

RESPOSTA FLEXURAL DA LITOSFERA E SUBSIDÊNCIA REGIONAL NA ÁREA DO CONE DO AMAZONAS

FLEXURAL RESPONSE OF THE LITHOSPHERE AND REGIONAL SUBSIDENCE IN THE AMAZON CONE AREA

Luiz F. S. Braga¹

RESUMO - A espessura elástica efetiva da litosfera na área do Cone do Amazonas foi obtida por meio da relação direta entre estimativas de flexura do embasamento e estimativas da carga sedimentar. Esta abordagem exigiu uma escolha *a priori* de um modelo termomecânico de evolução da Margem Continental do Amazonas, para avaliação da contribuição térmica às profundidades atuais do embasamento. Com base em dados estruturais, obtidos em trabalhos anteriores, o modelo de cisalhamento puro e distensão uniforme, proposto por McKenzie, foi utilizado na estimativa da subsidência tectônica da área do Cone do Amazonas. Subordinadas às hipóteses implícitas neste modelo, a carga sedimentar e a flexura do embasamento podem ser quantificadas. O fator de afinamento crustal (o único parâmetro livre no modelo de distensão uniforme) foi determinado admitindo-se uma crosta normal de referência com 32 km de espessura. A resposta do filtro isostático foi então obtida por meio dos coeficientes de Fourier dos valores estimados de carga sedimentar e dos valores estimados de subsidência. A rigidez flexural, D , e a correspondente espessura elástica efetiva, T_e , foram então obtidas por ajuste de mínimos quadrados dos valores experimentais do filtro isostático ao modelo de placa elástica fina, sujeita a carga em sua superfície. Esta investigação conduziu ao valor $T_e=12$ km ($D=1.1 \times 10^{22}$ Newton.metros). Este valor, aqui interpretado como média temporal, foi utilizado em conjunto com o modelo de placa térmica de Parsons e Sclater e vínculos cronoestratigráficos, de modo a permitir uma estimativa da evolução temporal da litosfera elástica, sob área do Cone do Amazonas. O valor de T_e , determinado com a abordagem aqui empregada, não é afetado por incertezas na profundidade de compensação, como usualmente ocorre em estudos de isostasia flexural que se utilizam da relação entre gravimetria e batimetria.

(Originais recebidos em 25.01.93).

ABSTRACT - The effective elastic thickness of the lithosphere in the Amazon Cone area was obtained using the direct relation between estimates of basement flexure and sediment load. In order to predict thermal contribution to present depths to basement, this approach required an *a priori* choice of a thermo-mechanical model of evolution of the Amazon continental margin. Based on structural data obtained in earlier studies, McKenzie's pure-shear uniform-extension model was used to estimate tectonic subsidence in the Amazon Cone area. Subject to the assumptions implicit in that model, estimates of sediment load and basement flexure may be made. The crustal stretching factor (the only free parameter in the uniform extension model) was estimated by assuming a 32-km-thick unstretched crust as reference. The isostatic filter response was then estimated from the Fourier coefficients of the sediment load and subsidence estimates. Flexural rigidity (D) and corresponding elastic thickness (T_e) were then obtained by least squares fitting of filter estimates to the thin elastic plate model. The analysis yielded an elastic thickness estimate of 12 km ($D=1.1 \times 10^{22}$ Newton-meters). This time-average estimate was used together with Parsons and Sclater's cooling plate model and with available chronostratigraphic constraints to estimate the time evolution of the elastic lithosphere beneath the Amazon Cone area. The value of T_e , determined from the direct relation between load and flexure in the Amazon Cone, is not affected by uncertainties as to the depth of compensation, as commonly occurs in flexural isostasy analyses based on gravity and bathymetry data.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

¹ - Setor de Métodos Potenciais (SEMEPO), Divisão de Tecnologias Exploratórias (DITEC), Departamento de Exploração (DEPEX), Av. República do Chile, 65, Centro, CEP 20035-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 – INTRODUÇÃO

Dois processos geofísicos têm sido propostos como causa principal da subsidência das margens continentais: tectonismo e carregamento sedimentar. A subsidência tectônica é tratada como sendo o resultado de duas componentes: a subsidência inicial, causada pelo afinamento da litosfera, incluindo a camada crustal, e a subsequente subsidência térmica ou contração vertical, devida ao resfriamento progressivo da litosfera.

Trehu *et al.* (1989) discutem os resultados de modelagens termomecânicas da Margem Continental Atlântica da América do Norte e apontam a subsidência tectônica inicial como o parâmetro de maior margem de incerteza em sua mensuração, tendo por causa a definição pobre das idades e espessuras das unidades sedimentares pré-drift.

Alguns modelos de predição da contribuição tectônica para a subsidência (e.g., McKenzie, 1978, Royden e Keen, 1980) são usualmente vinculados por estimativas de subsidência, determinados a partir de dados de poços e dados cronoestratigráficos. A gravimetria provê vínculos relativos ao afinamento crustal na margem continental, e a magnetometria pode prover o principal vínculo para a determinação dos limites entre crosta continental e crosta oceânica.

McKenzie (1978) propõe um modelo simples de cisalhamento puro e distensão litosférica uniforme para a iniciação e evolução de bacias sedimentares onde geotermas, fluxo térmico e subsidência, associados ao

resfriamento da litosfera, são funções apenas da quantidade de estiramento e da idade a partir da implantação do *rift*. O modelo de McKenzie tem sido amplamente utilizado em pesquisas exploratórias para petróleo, para explicar os aspectos principais da evolução térmica das bacias sedimentares. As diferenças observadas entre valores de paleobatimetria preditos pelo modelo simples de McKenzie e valores estimados a partir de dados estratigráficos podem ser significativamente reduzidas pela utilização de modelos mais realistas como, por exemplo, o modelo de cisalhamento puro e distensão litosférica não-uniforme proposto por Royden e Keen (1980). No entanto, a maior parte dos modelos hoje considerados representam variações do modelo de cisalhamento puro e distensão uniforme proposto por McKenzie (1978).

Buck *et al.* (1988) discutem as conseqüências térmicas da distensão por cisalhamento simples comparada ao mecanismo de cisalhamento puro. O modelo de cisalhamento simples, apresentado por estes autores, não considera os parâmetros de rigidez ou viscoelasticidade da litosfera. No entanto, provêm discernimentos quanto ao padrão de fluxo térmico, subsidência ou soerguimento observados em *riffts* jovens ou preditos por modelagem para *riffts* antigos. Por exemplo, se o processo de rifteamento que deu origem a uma dada margem continental tiver resultado de um mecanismo de distensão por cisalhamento simples, em lugar de cisalhamento puro, o soerguimento ou subsidência inicial, a evolução térmica e controle dúctil/rúptil de falhamentos do embasamento devem ser diferentes. A

TABELA I / TABLE I
PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO DE DISTENSÃO UNIFORME
POR CISALHAMENTO PURO
PARAMETERS USED IN THE PURE-SHEAR UNIFORM EXTENSION MODEL

Parâmetro	Significado	Valor
T	Idade da Margem Continental da Foz do Amazonas (5) (após o rifteamento)	110 M.a.
h_l	Espessura da litosfera (1)	125 km
τ	Constante de decaimento (tempo) (2)	65.85 M.a.
T_a	Temperatura da astenosfera (2)	1365 °C
α	Coeficiente de expansão térmica (2)	$3.1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$Z(1)$	Elevação inicial do continente (4)	-0.10 km
h_c	Espessura crustal (4)	32.0 km
$\bar{\rho}_c$	Densidade média da crosta (4)	2.80 g/cm ³
$\rho_m(0)$	Densidade do material do manto a 0 °C (3)	3.308 g/cm ³
$\bar{\rho}_m$	Densidade média do manto (4)	3.278 g/cm ³
ρ_w	Densidade da água	1.03 g/cm ³
ρ_a	Densidade da astenosfera (3)	3.168 g/cm ³
E_l	Subsidência máxima do piso marinho (4)	3.84 km

