



## Espessura da Crosta da Província Borborema, da Área Oceânica Adjacente e do Norte do Cráton do São Francisco Estimada por Inversão com o Vínculo de Isostasia

Roberto Gusmão de Oliveira – CPRM - Serviço Geológico do Brasil

Walter Eugênio de Medeiros – DGEF/CCET/UFRN

Copyright 2009, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent 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

The Borborema Province (**BP**) is a geologic domain located in Northeastern Brazil. The **BP** is limited at the south by the São Francisco craton, at the west by the Parnaíba basin, and both at the north and east by coastal sedimentary basins and oceanic crust. Using the conventional elastic flexural model to isostasy, an inversion of crust thickness was performed. It was identified two regions in **BP** where the crust is thickened: one below the Borborema plateau (associated to an uplifting in the Cenozoic) and the other one along the Sobral-Pedro II shear zone, beneath the Santa Quitéria magmatic arc (a residue associated to the Brasiliano orogenesis). On the other hand, along the Cariri-Potiguar trend, the crust is thinned due to an aborted rifting in the Cretaceous. The results were good when confronted with inversion of teleseismic receiver function data. However, are only reasonable when compared with depth seismic data interpretation. Because the parameters of the inversion are much more suitable for the lithosphere of the **BP**, the thickness of the crust calculated for the northern São Francisco craton has been underestimated, and the thickness of the oceanic crust that surrounds the **BP** has been overestimated.

### Introdução

A espessura da crosta da Província Borborema, do norte do Cráton do São Francisco e da área oceânica adjacente (Figura 1) foi estimada por meio de um método de inversão que incorpora o vínculo de isostasia. Os resultados obtidos são comparados com estimativas baseadas no processamento de dados telessísmicos e interpretação de sísmica profunda.

O afinamento da crosta na margem continental da Província Borborema é a marca mais expressiva deixada pela separação do Supercontinente Pangea nos dados gravimétricos. Esse afinamento tem correlação com a forma topográfica-batimétrica da margem continental (Figura 1). Outro aspecto expressivo nos dados gravimétricos é a anomalia que define a zona de sutura entre a Província Borborema e a paleoplaca Sanfranciscana. Com a estabilização isostática, após a Orogênese Brasileira, a crosta da Província Borborema deve ter sofrido um forte afinamento em relação à crosta do Cráton São Francisco, que faz parte de uma litosfera

mais antiga e por isso mais estável e resistente. Além desses eventos geológicos, que afetaram a intensidade e a forma da carga topográfica na litosfera da Província Borborema, destaca-se o rifteamento intracontinental no Cretáceo, ao longo do *trend* Cariri Potiguar, e o importante soerguimento topográfico no Cenozóico, representado atualmente pelo Planalto da Borborema. Os resultados dos cálculos obtidos com este trabalho permitiram a realização de uma série observações sobre a forma da descontinuidade de *Moho*, e da sua correlação com as feições topográficas-batimétricas.

### Contexto Geotectônico

A Província Borborema é um domínio geológico-estrutural localizado no Nordeste Oriental do Brasil, limitado a sul pelo Cráton do São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias sedimentares da margem costeira (Almeida *et al.* 1977) (Figura 1). O seu arcabouço tectônico foi estruturado durante a Orogênese Brasileira (em torno de 0,6 Ga) no final do Neoproterozóico. No Mesozóico, ocorreu a separação do Supercontinente Pangea, que formou a margem continental e as bacias interiores e marginais. Após a separação entre a América do Sul e a África, já na fase de deriva continental, dois importantes eventos ocorreram no Cenozóico: o Vulcanismo Macau e o soerguimento do Planalto da Borborema.

