfeitamente ser aplicado para o entendimento do arranjo crustal/litosférico da região do Cone do Amazonas.

Este comportamento reológico pode reforçar a idéia que o Cone do Amazonas é responsável pela deformação da crosta subjacente, sendo responsável pela edificação da Elevação do Ceará. Tal proposta já foi levantada por outros autores (Mendonça e El-Robrini, 1993; Silveira e Gomes, 1995).

A viscoelasticidade da litosfera também permite a adoção de um mecanismo de compensação isostática regional (Figura 6). Como a deposição do Cone do Amazonas se deu numa litosfera estabilizada, termalmente mais fria, forças de fluabilidade agiriam na região, permitindo o equilíbrio isostático e a deformação das áreas a sua volta (Musset e Khan, 2000).

Conclusões

O modelo reológico viscoelástico aqui proposto para a litosfera na região do Cone do Amazonas pode explicar

sua atual estruturação. Esta proposição torna-se mais abrangente em relação ao modelo elástico, pois relaciona a taxa de deformação, fluxo térmico e mecanismos de deformação como guias para a evolução geotectônica na região.

Etapas futuras deste estudo envolverão a realização de modelagens numéricas para a litosfera envolvendo o Método dos Elementos Finitos (MEF), no intuito de: a) quantificar a deformação na região; b) testar numericamente o modelo viscoelástico segundo a reologia de Maxwell; c) estudo da deformação na crosta subjacente e d) avaliar a distribuição de tensões na litosfera.

Referências

- Braga, L. F. S.**, 1991, Isostatic evolution and crustal structures of the Amazon Continental Margin determined by admittance analyses and inversion of gravity data. PhD Thesis, Oregon State University, 161pp.
- Cochran, J. R.**, 1973, Gravity and magnetic investigations in the Guiana Basin, Western Equatorial Atlantic: Geol. Soc. America Bull., Vol. 84, p3249-3268.
- McKenzie, D. P.**, 1978, Some remarks on the development of sedimentary basins: Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 40, p25-32.
- Mendonça, C. A. e El-Robrini, M.**, 1993, Potencialidade dos dados de altimetria por satélite nas pesquisas marinhas, ilustração na Margem Equatorial Brasileira: Congresso da SBGf, Rio de Janeiro. Anais, Vol. 2, p1120-1124.
- Musset, A. E., e Khan, M. A.**, 2000, Looking into the Earth: Na introduction to Geological Geophysics. Cambridge University Press, UK, 470 pp.
- Oliveira, L. G. S.**, 2003, Estudo Gravimétrico da Região do Cone do Amazonas, Bacia da Foz do Amazonas, Margem Equatorial Brasileira: Contribuições às Ciências da Terra, Série M, Vol. 4, 121pp.
- Silveira, D. P., e Gomes, B. S.**, 1995, Projeto LEPLAC, aspectos tectonofísicos da Margem Equatorial Brasileira: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Gramado. Anais, p257-259.
- Turcotte, D. L., e Schubert G.**, 1982, Geodynamics: Application at Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley & Sons, USA, 450 pp.
- Wahr, P. V.**, 1996, Geodesy and Gravity. Samizdat Press, USA, 294 pp.

Agradecimentos

Os autores agradecem as opiniões e sugestões propostas por Anderson Moraes (CENPES/Petrobras).