(1) McKenzie, 1978

(2) Parsons e Sclater, 1977

(3) Celerier, 1986

(4) Estimado neste estudo

(5) Rodarte e Sartori, 1988

A - Fontes dos dados
A - Data sources

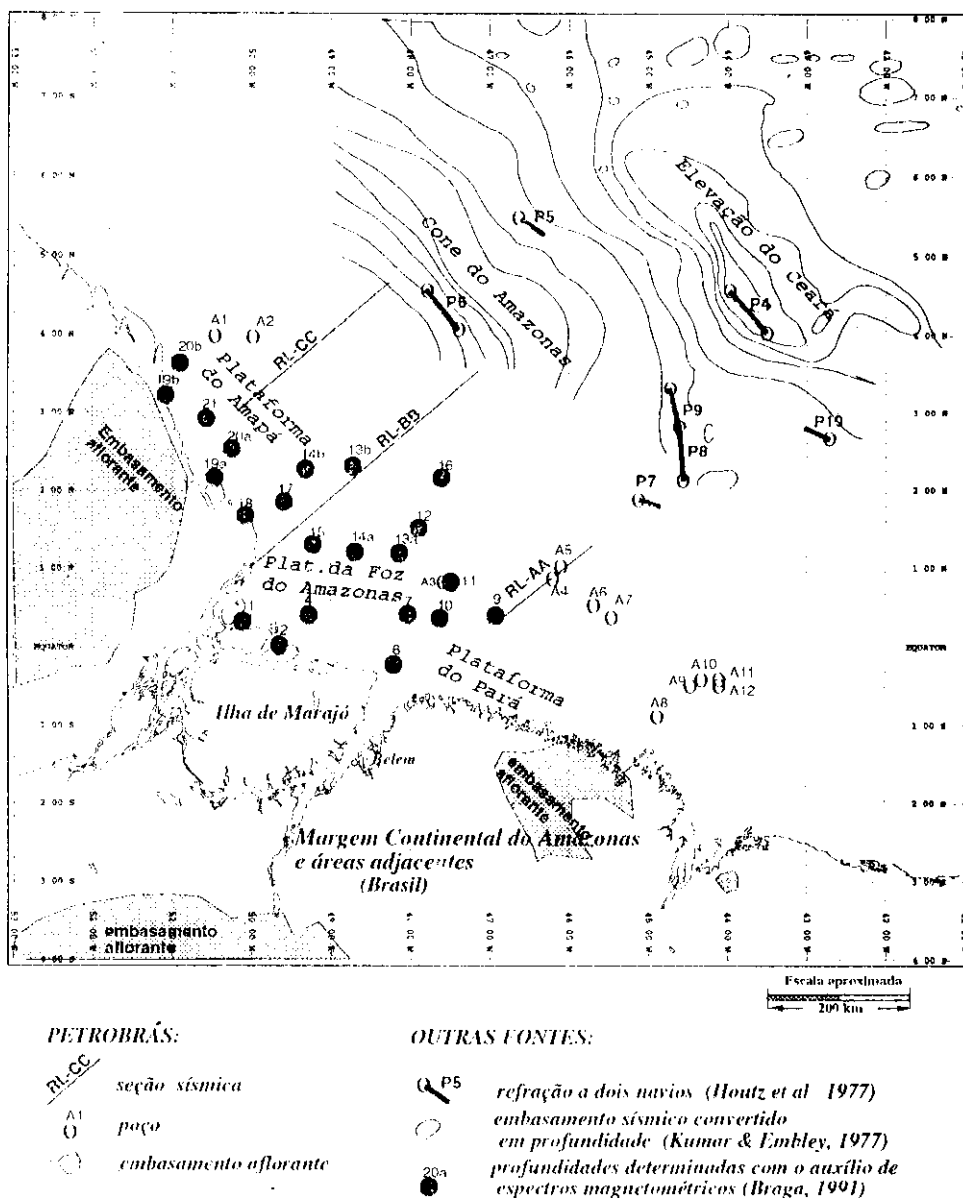


Fig. 1a - Embasamento regional da Margem Continental do Amazonas. Fonte dos dados e suas localizações.
 Fig. 1a - Regional basement of Amazon continental margin. Data sources and location map.

assimetria de fluxo térmico que se espera ocorrer em margens conjugadas é improvável que seja observada após a consecução do *rift*. Entretanto, a topografia do embasamento, bem como as espessuras crustais, são registros usualmente permanentes do mecanismo de distensão que podem ser verificados com o auxílio de dados sísmicos, dados de poços e dados gravimétricos e magnetométricos.

Celerier (1986) investiga a evolução do *Carolina Trough* na Margem Atlântica dos Estados Unidos comparando modelagens térmicas uni e bidimensionais, e conclui que, para predições com incertezas da ordem de 1 km, o modelo unidimensional de distensão uniforme é amplamente suficiente, sendo a principal fonte de melhor preci-

são, a utilização do modelo de resposta flexural para estimativa da componente de subsidência, causada pelo carregamento sedimentar. Segundo este autor, uma precisão de aproximadamente 300m requer a utilização de uma quantidade significativa de vínculos, usualmente escassos em bacias antigas e profundas. As bacias da Margem Continental do Amazonas enquadram-se nesta situação. Tais dados adicionais incluem: *input* térmico inicial, quantidades de erosão, propriedades físicas dos sedimentos, resposta litosférica ao carregamento sedimentar e estimativas acuradas das profundidades do embasamento.

As conclusões de Celerier serviram de estímulo à abordagem utilizada neste estudo. Assim, com o objetivo de

B - Embasamento regional
B - Regional basement

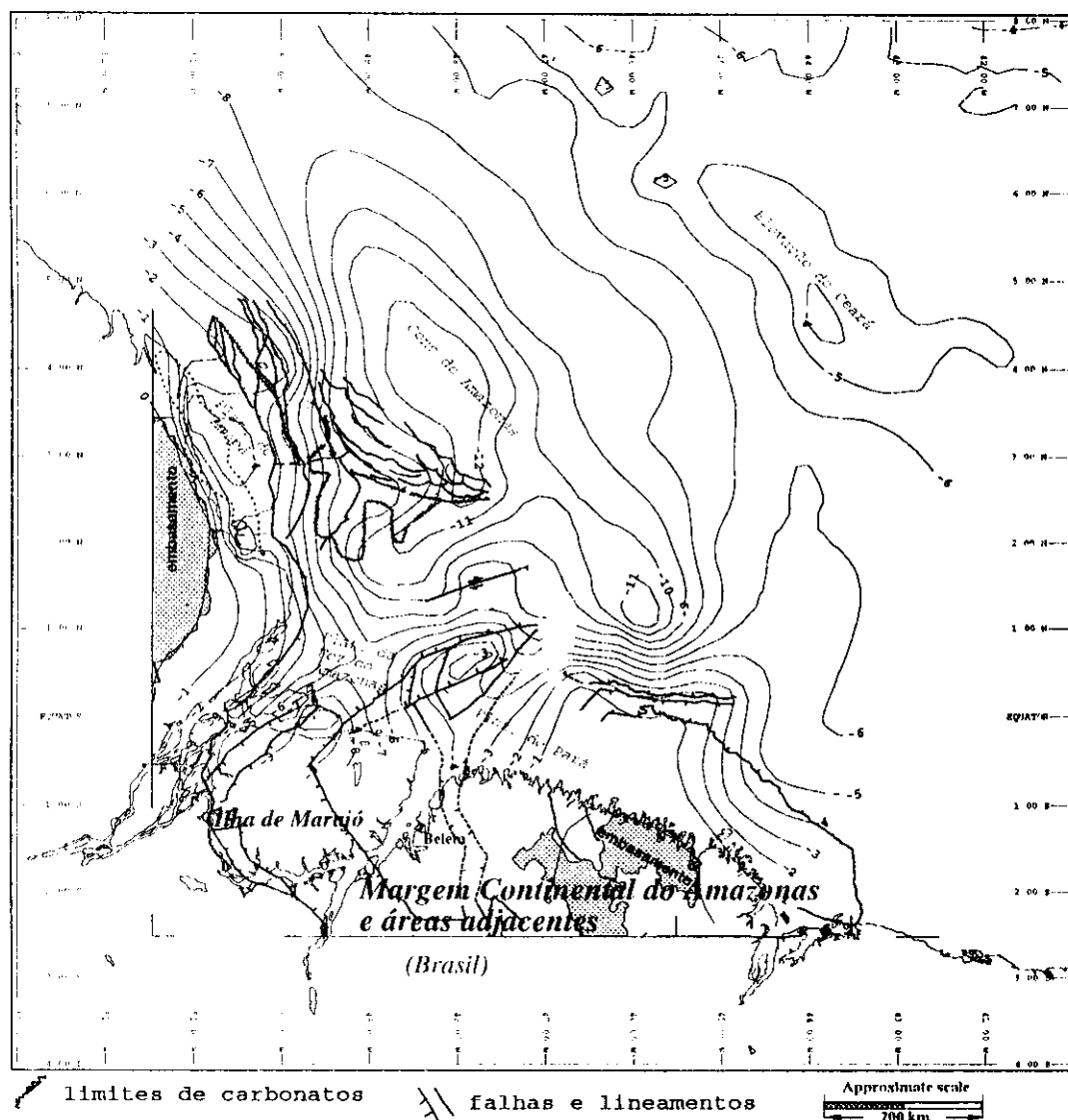


Fig. 1b - Embasamento regional da Margem Continental do Amazonas. Mapa de contorno do embasamento regional (intervalos de contorno: 1 km) e arcabouço estrutural simplificado da área em estudo.

Fig. 1b - Regional basement of Amazon continental margin. Contour map of regional basement (contour intervals = 1 km) and simplified structural elements of study area.

determinar as propriedades elásticas da litosfera na área do Cone do Amazonas, foram utilizados dados regionais de flexura do embasamento e estimativas da carga sedimentar depositada durante 110-115 M.a., desde a formação da Margem Continental do Amazonas. Como subproduto, a subsidência inicial e a subsidência tectônica são então obtidas e apresentadas sob a forma de mapas de contorno.

2 - MODELO, DADOS E TÉCNICA

Neste estudo, a resposta isostática da litosfera à carga sedimentar, na área do Cone do Amazonas, é determinada utilizando-se o modelo de placa elástica fina

(Banks *et al.* 1977, Turcotte e Schubert, 1982). A espessura elástica efetiva da placa litosférica, T_e , que sumariza suas propriedades elásticas, é obtida por ajuste do filtro isostático, determinado experimentalmente, ao filtro analítico que resulta da solução da equação de equilíbrio da placa elástica sujeita à carga em sua superfície (anexo I).

As etapas envolvidas na computação da resposta do filtro isostático flexural são apresentadas em forma de fluxograma no anexo II.

O modelo de McKenzie, cujas equações básicas são apresentadas no anexo III, foi utilizado na determinação da contribuição tectônica à subsidência total. Os dados de subsidência total (fig. 1a), que correspondem às profundidades atuais do embasamento, estão indicados sob a forma

de contorno de isovalores na figura 1b. As espessuras crustais foram obtidas a partir dos dados de profundidade do embasamento, apresentados nos mapas da figura 1, e dos dados de profundidade da descontinuidade de Mohorovicic mostrados na figura 2. Os fatores de estiramento crustal, definidos pela razão entre crosta normal e crosta distendida, foram computados utilizando-se como referência uma crosta normal com espessura de 32 km. A componente devida à carga sedimentar foi obtida subtraindo-se a subsidência total estimada da subsidência tectônica predita com o auxílio dos fatores de estiramento crustal apresentados na figura 3 e das equações do anexo III.

A crosta foi considerada homogênea dentro dos limites da área selecionada para análise. Conseqüentemente, admitiu-se que toda a porção crustal sob esta análise esteve sujeita às mesmas predições térmicas do modelo adotado. Os parâmetros térmicos de subsidência, apresentados na tabela I, foram escolhidos com base em trabalhos prévios em margens continentais do tipo atlânti-

ca. Os valores de subsidência inicial e a subsidência tectônica, obtidos para a área do Cone do Amazonas, estão representados, respectivamente, nos mapas de contorno das figuras 4a e b.