### Dados Topográficos e Gravimétricos

O banco de dados gravimétricos da área continental utilizado neste trabalho foi construído a partir de informações originadas em várias organizações de pesquisa (UFRN/UFGA/UFOP, PETROBRÁS/ANP, CPRM/DNPM/ON, UFPE, USP e IBGE). Na área oceânica foram empregados dados processados dos satélites altimétricos GEOSAT e ERS-1 (Sandwell & Smith 1997). A interpolação da anomalia Bouguer em uma malha de 10 km x 10 km está apresentada na Figura 1. Os dados topográficos foram obtidos do SRTM (no continente), e dos satélites altimétricos GEOSAT e ERS-1 no oceano (Sandwell & Smith 1997). Os dados foram interpolados e estão apresentados na Figura 1.

### Metodologia e Parâmetros da Inversão

A metodologia aplicada na estimativa da espessura da crosta da Província Borborema tem por base o modelo isostático flexural de Banks *et al.* (1977). Nesse modelo, a litosfera é considerada uma placa elástica fina, lateralmente homogênea, superposta sobre um fluido viscoso (a astenosfera). As hipóteses básicas do modelo de inversão são:

1) a crosta está em equilíbrio isostático com os seus carregamentos (topografia e batimetria);

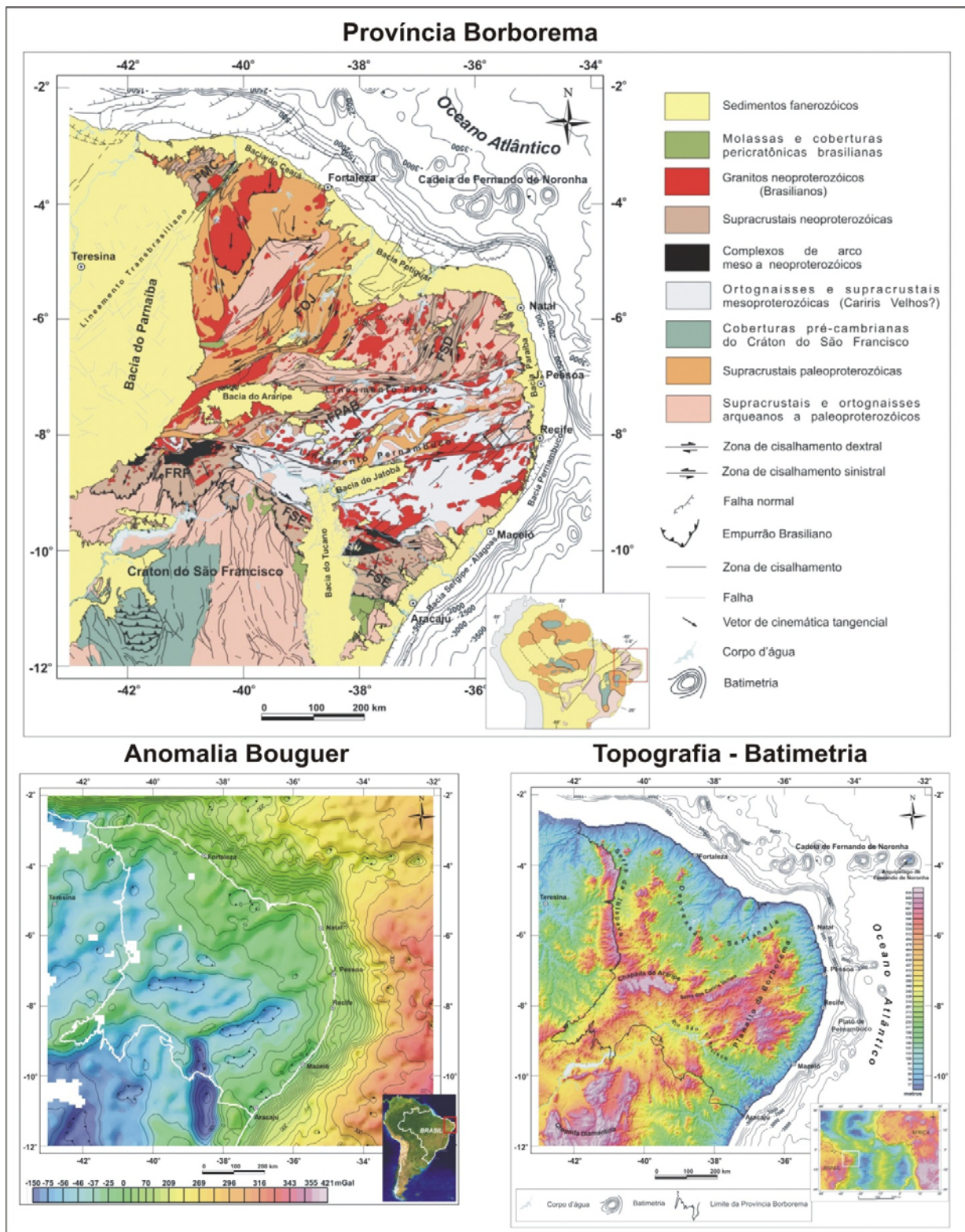


Figura 1: Geologia, anomalia Bouguer e topografia-batimetria da Província Borborema, da área oceânica adjacente e do norte do Cráton do São Francisco.

II) o carregamento ocorre apenas no topo da crosta (a topografia);

III) a superfície de compensação do carregamento no topo é a descontinuidade de *Moho* (interface crosta-manto); e

IV) as propriedades elásticas da litosfera não variam lateralmente.

