



## Modelagem 3-D da Deformação Flexural da Litosfera na Margem Continental do Brasil: Implicações na História de Subsidência das Bacias Marginais

Victor Sacek\*, Naomi Ussami, Instituto de Geofísica, Astronomia e Ciências Atmosféricas

Copyright 2006, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no II Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, Natal, 21 - 23 de setembro de 2006. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Técnico-científica do II SR-SBGf 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

O objetivo deste projeto foi de obter a solução numérica pelo Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method: FEM) do campo de deformações da placa elástica fina que representa a Placa da América do Sul devido às variações temporais e geográficas das cargas sedimentares que preencheram as bacias marginais leste e norte do Brasil. Para isto foram desenvolvidos softwares para a modelagem pelo FEM utilizando-se elementos triangulares em malhas não regulares, além de considerar variação geográfica de propriedades físicas da placa. O método é aplicado ao caso das cargas sedimentares do Cone do Amazonas observando-se a influência das cargas de sedimentos no padrão de flexura nas regiões adjacentes ao Cone. O método poderá ser aplicado também em processos dinâmicos, analisando como ocorreu a migração das ombreiras flexurais durante o processo deposicional. Outras bacias sedimentares ao longo da costa brasileira serão analisadas pelo mesmo método, verificando qual foi o papel da flexura da placa na história de deposição de sedimentos na bacia.

### Introdução

A análise de bacias é a etapa fundamental na avaliação do potencial petrolífero de uma área. A compreensão da distribuição e da evolução das sequências deposicionais e suas faixas permitem que sejam feitas previsões racionais e realistas sobre a localização das rochas fonte, rochas reservatório e rochas retentoras de petróleo. A localização e a forma das principais sequências deposicionais dependem dos processos mecânicos que levaram à formação da bacia. O mecanismo de abertura do Atlântico Sul, devido a um estiramento da litosfera, subsidência inicial (fase do rifteamento), seguido de subsidência térmica tem sido utilizado no estudo e análise das bacias marginais do Brasil e oeste da África. Entretanto, levando-se em conta que existem diferenças marcantes na história de subsidência dessas bacias, diversos estudos recentes têm mostrado que modelos (usualmente 2-D) simples não conseguem prever todas as observações geológicas. Um dos fatores mais difíceis de ser quantificado é a subsidência flexural em três dimensões. Modelagem flexural 2-D tem sido utilizada em

bacias do tipo ante-país situadas defronte à frentes de empurrão como no caso dos sub-Andes. Entretanto, resultados recentes demonstram que a geometria da placa e das cargas bem como a variação lateral das propriedades elásticas da placa diferem substancialmente dos resultados obtidos utilizando aproximações numéricas bi-dimensionais e sem variação lateral das propriedades mecânicas da placa. Desta forma, pretende-se resolver numericamente a deformação flexural 3-D ao longo da margem continental atlântica do Brasil. Os resultados a serem obtidos serão confrontados com as observações geológicas de bacias marginais brasileiras.

### Metodologia

A partir da equação bi-harmônica da flexura  $w$  de uma placa fina

$$(\mathbf{L}\nabla)^T \mathbf{D} \mathbf{L}\nabla w + \Delta \rho g w - q = 0$$

onde

$$(\mathbf{L}\nabla) = \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \right]^T$$

$$\mathbf{D} = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu)/2 \end{bmatrix}$$

( $D$  é a rigidez elástica da placa,  $D_r$  é a diferença da densidade entre o manto e o material que preenche a placa flexurada e  $q$  é a carga vertical aplicada sobre a placa), é possível resolvê-la através do método dos elementos finitos (Zienkiewicz, 2000) discretizando a região de interesse  $\mathbf{W}$ , sob certas condições de contorno  $\mathbf{f}_b$ , da seguinte forma:  $w = \mathbf{N} \mathbf{a}$ , onde  $\mathbf{N}$  representa um vetor com funções interpoladoras conhecidas e  $\mathbf{a}$  é um vetor que contém parâmetros desconhecidos que representam as incógnitas do problema. Com a discretização pelo método dos elementos finitos, o problema restringe-se em resolver um sistema linear