3 - CARGA SEDIMENTAR E FLEXURA DO EMBASAMENTO

A subsidência devida à carga sedimentar, W_{Load} , foi obtida computando-se a diferença entre as estimativas de subsidência total, S_{Total} , e a subsidência tectônica predita, $Z_t(T, \beta)$. Isto é:

$$W_{Load} = S_{Total} - Z_t(T, \beta)$$

onde:

T e β são, respectivamente, a idade do *rift* e o fator de estiramento litosférico.

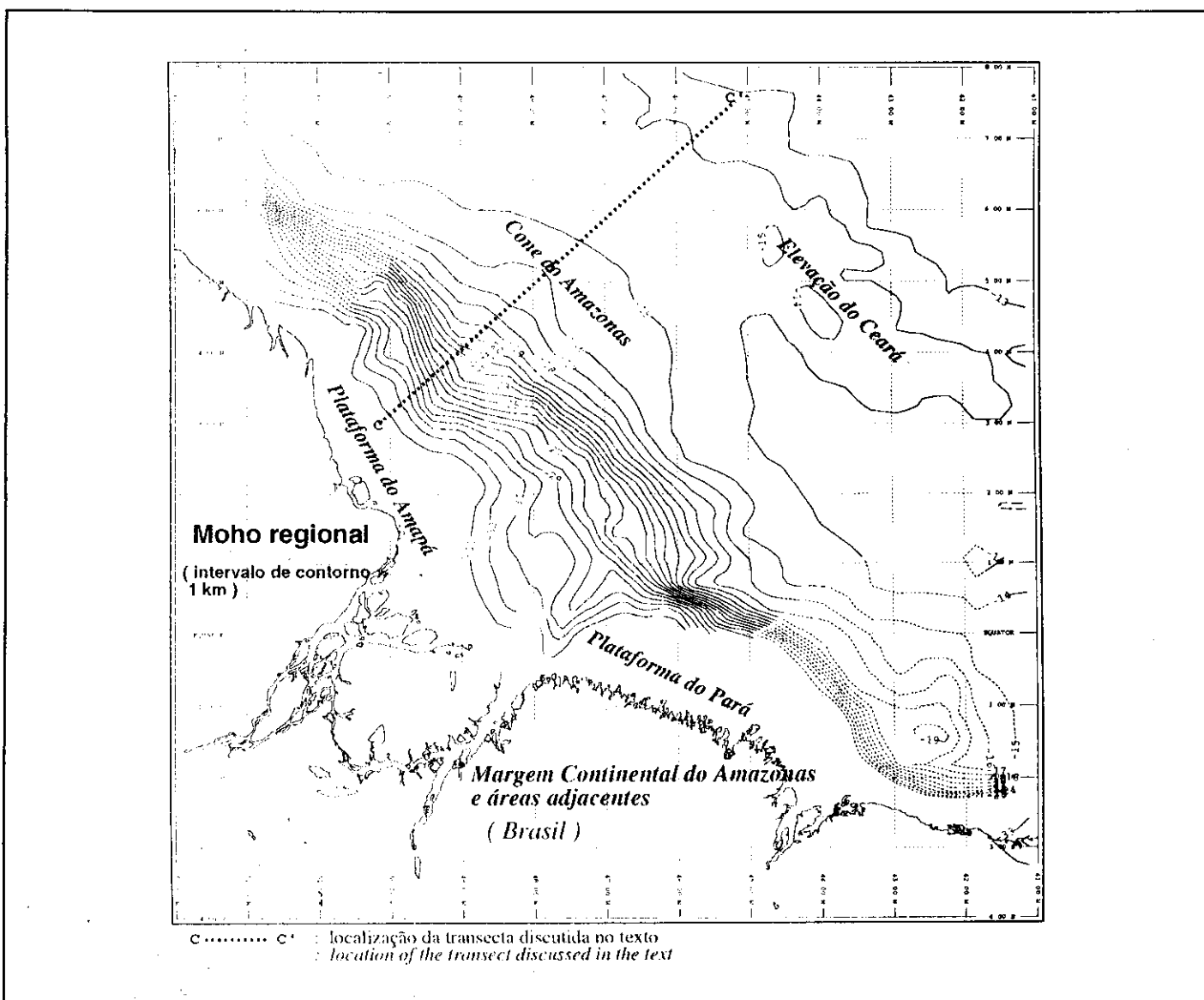


Fig. 2 - Mapa de contorno regional das profundidades da Moho (modificado de Braga, 1991).
 Fig. 2 - Regional contour map of depths to Moho (adapted from Braga, 1991).

Subtraindo-se os valores da batimetria atual, H_b , da subsidência tectônica predita, a carga sedimentar, H_{Load} , é então estimada. Isto é:

$$H_{Load} = Z_t(T, \beta) - H_b$$

Estas equações foram empregadas no cálculo dos valores H_{Load} e W_{Load} apresentados, respectivamente, nos mapas das figuras 5a e b.

Considerando-se que a história de deposição sedimentar não é intrinsecamente modelada nesta abordagem, a carga sedimentar estimada, e apresentada no mapa de contorno da figura 5a, foi denominada carga efetiva.

Uma abordagem similar para a avaliação quantitativa da carga sedimentar e flexura do embasamento foi utilizada por Walcott (1972) e Watts (1988). Estes autores,

no entanto, não consideraram a contribuição térmica à subsidência total, que pode afetar tanto a razão entre amplitudes como também a fase entre carga e flexura.

4 – RESPOSTA FLEXURAL E RIGIDEZ DA LITOSFERA

A topografia da carga sedimentar e a flexura do embasamento apresentados, respectivamente, nas figuras 5a e b, foram transformados para o domínio dos números de onda, de modo a permitir a computação da resposta característica do filtro isostático, apresentado na figura 6a. A equação (1.7), do anexo I, foi utilizada para computação da resposta do filtro. A rigidez flexural, D , e a correspondente espessura elástica efetiva, T_e , foram en-

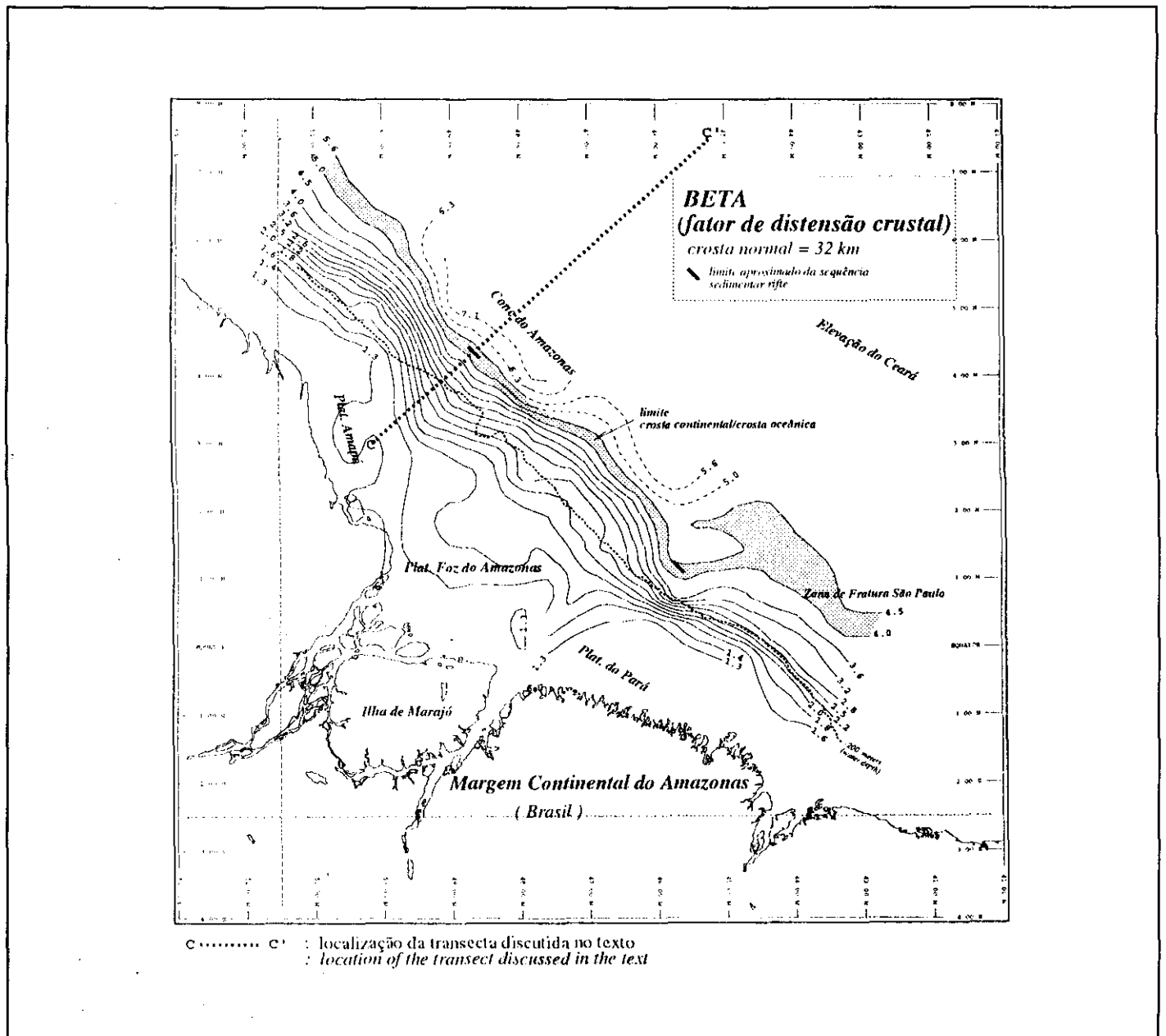


Fig. 3 - Mapa de contorno do fator de distensão crustal.
Fig. 3 - Contour map of crustal extension factor.

tão obtidas por meio de ajuste, por mínimos quadrados, dos valores de amplitude do filtro experimental ao modelo de litosfera elástica, dado pela equação (1.6). Com esta abordagem, o valor T_e não é afetado por incertezas na profundidade de compensação, o que usualmente ocorre nos estudos de isostasia que se utilizam de dados gravimétricos e batimétricos/topográficos.