Os resultados das modelagens isostáticas apresentadas por Oliveira (2008) demonstraram que as condições do modelo de Banks *et al.* (1977) têm uma validade restrita quando são consideradas as complexidades isostáticas da Província Borborema. Segundo Oliveira (2008), além dos dados sismológicos e de fluxo térmico que sugerem a existência de desequilíbrios isostáticos, também ocorre uma combinação de carregamentos no topo e na base da crosta, em que a razão entre esses carregamentos é igual a 15. Adicionalmente, a superfície de compensação do carregamento no topo parece ser mais rasa que a *Moho*, ou ter uma transição de densidade larga entre a crosta com densidade normal e o manto litosférico. Bem como, as propriedades elásticas da litosfera variam lateralmente.

Na impossibilidade de empregar modelos mais realísticos, o método de Banks *et al.* (1977) foi utilizado com as devidas precauções e com o conhecimento das limitações de seus resultados.

O método de inversão incorpora o vínculo de suavidade, ou seja, supõe a priori que a interface crosta-manto varia espacialmente de forma suave. A solução da equação da placa elástica foi realizada com os seguintes parâmetros: i) densidade da crosta = 2,80 g/cm<sup>3</sup>; ii) densidade do manto = 3,30 g/cm<sup>3</sup>; iii) espessura elástica efetiva ( $T_e$ ) = 25 km; e iv) profundidade de compensação = 30 km.

O valor da  $T_e$  (25 km) é a estimativa máxima para toda a província, quando se considera um modelo isostático com carregamentos combinados no topo e na base, com taxa de carregamento -  $f_l = 1$ . Segundo Oliveira (2008), esse valor de  $T_e$  é semelhante à estimativa da litosfera oceânica da região da Ilha de Fernando de Noronha, porém, ao longo da margem continental corresponde aos valores máximos estimados. No norte do Cráton do São Francisco, o valor escolhido subestima o cálculo de  $T_e = 40$  km efetuada por Ussami (1999).