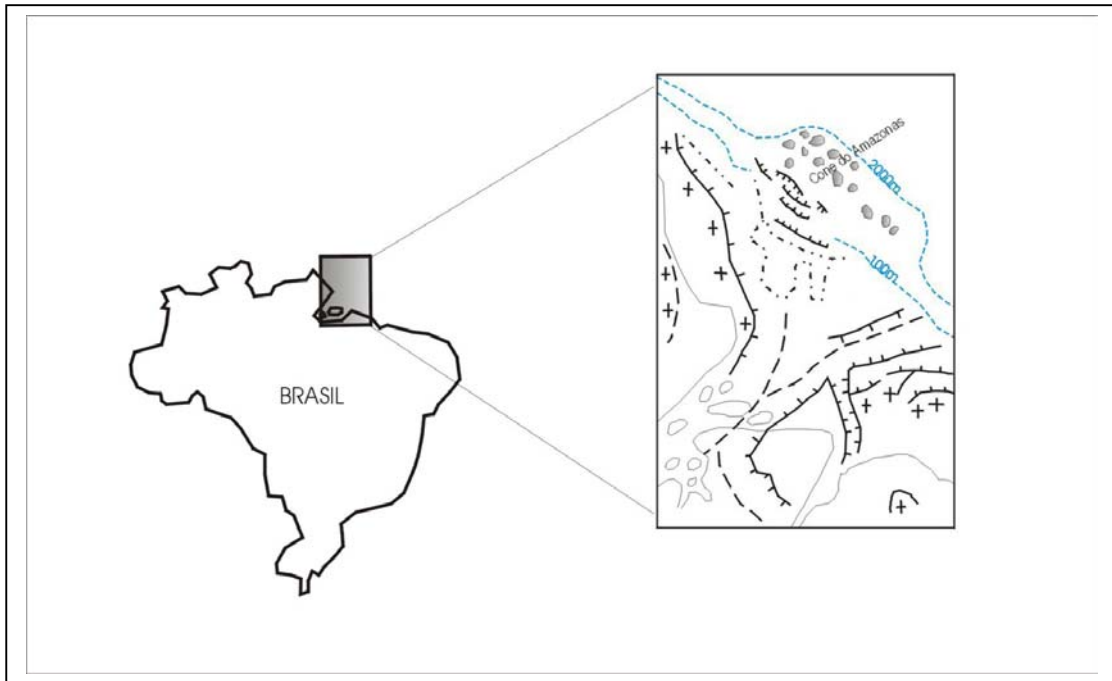


Figura 1 – Mapa de localização do Cone do Amazonas (adaptado de Oliveira, 2003).

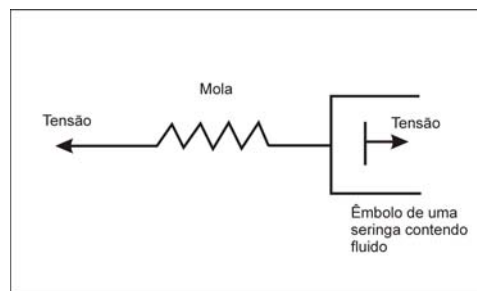


Figura 2 – Modelo análogo constituído por uma mola e uma seringa, simulando a reologia viscoelástica.

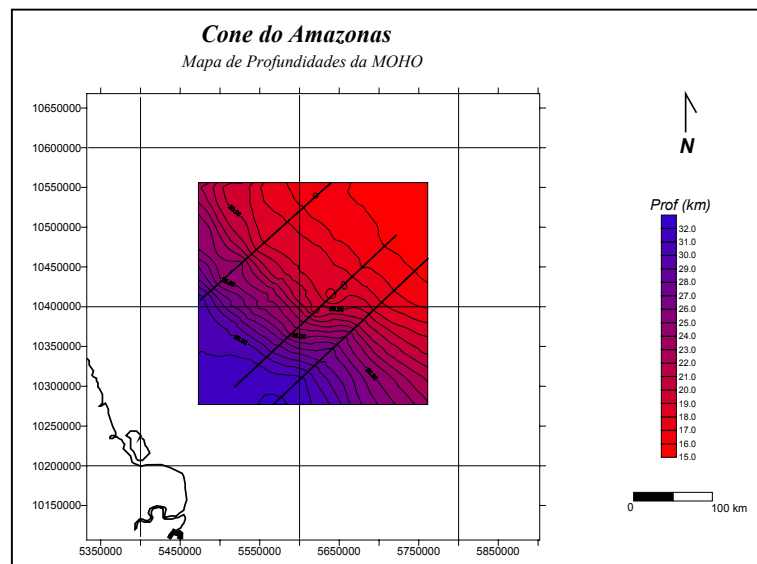


Figura 3 – Mapa de profundidades da Moho na área de estudo obtido pela inversão de dados gravimétricos (Oliveira 2003).

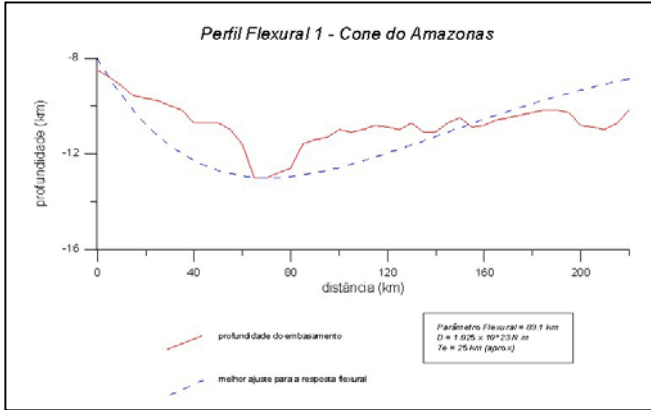


Figura 4a – Perfil flexural 1 da área de estudo.

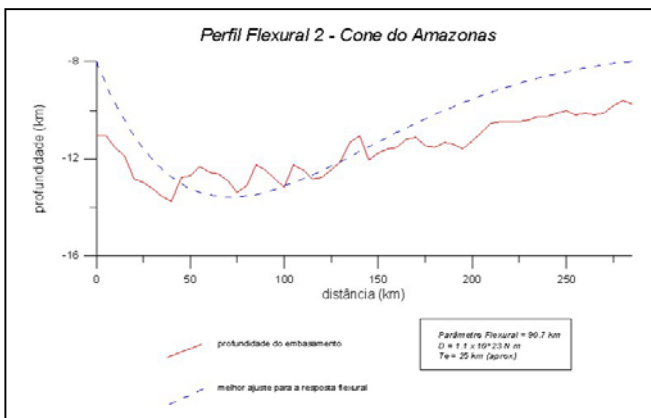


Figura 4b – Perfil flexural 2 da área de estudo.