O melhor ajuste, sob a ótica dos mínimos quadrados, forneceu o valor de rigidez flexural de 1.1×10^{22} N.m, com a correspondente espessura elástica efetiva de 12 km.

A resposta flexural de melhor ajuste ($T_e = 12$ km), plotada na figura 6a, claramente subestima a resposta experimental do filtro isostático para os números de onda na faixa $0.005 < k < 0.03$ ($210 < \lambda < 1050$ km). Estes comprimentos de onda, relativamente longos, dominam a parte central do Cone do Amazonas e parecem indicar uma

litosfera elástica com espessura muito superior a 12 km. Isto decorre do grande volume de sedimentos, com espessura máxima da ordem de 8 km, depositados durante o Mioceno (Silva *et al.* 1989), sobre uma litosfera relativamente fria e, portanto, significativamente rígida. Tais condições favorecem uma progradação acentuada dos sedimentos *seaward*, caracterizando os grandes comprimentos de onda envolvidos na resposta flexural. No setor sudeste, onde ocorrem comprimentos de onda relativamente curtos, uma litosfera elástica mais fina ($T_e < 12$ km) parece melhor se ajustar aos valores experimentais. Neste setor, a ocorrência de maior volume de sedimentos depositados sobre uma litosfera mais jovem, bem como a dissipação de tensões verticais através de falhas transcorrentes, podem explicar um decréscimo na rigidez aparente da litosfera.

a - Subsidiência inicial
a - The initial subsidence

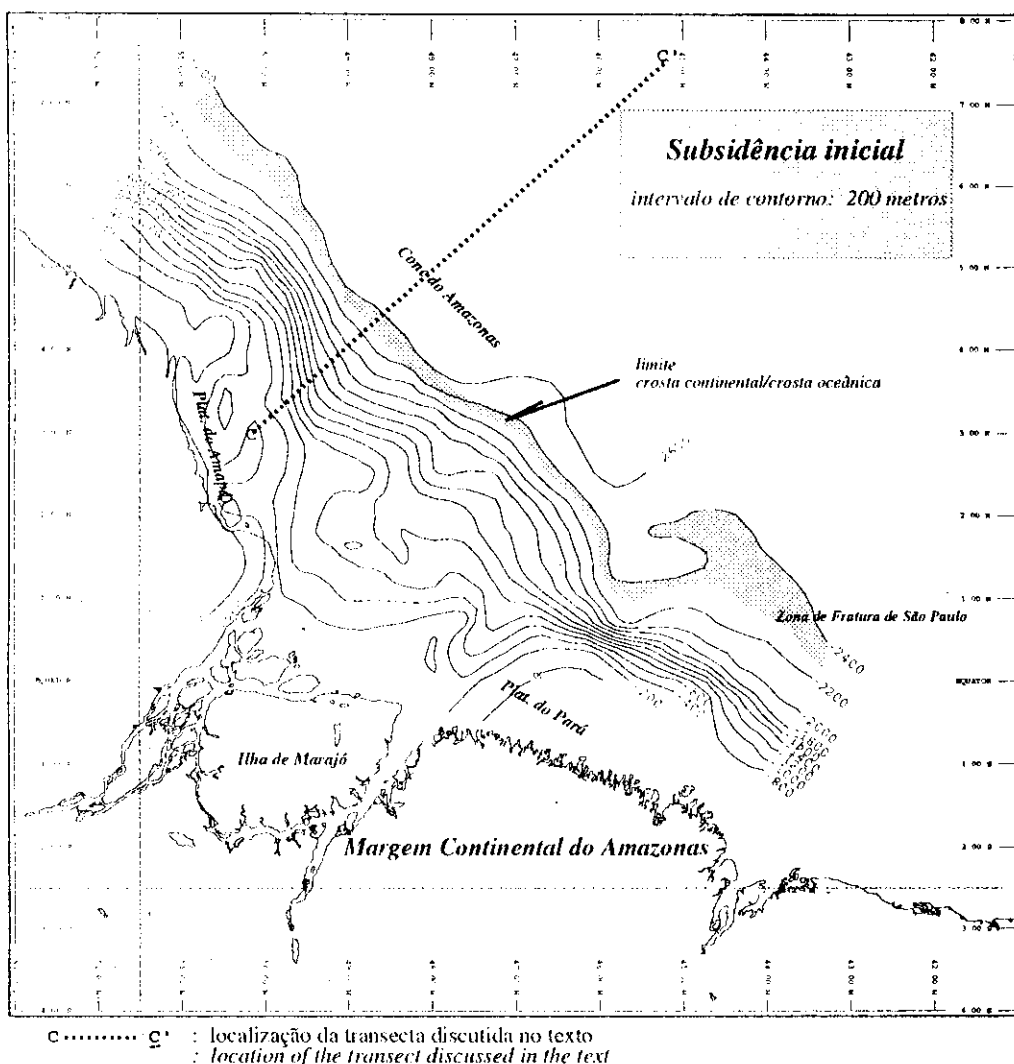


Fig. 4a - Mapa de contorno da subsidiência regional. Subsidiência inicial.
Fig. 4a - Contour maps of regional subsidence. Initial subsidence.