### Resultados Obtidos e Discussões

Os resultados obtidos com o emprego do método de inversão de Banks *et al.* (1977) estão apresentados na Figura 2. A estimativa máxima para espessura da crosta da Província Borborema é 33,5 km na região do Planalto da Borborema, que foi soerguido no Cenozóico, e tem correlação espacial com uma expressiva anomalia positiva da superfície do geóide. Destaca-se também a região da província que bordejia a Bacia do Parnaíba, onde a descontinuidade de *Moho* atinge profundidades em torno de 32,5 km. Esse espessamento é controlado a oeste pela Zona de Cisalhamento Sobral - Pedro II (Lineamento Transbrasiliiano), e corresponde ao arco magmático de Santa Quitéria no Domínio Ceará. Portanto, esse pequeno espessamento é um resíduo

vestigial de um expressivo espessamento da crosta ocorrido na Orogênese Brasileira. Um espessamento localizado é observado na região da Bacia do Araripe (Figura 2). Como a área dessa bacia está em parte correlacionada com a topografia elevada da Chapada do Araripe, esse resultado pode ser apenas uma consequência das premissas da modelagem, em que as massas topográficas são compensadas na *Moho*. Adicionalmente, não existe do ponto de vista geológico, uma razão adequada para se esperar espessamento da crosta abaixo da Bacia do Araripe.

Entre as duas principais regiões de espessamento da crosta, descritas acima, ocorre uma região de afinamento correlacionada com o prolongamento da direção do Rifte Potiguar no interior do continente segundo o *Trend* Cariri-Potiguar (Figura 2). Entretanto, a correlação é melhor com os limites da Depressão Sertaneja do que com uma possível estrutura alongada de direção NE-SW associada com o *Trend* Cariri Potiguar. Novamente, as premissas da modelagem influenciaram na resposta da modelagem que indica um afinamento da crosta onde existe uma depressão topográfica. Contudo, Castro *et al.* (1997) sugeriram um afinamento da crosta na região do *Trend* Cariri-Potiguar, que é consistente com os eventos tectônicos de rifteamento que ocorreram nessa região no Cretáceo. Os resultados tiveram como vínculo a informação da interpretação de sísmica profunda efetuada por Matos (1989), que indica a crosta com espessura de 28 km na região do Rifte Potiguar. Também é clara a existência de uma anomalia Bouguer positiva de grande comprimento de onda associada com o *Trend* Cariri-Potiguar. Esses dois fatos são bastante convincentes, e inegavelmente permitem a perspectiva da existência de um afinamento da crosta nessa região. Entretanto, se o afinamento está associado com o rifteamento da crosta no Cretáceo, ele deveria ser mais alongado. Nesse sentido, observa-se que a correlação mais forte das isolinhas de espessura é com a feição topográfica da Depressão Sertaneja (Figura 2). Por outro lado, a inversão de dados de anomalia Bouguer (que emprega diretamente o vínculo de suavidade em vez do de isostasia) efetuada por Castro *et al.* (1997) apresenta um resultado em que as isolinhas de espessura da crosta estão mais concentradas na direção NE-SW e, portanto, melhoram a caracterização de um afinamento segundo o *Trend* Cariri-Potiguar. Os resultados de Castro *et al.* (1997) também são mais adequados para o caso do espessamento da crosta na região do noroeste do Ceará, onde as isolinhas de espessura têm uma correlação melhor com as zonas de cisalhamento. Infelizmente, neste trabalho, não foi adequado o emprego do vínculo de suavidade para toda província, por causa da forte influência das bacias sedimentares interiores na anomalia Bouguer, sobretudo na região ao sul da Latitude 7°S. Nos resultados apresentados na Figura 2, a feição mais marcante é o forte afinamento da crosta no sentido do oceano, com variação de aproximadamente 30 km na crosta continental para 10 km na crosta oceânica. Observa-se que as margens continentais Leste e Equatorial apresentam gradientes de afinamentos diferentes.