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{f}$$

onde

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \int_{\Omega} (\mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} + \mathbf{N}^T \Delta \rho g \mathbf{N}) d\Omega \mathbf{a}$$

$$\mathbf{f} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T q d\Omega + \mathbf{f}_b$$

$$\mathbf{B} = (\mathbf{L} \nabla) \mathbf{N}$$

A topologia utilizada foi a desenvolvida por Specht (1988), com triângulos com três nós, cada nó com três graus de liberdade ( $w, x, y$ ).

O software foi desenvolvido em linguagem C utilizando-se para resolver sistema linear a decomposição de Cholesky.

A malha triangular foi criada a partir do software DISTMESH, desenvolvida por Per-Olof Persson e Gilbert Strang, disponível no site <http://www.csit.fsu.edu/>.

**Flexura no Cone do Rio Amazonas**

Neste modelo estudou-se o efeito flexural da carga de sedimentos na foz do rio Amazonas (Figura. 1) sobre a placa litosférica. Considerou-se um valor de  $T_e = 75$  km na região emersa (Figura. 2) e  $T_e = 35$  km na região submersa (plataforma continental e placa oceânica). Para o cone de sedimentos foi assumido uma densidade igual a 2300 kg/m<sup>3</sup> e espessura máxima da carga igual a 2 km (esta espessura está relacionada com o pacote de sedimentos que está acima da posição de equilíbrio da placa quando não sujeita a cargas verticais, assim não incluindo o pacote de sedimentos que preenchem a porção flexurada).

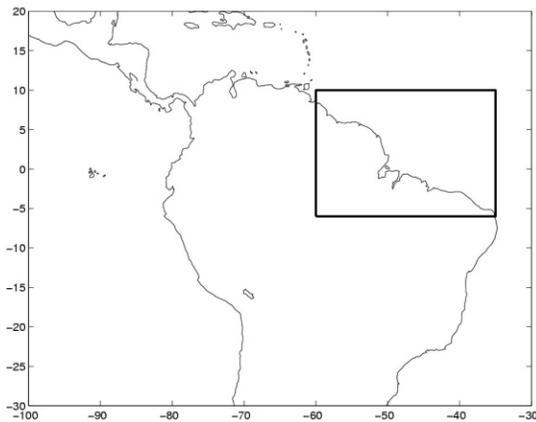


Figura 1. O retângulo delimita a região que foi discretizada para estudar-se o efeito flexural devido a carga de sedimentos do Cone do Amazonas.

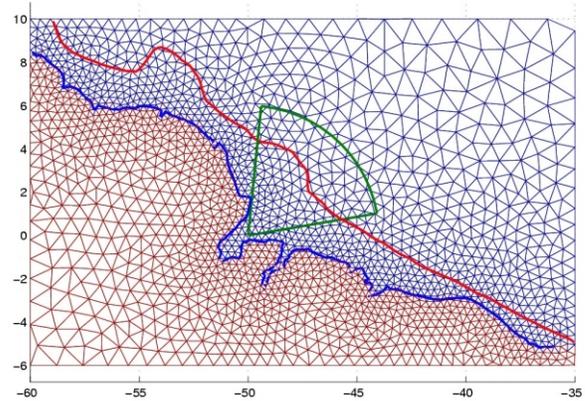


Figura 2. Malha de elementos finitos para a Foz do Rio Amazonas.