b - Subsidiência tectônica
 b - The tectonic subsidence

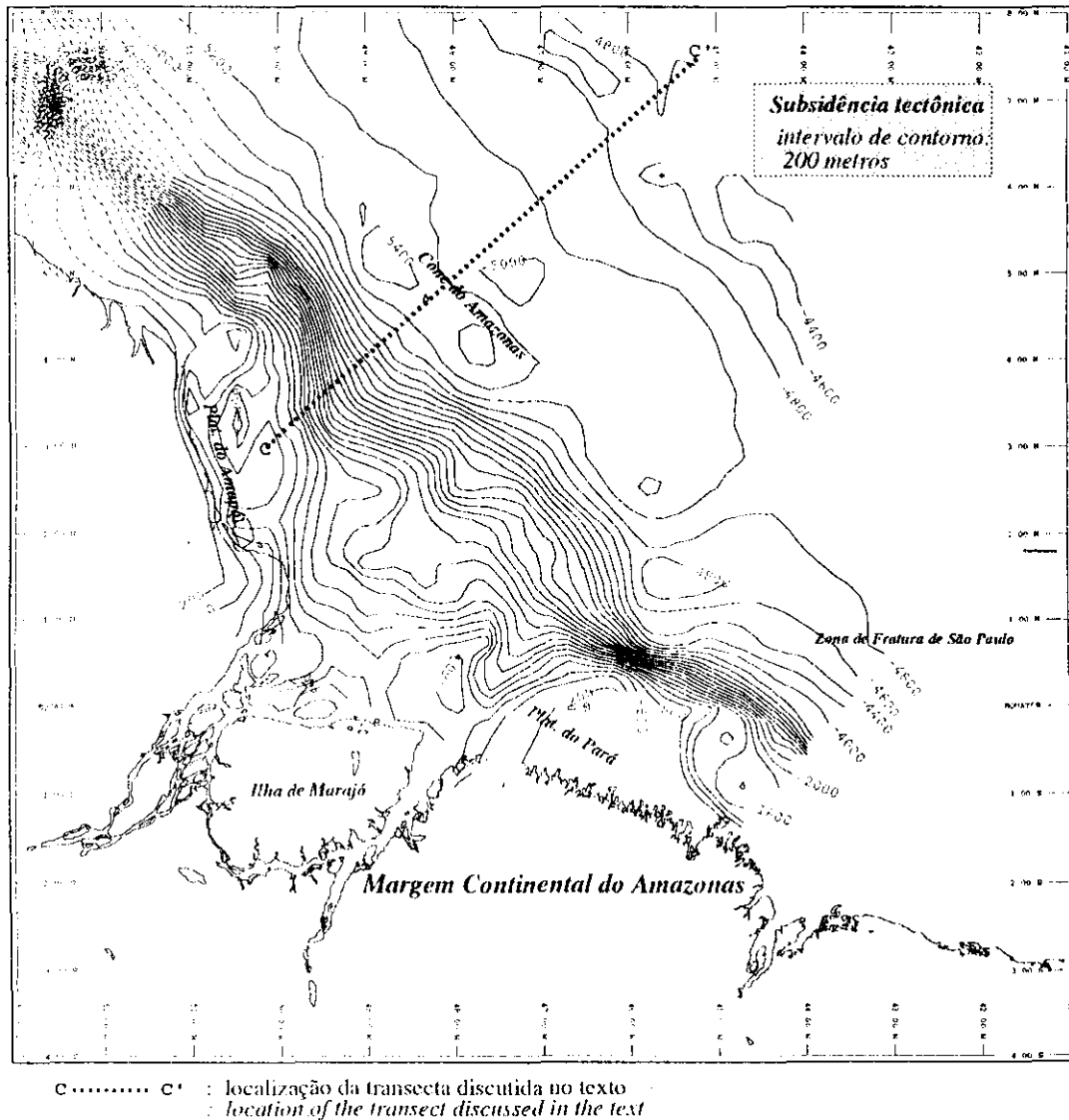


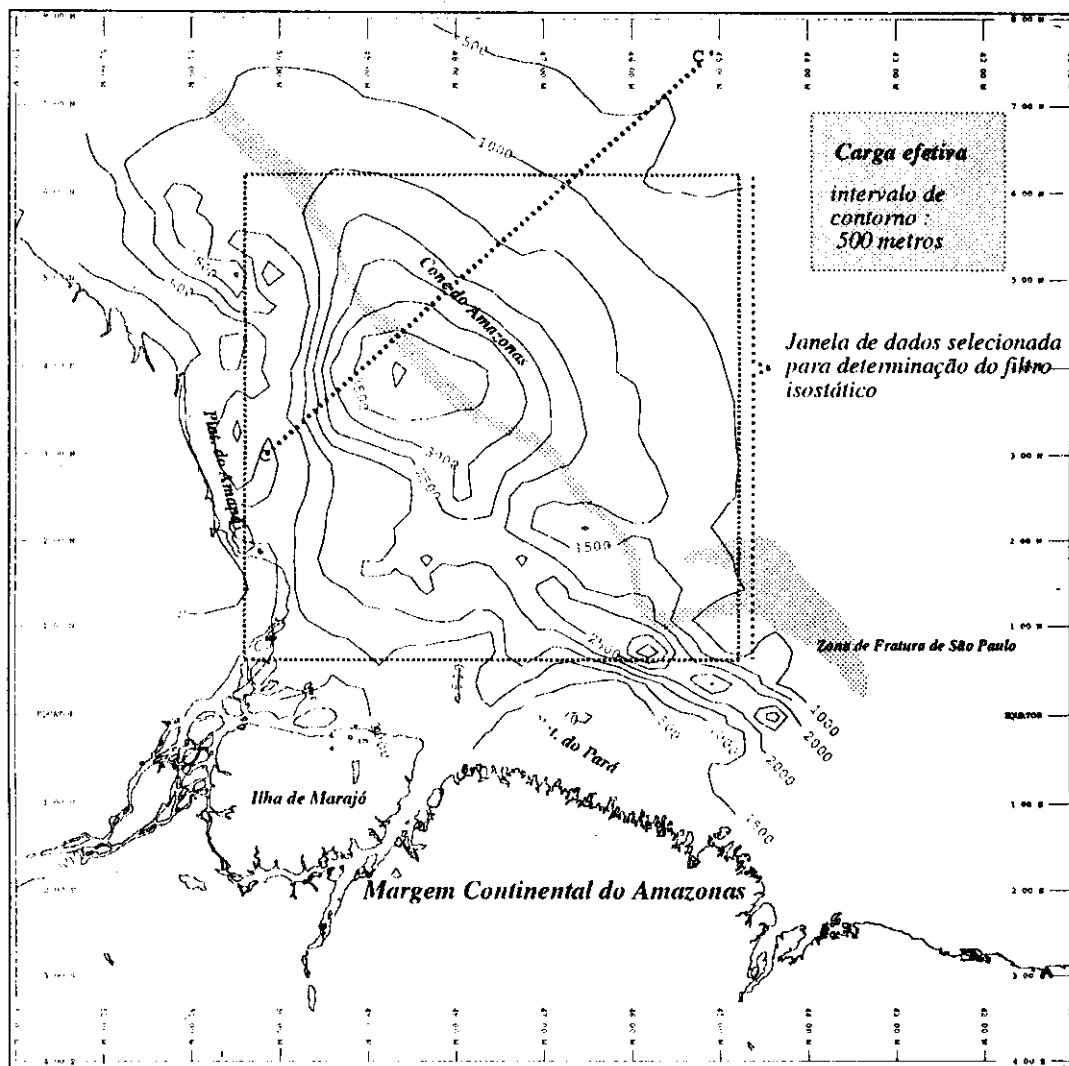
Fig. 4b - Mapa de contorno da subsidiência regional. Subsidiência tectônica.
 Fig. 4b - Contour maps of regional subsidence. Tectonic subsidence.

5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No mapa de subsidiência residual da figura 7 mostra-se a diferença entre a subsidiência regional total estimada e a subsidiência total predita. A componente de subsidiência flexural predita foi computada utilizando-se $T_e = 12$ km. A área sombreada indica as locações com residuais maiores que 1 km. Sob estes locais, o embasamento e a Moho são fracamente vinculados. Esses locais também coincidem com a porção da margem originada por uma forte componente de esforços transtensionais associados à zona de fratura de São Paulo. Conseqüentemente, sob o foco apenas dos dados utilizados neste estudo, torna-se difícil

avaliar se os locais de residuais superiores a 1 km resultam de inadequação do modelo termomecânico simples, ou se estes residuais refletem uma margem de erro de mesma ordem na estimativa do relevo do embasamento. Na figura 8, as componentes de subsidiência preditas são comparadas às componentes estruturais estimadas ao longo da transecta Plataforma do Amapá-Cone do Amazonas (perfil CC' indicado nas figuras de 2 a 5 e 7). Nesta transecta, o embasamento foi interpretado com base em dados sísmicos multicanais (Silva *et al.* 1989) e as profundidades da Moho foram obtidas por meio de modelagem gravimétrica 2-D (Braga, 1991), utilizando-se os dados do Projeto Equant (Ness, 1989). A referida seção crustal coincide com as

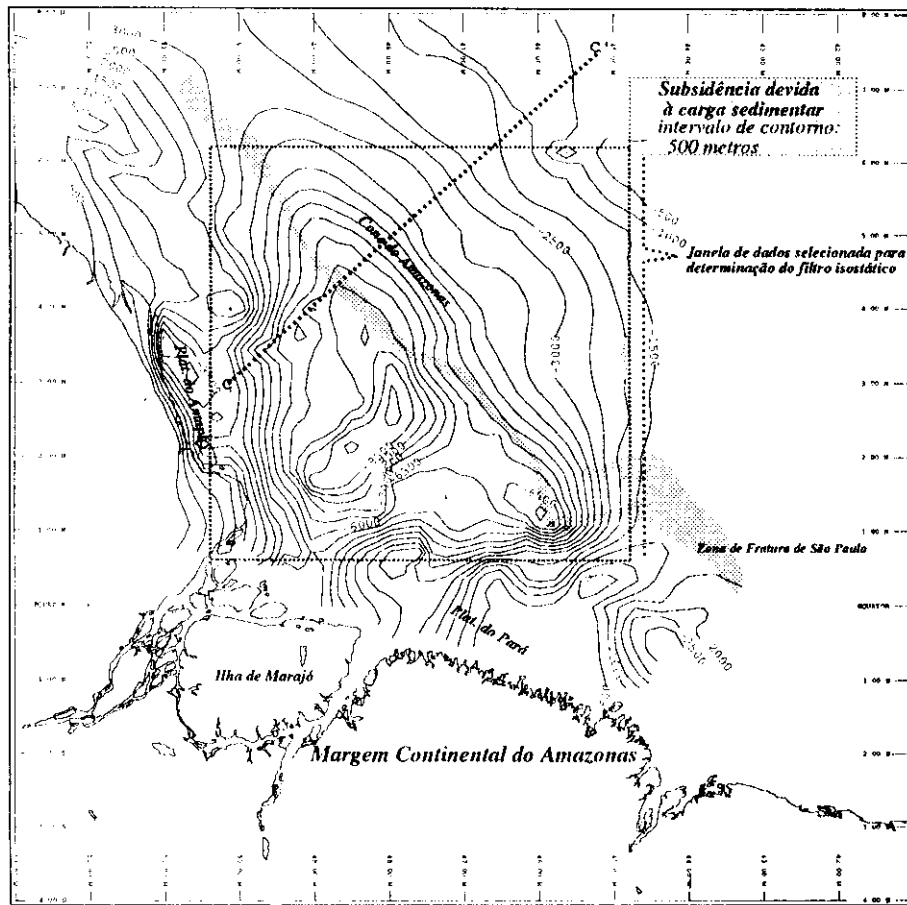
a - Topografia efetiva da carga sedimentar
a - The effective sediment load topography



..... : localização da transecta discutida no texto
: location of the transect discussed in the text

Fig. 5a - Mapa de contorno da topografia efetiva da carga sedimentar.
Fig. 5a - Contour map of effective sediment load topography.

b - Subsidiência devida à carga sedimentar
 b - The sediment load subsidence



c c' : localização da transecta discutida no texto
 : location of the transect discussed in the text

Fig. 5b - Mapa de contorno da componente de subsidiência devida à carga sedimentar.
 Fig. 5b - Contour map of sediment load subsidence.

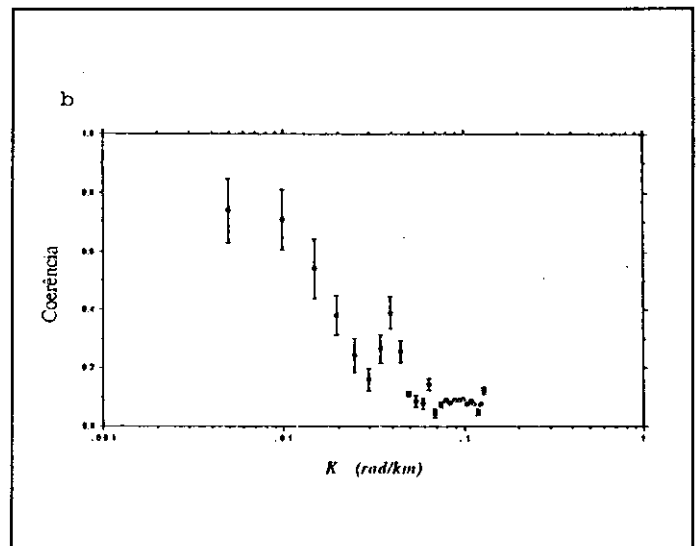
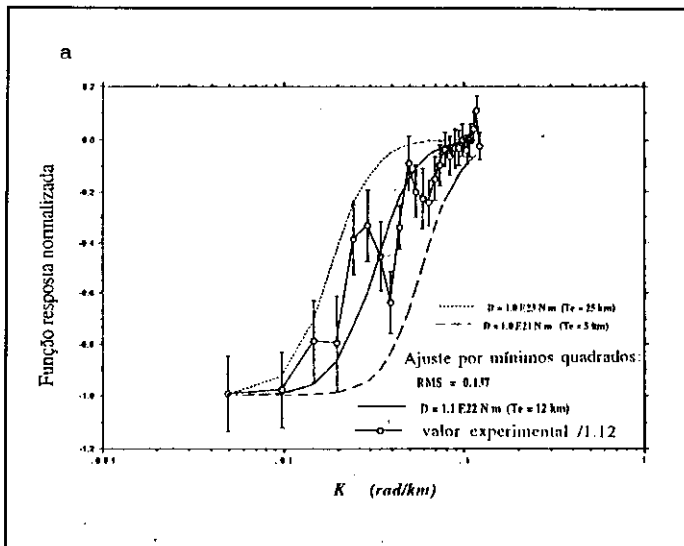


Fig. 6 - Resposta característica do filtro flexural na área do Cone do Amazonas. Os valores experimentais são médias espectrais radiais, obtidos a partir da razão dos espectros bidimensionais da topografia da carga sedimentar e de sua correspondente subsidiência. a) Função resposta normalizada; b) Coerências.