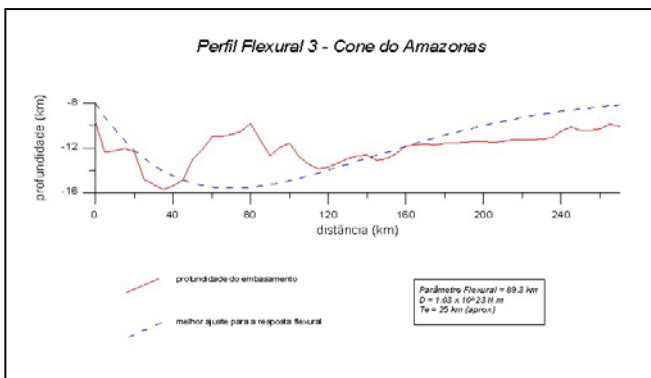


Figura 4c – Perfil flexural 3 da área de estudo.

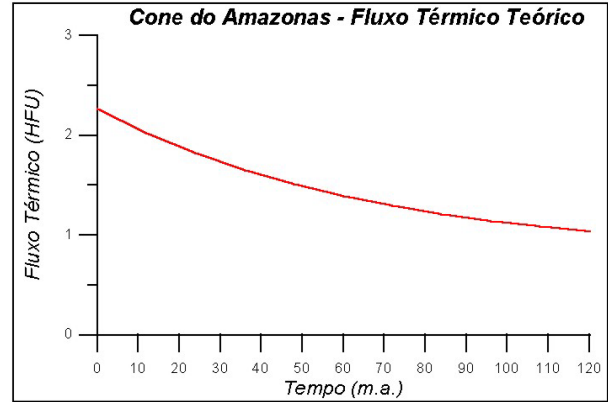


Figura 5 – Curva de fluxo térmico para o Cone do Amazonas obtida segundo o modelo de McKenzie (1978), com $\beta = 4.2$ (segundo Oliveira, 2003).

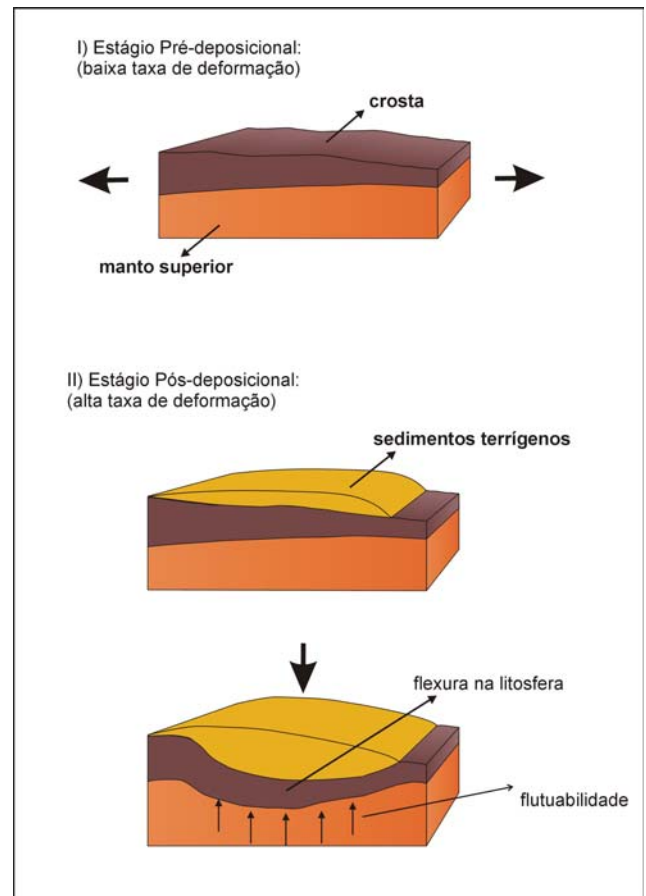


Figura 6 – Modelo viscoelástico para a litosfera na região do Cone do Amazonas, segundo Oliveira (2003). O estágio pré-deposicional foi marcado por uma extensão crustal contínua (comportamento viscoso), enquanto que o estágio pós-deposicional expressa a resposta elástica da litosfera frente ao grande e contínuo aporte sedimentar proveniente do rio Amazonas. Em termos de isostasia, o modelo permite uma compensação regional, controlada pelas forças de flutuabilidade que agem na base da crosta.