**Resultados**

Observando-se a Figura 3 vemos que surge uma ombreira flexural na parte emersa na longitude 54°W com cerca de 25 m. Esta feição também foi observada por Driscoll & Karner (1994) e neste trabalho foi sugerido estar relacionado com o Arco de Gurupá. Já na plataforma continental existem duas ombreiras flexurais que se dispõem lateralmente ao cone, atingindo amplitudes também entorno de 25 m. Na frente do cone surge uma ombreira flexural com cerca de 50 m que pode servir de barreira, impedindo que os sedimentos sejam depositados em regiões mais distantes da foz, colaborando para que os sedimentos sejam espalhados lateralmente. Sob a carga de sedimentos, a máxima subsidência foi de 2.6 km, que somados aos 2 km de carga resultam em um pacote de sedimentos de 4.6 km.

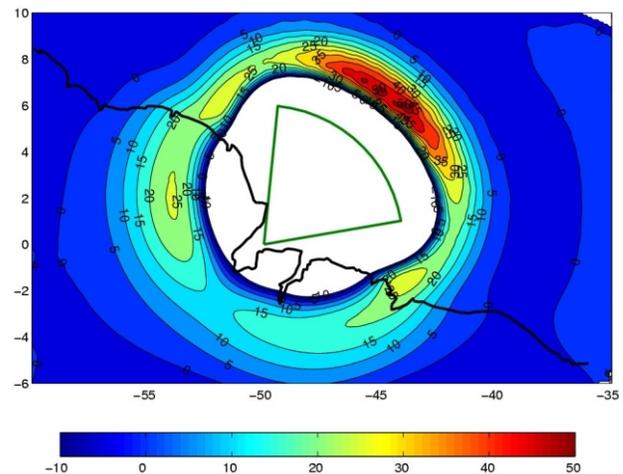


Figura 3. Mapa de deslocamento vertical em metros da placa para o modelo da Figura 2

## Discussão e Conclusões

O método dos elementos finitos mostrou-se uma ferramenta versátil para simulação de flexura de placas. Ao comparar-se os resultados analíticos e os resultados numéricos para o problema de uma carga pontual, observou-se a convergência do resultado numérico para o resultado analítico conforme a malha foi sendo refinada.

Para o caso do Cone do Amazonas, observou-se que, para os valores escolhidos das propriedades físicas da placa litosférica e das dimensões e propriedades da carga de sedimentos, a espessura total de sedimentos obtida (4.6 km) está próxima do valor total de sedimentos da Formação Parí (5-8 km), depositados a partir do meso-Mioceno. O máximo soerguimento na região emersa atingiu 25 m e coincide geograficamente com arco de Gurupá. Assim o efeito flexural do pacote de sedimentos sobre a placa pode estar relacionado com o soerguimento desta região. Foram observados soerguimentos nas regiões laterais ao cone, na plataforma continental, que podem impedir a interconexão de sedimentos do Cone do Amazonas com bacias adjacentes, isolando-a. Já na frente do cone houve o maior soerguimento, atingindo cerca de 50 m de amplitude, representando uma barreira impedindo que os sedimentos sejam depositados em regiões mais distantes da foz.

O método dos elementos finitos poderá ser aplicado também em processos dinâmicos, analisando-se como ocorreu a migração das ombreiras flexurais durante o processo deposicional. Outras bacias sedimentares ao longo da costa brasileira serão analisadas pelo mesmo método, verificando-se qual foi o papel da flexura da placa na história de deposição de sedimentos na bacia.

## Agradecimentos

Ao Programa de Recursos Humanos nº 19 da Agência Nacional do Petróleo pela bolsa de Iniciação Científica.

## Referências

- Driscoll, N. W., Karner, G. D., 1994, Flexural deformation due to the Amazon Fan loading: A feedback mechanism affecting sediment delivery to margins: *Geology*, v. 22, pp. 1015-1018.
- Specht, B. (1988), Modified shape functions for the three node plate bending element passing the patch test., *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 26, 705-715.
- Zienkiewicz, O. C., R. L. Taylor (Eds.) (2000), *The Finite Element Method*, vol. 2, 5th ed., 445 pp., Butterworth Heinemann, Jordan Hill, Oxford.