Fig. 6 - Characteristic flexural filter response of lithosphere beneath Amazon Cone area. Experimental values result from the ratio of the radially averaged spectra of sediment load estimates and sediment load subsidence estimates. a) Normalized response function; b) Coherences.

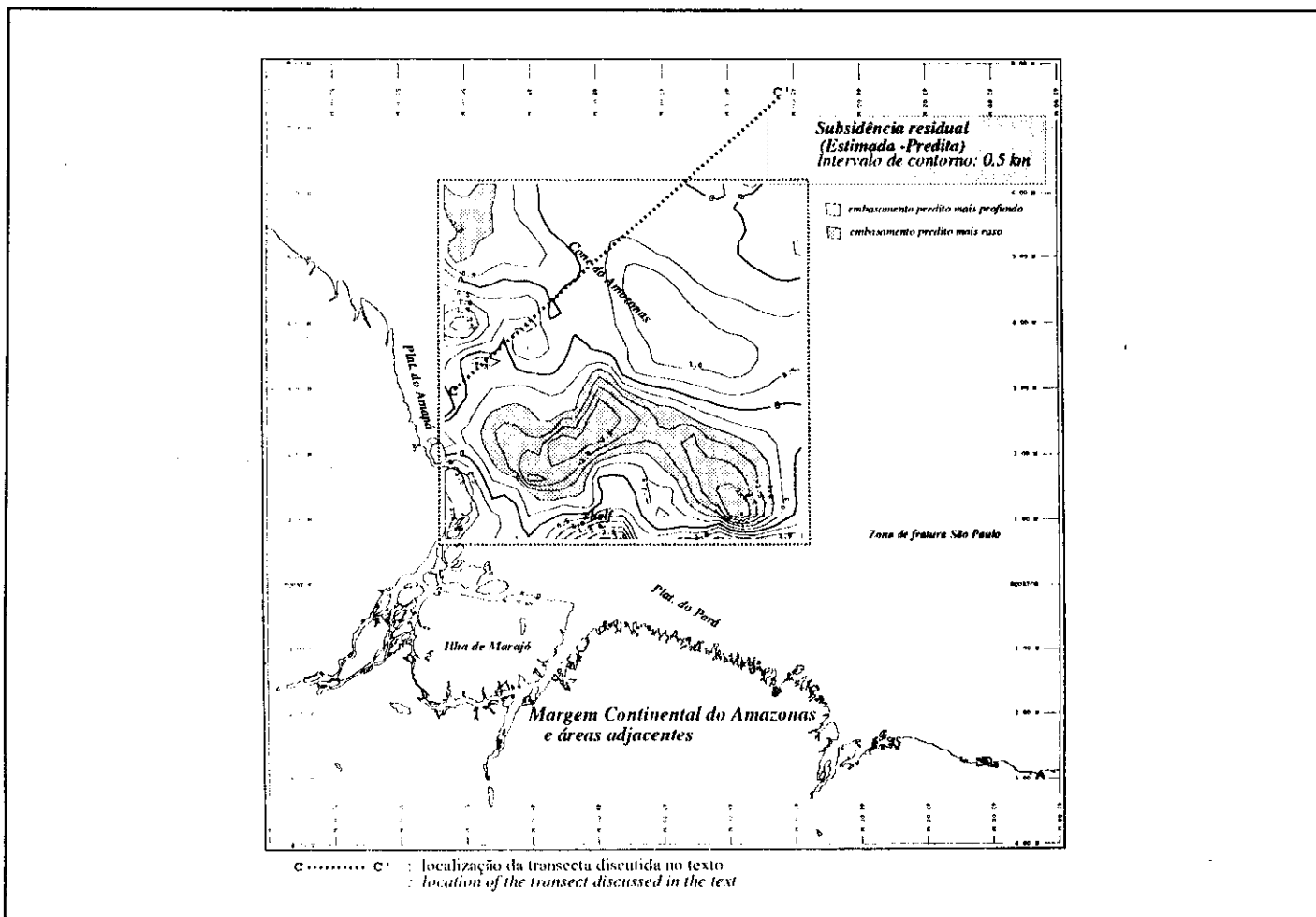


Fig. 7 - Mapa de contorno da subsidência residual. Os residuais representam a diferença entre a subsidência total estimada e a subsidência total predita.

Fig. 7 - Contour map of residual sediment load subsidence. The residuals are the differences between estimated total subsidence and predicted subsidence.

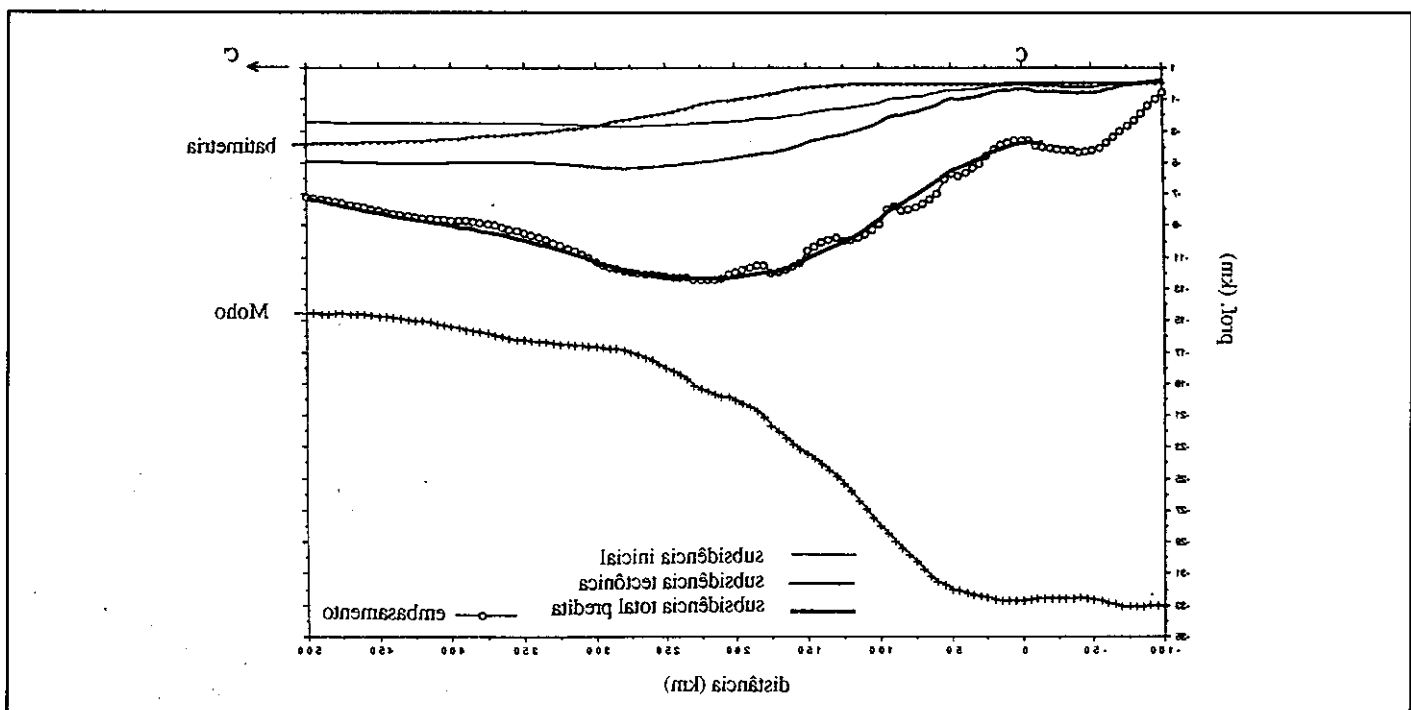


Fig. 8 - Diferentes contribuições à subsidência total, ao longo da transecta CC' (Plataforma do Amapá - Cone do Amazonas).

Fig. 8 - Different contributions to total subsidence along transect CC' (Amapá shelf - Amazon Cone).

localizações de melhor controle estrutural, onde as diferenças relativamente pequenas entre os valores preditos e estimados para a subsidência total validam a combinação do modelo de distensão uniforme, por cisalhamento puro, com o modelo de isostasia flexural.

O fator de normalização de 1.12, indicado na figura 6a, é a amplitude de resposta do filtro isostático correspondente ao número de onda fundamental. Este valor deve estar muito próximo da razão $(\rho_o - \rho_w) / (\rho_m - \rho_o)$ conforme previsto pela equação (11.5), considerando-se a carga sedimentar submersa em água de densidade ρ_w . Admitindo-se uma densidade de 2.20 g/cm³ para a topografia da carga sedimentar, o fator 1.12 implica no valor de 3.24 g/cm³ para a densidade do manto. Estes resultados são compatíveis com a densidade de correção Bouguer e a densidade do manto, obtidos em modelagens de seções crustais (Braga, 1991), na Margem Continental do Amazonas.

6 – DISCUSSÃO FINAL E CONCLUSÕES

O valor T_e , obtido por meio de análises da resposta do filtro isostático, em margens continentais passivas, representa a média temporal das espessuras elásticas da litosfera, associada à sua evolução térmica e aos intervalos de deposição sedimentar nas bacias sobrejacentes. Isto difere do mecanismo instantâneo em que a litosfera oceânica é submetida à carga de um monte submarino. Neste caso, a espessura elástica da litosfera, T_e , obtida por análise, refletirá a sua idade térmica no momento da implantação da carga. Um método proposto por Braga (1991) permite estimar a evolução da litosfera elástica, em margens continentais passivas, a partir do valor médio de T_e , conjugado a informações cronoestratigráficas. A utilização de tal método, com o valor $T_e = 12$ km e as informações cronoestratigráficas providas por Silva *et al.* (1989) e Rodarte e Brandão (1988), permite sumarizar a evolução da litosfera elástica, na área do Cone do Amazonas, na equação aproximada $T_e = 2.05t^{1/2}$. A variável t denota a idade da litosfera desde sua formação, e o fator 2.05 na equação $T_e = Kt^{1/2}$ (Parsons e Sclater, 1977) indica que a isoterma de, aproximadamente, 300 °C exerceu o controle sobre o limite elástico/fluido no compartimento crosta-manto superior. Estes resultados indicam, para a litosfera em estudo, um comportamento reológico intermediário entre as reologias exibidas pelos minerais quartzo e olivina.

AGRADECIMENTOS

À superintendência do Departamento de Exploração da PETROBRÁS pelo estímulo à publicação deste artigo; ao Dr. Gordon Ness pelas valiosas discussões durante a permanência deste autor na O.S.U. (Oregon State University) e aos revisores técnicos por suas sugestões na elaboração final do texto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANKS, R.J., PARKER, R.L., HUESTIS, S.P. *Isostatic compensation on a continental scale: local versus regional mechanisms. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, [s.l.], v. 51, p. 431-452, 1977.
- BENDAT, J.S., PIERSOL, A.G. *Random data: analysis and measurement procedures*. New York: John Wiley, 1986.
- BRAGA, L.F.S., *Isostatic evolution and crustal structures of the Amazon Continental margin determined by admittance analyses and inversion of gravity data*. Oregon: Oregon State University. College of Oceanography, 1991. Tese de Doutorado.
- BUCK, W.R., MARTINEZ, F., STECKLER, M.S., COCHRAN, J.R. Thermal consequences of lithospheric extension: pure and simple. *Tectonics*, Washington, v.7, n.2, p.213-234, 1988.
- CELERIER, B. *Models for the evaluation of the Carolina Trough and their limitation*. Massachussets: Massachussets Intitute of Technology, 1986. Tese de Doutorado.
- McKENZIE, D.P., BOWIN, C. The relationship between bathymetry and gravity in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.81, n.11, p.1903 - 1915, 1976.
- McKENZIE, D.P. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, Amsterdam, v.40, n.1, p.25-32, 1978.
- MUNK, W.H., CARTWRIGHT, S.E. Tidal spectroscopy prediction *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, London, v.A259, p.533-581, 1966.
- NESS, G.E. Project EQUANT a gravity and magnetics study of the Northern Continental Margin of Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 1, Rio de Janeiro, 1989. *Anais*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS / DEPEX / GEPAP, 1989. (abstracts Sn10)
- PARSONS, B., SCLATER, J.G. An analysis of the variation ocean floor bathymetry and heat flow with age. *Journal Geophysical Research*, Washington, v.82, n.5, p.803 - 827, 1977.
- RODARTE, J.B.M., BRANDÃO, J.A.S.L. *Arcabouço estrutural, estratigrafia e perspectivas exploratórias da área de Caciporé, porção nordeste da Bacia da Foz do Amazonas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS / DEPEX / DIRNOE, 1988. Relatório Interno.
- ROYDEN, L., KEEN, C.E. Rifting process and thermal evolution of the Continental Margin of Eastern Canada determined from subsidence curves. *Earth and Planetary Science Letters*, Amsterdam, v.51, n.2, p.343 - 361, 1980.
- SILVA, S. R. P., RODARTE, J. B. M. Bacias da Foz do Amazonas e Pará - Maranhão (águas profundas): uma análise sismoestratigráfica, tectono-sedimentar e térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA 1, Rio de Janeiro, 1989. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS / DEPEX / GEPAP, 1989.
- THERU, A.M., KLITGORD, K.D., SAWYER, D.S., BUFFLER, R.T. Atlantic and Gulf of Mexico continental margins. Boulder: Geological Society of America, 1989. p. 349 - 382 (Geological Society of America Memoir, 172).
- TURCOTTE, D.L., SCHUBERT, G. *Geodynamics: Applications of continuum physics to geological problems*. New York: John Wiley, 1982.
- WALCOTT, R.I. Gravity, flexure and the growth of sedimentary basins at a continental edge. *Geological Society of America Bulletin*, Boulder, v.83, n.2, p. 1845 - 1848, 1972.
- WATTS, A.B. Gravity anomalies, crustal structures and flexure of the lithosphere at the Baltimore Canyon Trhough. *Earth and Planetary Sciencie Letters*, Amsterdam, v. 89, n.2, p. 221 - 238, 1988.

EXPANDED ABSTRACT

The loading response of the lithosphere beneath the Amazon Cone was obtained using the direct relation between estimates of load and flexure (Annex I). The steps involved in computing the loading response filter are shown in the flow chart in Annex II. The parameters used, together with their reference sources, are given in Table I.

McKenzie's one-dimensional uniform-extension model (Annex III) was used to predict tectonic contribution to the total subsidence estimates shown on the map of Figure 1b. The sediment load component was determined by subtracting total subsidence estimates from predicted tectonic subsidence.

Crustal thickness were obtained by subtracting depths to basement from depths to Moho (see fig. 1b and 2).

Crustal stretching factors (β s), defined as the ratio of unstretched to stretched crust, were computed using a 32-km-thick unstretched crust as reference (see fig. 3). The crust was treated as homogeneous within the limits of the area selected for analysis, and therefore the entire crust was assumed to follow the same thermal predictions. The thermal parameters of subsidence were chosen based on previous work concerning Atlantic-type continental margins. The resulting prediction for tectonic subsidence beneath the Amazon Cone area is shown in the map of Figure 4b. Loading subsidence (W_{Load}) is the difference between the total subsidence estimate (S_{Total}) and predicted tectonic subsidence, that is:

$$W_{Load} = S_{Total} - Z_t(T, \beta),$$
 where T and S_{Total} are the present-day age and depth to basement.

By subtracting present-day bathymetry (H_b) from predicted tectonic subsidence, sediment load (H_{Load}) is then estimated, that is:

$$H_{Load} = Z_t(T, \beta) - H_b$$

Because the history of sediment deposition is not intrinsically modeled in this approach, measured load is referred to as effective load in Figure 5a. Sediment load subsidence is shown on the map of Figure 5b.

A similar approach for determining load and flexure was used by Walcott (1972) and Watts (1988). These studies, however, did not consider the thermal contribution to total subsidence, which may affect both amplitude ratio and phase relation of load and flexure. Sediment load topography (fig. 5a) and basement flexure (fig. 5b) were Fourier transformed to produce the characteristic filter response shown in Figure 6a. Flexural rigidity and its corresponding T_e were then obtained by least squares fitting of the filter estimates to

the elastic lithosphere model presented in Annex I. The analysis yielded an elastic thickness estimate of 12 km ($D = 1.1 \times 10^{22}$ N.m). This time-average estimate was used together with Parsons and Sclater's cooling plate model (1977) and with the chronostratigraphic constraints provided by Silva and Rodarte (1989) to estimate the time evolution of the elastic lithosphere beneath the Amazon Cone area. By correcting this value for sediment load history, as proposed by Braga (1991), the present-day effective elastic thickness of the lithosphere beneath the Amazon Cone is estimated to be about 20 km. The best-fit flexural response ($T_e = 12$ km), plotted in Figure 6a, clearly underestimates the experimental response at wave numbers in the $0.005 < k < 0.03$ range. These relatively long-wavelength flexures dominate the central portion of the Amazon Cone and seem to require an elastic lithosphere in the 12-25 kilometer range. In the southeast sector, where relatively short wavelengths occur, a thinner elastic lithosphere ($T_e < 12$ km) seems to fit the estimates best. Grabens and strike-slip faults occurring in this sector may explain a decrease in the strength of the lithosphere caused by dissipation of vertical stresses.

The residual map of Figure 7 shows the difference between estimated total subsidence and predicted total subsidence. The predicted flexural component of subsidence was computed with $T_e = 12$ kilometers. The shaded area on the map indicates locations where residuals are larger than one kilometer. Beneath these locations, the basement and Moho are poorly constrained. They also coincide with the portion of the margin dominated by transcurrent faulting. It is thus difficult to determine whether these large residuals result from inadequacies of the simple thermo-mechanical model or from relatively large errors in basement estimates. In Figure 8, predicted subsidence components are compared with structural component estimates along the Amapa shelf-Amazon Cone transect. This transect coincides with the best-constrained structural locations, where the relatively small difference between predicted and estimated total subsidence seems to validate the combination of the pure-shear uniform-extension model with flexural isostasy.

The value of T_e , determined from the direct relation between load and flexure in the Amazon Cone, is not affected by uncertainties in depth of compensation, as commonly occurs in flexural isostasy analysis based on gravity and bathymetry data.

ANEXO I / ANNEX I

FILTRO ISOSTÁTICO FLEXURAL: MODELO E TÉCNICA

FLEXURAL ISOSTATIC FILTER: MODEL AND TECHNIQUE

A equação que governa o equilíbrio de uma placa elástica fina, sujeita a pequenas deformações, e na ausência de forças horizontais, (Banks *et al.* 1977; Turcotte e Schubert, 1982), é dada por:

$$D \cdot \nabla^4 w(\mathbf{r}) = q(\mathbf{r}) \quad (1.1)$$

D é a rigidez flexural da placa elástica, que pode ser expressa em termos de sua espessura efetiva, T_e , seu Módulo de Young, E , e sua Razão de Poisson, σ , por meio da equação:

$$D = \frac{ET_e^3}{12(1-\sigma^2)}$$

$E = 0.75 \times 10^{11}$ Pa, e $\sigma = 0.25$ são os valores adotados neste estudo.

$w(\mathbf{r})$ é a deflexão da placa, medida positivamente para cima; \mathbf{r} é o vetor de posição $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y)$; $q(\mathbf{r})$ é a força por unidade de área exercida sobre a placa, a qual resulta de duas componentes: o peso da carga topográfica $h_o(\mathbf{r})$ com densidade ρ_o , e a força de empuxo atuante sobre a base da placa, causada pelo deslocamento de massa da astenosfera de densidade ρ_m . Isto é:

$$q(\mathbf{r}) = -\rho_o g h_o(\mathbf{r}) - \rho_m g w(\mathbf{r}) \quad (1.2)$$

g é o valor médio de gravidade, 9.8 m/s²

A topografia da carga, $h_o(\mathbf{r})$, adicionada à deformação da placa, $w(\mathbf{r})$, constitui a topografia medida $h(\mathbf{r})$:

$$h(\mathbf{r}) = h_o(\mathbf{r}) + w(\mathbf{r}) \quad (1.3)$$

A solução da equação (1.1) pode ser obtida por transformação de Fourier das equações (1.1), (1.2) e (1.3), de modo a produzir:

$$(2\pi k)^4 DW(\mathbf{k}) = -\rho_o g H_o(\mathbf{k}) - \rho_m g W(\mathbf{k}) \quad (1.4)$$

Transformando-se a equação (1.3) para o domínio dos números de onda e substituindo-a na equação 1.4, determina-se a relação entre a deformação ou flexura $W(\mathbf{k})$ e a topografia medida $H(\mathbf{k})$:

$$W(\mathbf{k}) = - \left(\frac{\rho_o}{\rho_m - \rho_o} \right) \left(1 + \frac{16\pi^4 k^4 D}{(\rho_m - \rho_o)g} \right)^{-1} H(\mathbf{k}) \quad (1.5)$$

Para cargas submersas em água de densidade ρ_w , a densidade ρ_o deve ser substituída pela densidade efetiva $\rho_o - \rho_w$. Reescrevendo-se a equação (1.5) na forma:

$$W(\mathbf{k}) = F(\mathbf{k}) \cdot H(\mathbf{k})$$

obtém-se a equação, no domínio dos números de onda, de um filtro linear $F(\mathbf{k})$ dado pela expressão:

$$F(\mathbf{k}) = - \left(\frac{\rho_o}{\rho_m - \rho_o} \right) \left(1 + \frac{16\pi^4 k^4 D}{(\rho_m - \rho_o)g} \right)^{-1} \quad (1.6)$$

$F(\mathbf{k})$ é a resposta do filtro isostático flexural que depende da rigidez flexural e das densidades subjacentes e sobrejacentes à placa elástica.

A técnica utilizada para obtenção do filtro experimental $F(k)$ consistiu no cálculo da razão entre o espectro cruzado $W(k) H^*(k)$ e o autoespectro $H(k) H^*(k)$ (McKenzie e Bowin, 1976), onde o símbolo * denota o complexo conjugado. Isto é:

$$F(k) = \frac{\langle W(k) H^*(k) \rangle}{\langle H(k) H^*(k) \rangle} \quad (1.7)$$

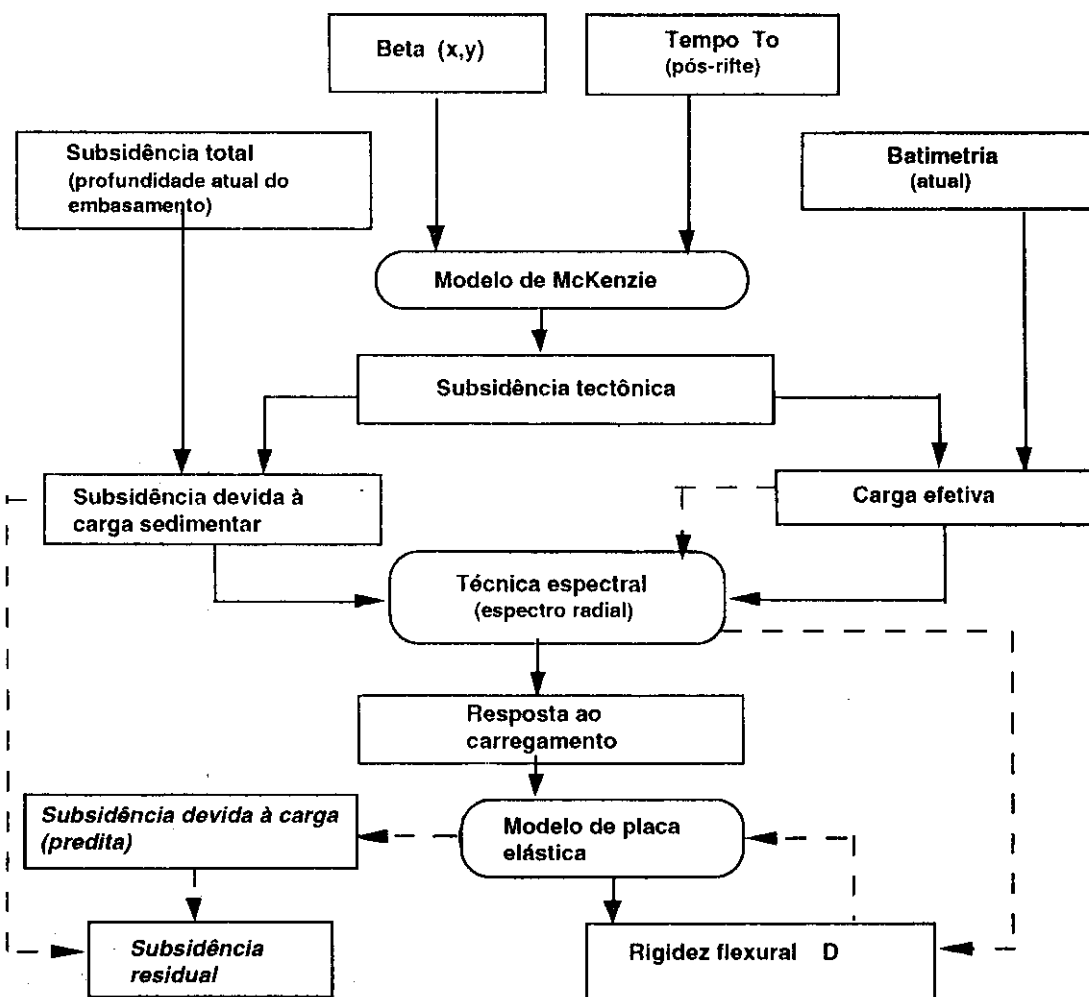
O símbolo " $\langle \rangle$ " denota a média radial do espectro bidimensional, computada dentro de anéis com largura Δk . Este procedimento torna F uma função do escalar k ($k^2 = k_x^2 + k_y^2$) em lugar de k , reduzindo assim o ruído, que não é esperado apresentar coerência azimutal.

As coerências foram determinadas utilizando-se o estimador proposto por Munk e Cartwright (1966), e as variações de F foram determinadas utilizando-se as equações de Bendat e Piersol (1986).

ANEXO II / ANNEX II

COMPUTAÇÃO DA RIGIDEZ FLEXURAL UTILIZANDO ESTIMATIVAS DA CARGA SEDIMENTAR E FLEXURA DO EMBASAMENTO

COMPUTATION OF FLEXURAL RIGIDITY USING ESTIMATES OF SEDIMENT LOAD AND BASEMENT FLEXURE



ANEXO III / ANNEX III

EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO TÉRMICO DE DISTENSÃO UNIFORME

BASIC EQUATIONS OF THE UNIFORM-EXTENSION THERMAL MODEL

As equações básicas, utilizadas na estimativa das diferentes componentes de subsidência (McKenzie, 1978; Celerier, 1986), são apresentadas a seguir. O significado dos parâmetros encontra-se na tabela I.

- **Subsidência inicial.** Admite-se ocorrer isostasia local antes e imediatamente após o rifteamento. A elevação $Z(\beta)$ de uma coluna distendida por uma quantidade β é computada por comparação com uma crosta continental de referência, não distendida ($\beta=1$) com elevação $Z(1)$.

$$Z(\beta) = \frac{\rho_a - \delta(Z(1))}{\rho_a - \delta(Z(\beta))} Z(1) + \frac{\rho_a h_1 - \bar{\rho}_c h_c - \bar{\rho}_m (h_1 - h_c)}{\rho_a - \delta(Z(\beta))} \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{III.1})$$

δ é definido tal que, para elevações abaixo do nível do mar ($Z > 0$) $\delta(Z) = \rho_w$, e para elevações acima do nível do mar ($Z \leq 0$) $\delta(Z) = 0$.

- **Subsidência térmica.** A subsidência térmica, S_t , é função do tempo após o estiramento crustal, t , e do fator de estiramento β .

$$S_t(t, \beta) = E_t \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \frac{\beta}{\pi} \sin\left[(2m+1)\frac{\pi}{\beta}\right] \left[1 - \exp\left(- (2m+1)\frac{2t}{\tau}\right)\right] \quad (\text{III.2})$$

onde:

$$E_1 = \frac{h_1 \rho_m(0) \alpha T_a}{\rho_m(0) - \rho_w} \cdot \frac{1}{2}$$

$$\tau = \frac{h_1^2}{\pi^2 \kappa}$$

- **Subsidência tectônica.** A subsidência tectônica é então obtida somando-se a subsidência inicial à subsidência térmica, ou seja:

$$Z_t(t, \beta) = Z(\beta) + S_t(t, \beta) \quad (\text{III.3})$$