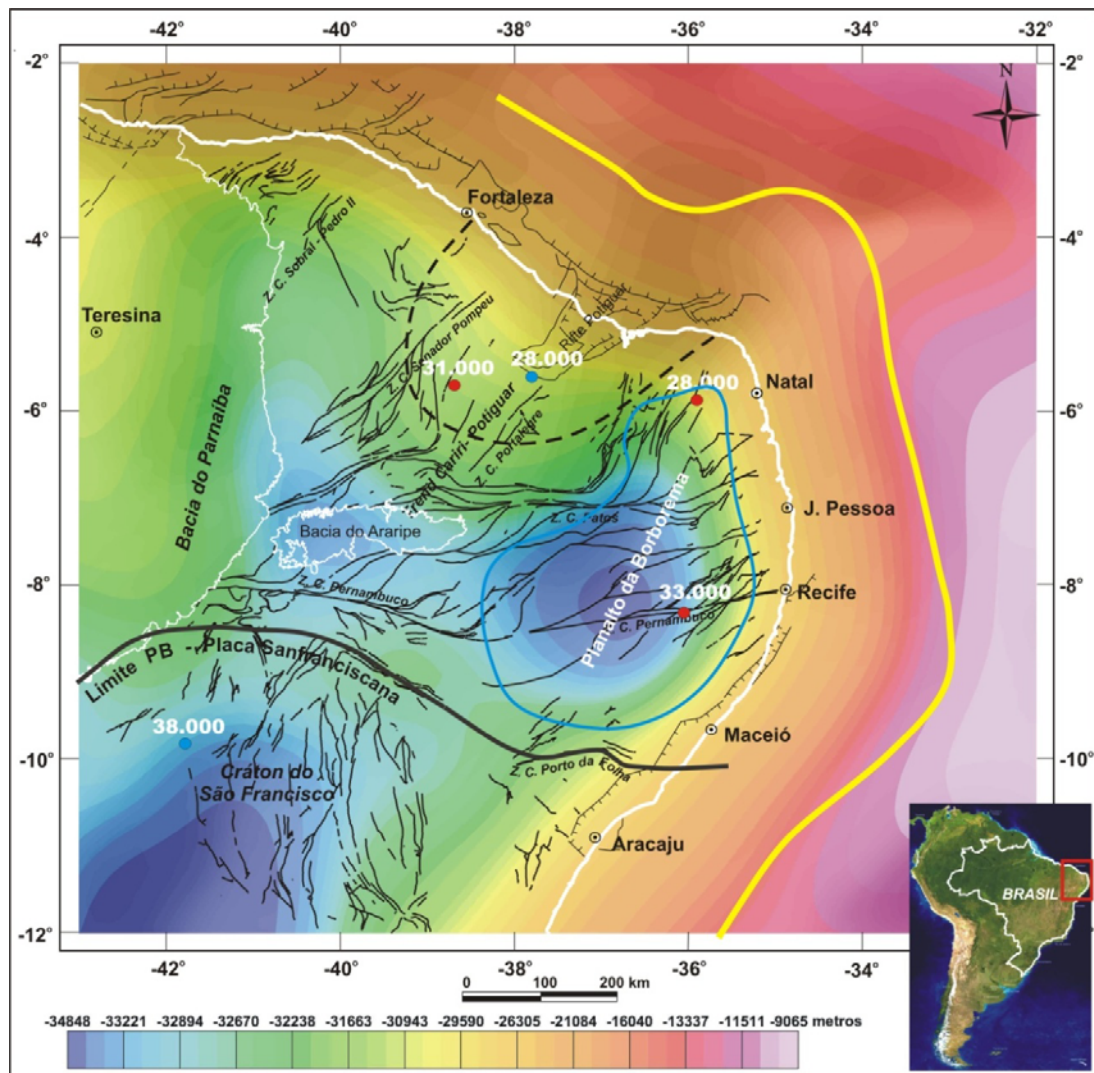


Figura 2: Espessura da crosta da Província Borborema, da margem continental adjacente e do norte do Cráton do São Francisco, com superposição das principais estruturas tectônicas. O traço amarelo é o limite inferido para a interface crosta continental - crosta oceânica (Oliveira 2008). O traço azul contínuo é o limite do Planalto da Borborema. O traço preto descontínuo é o limite da Depressão Sertaneja. A linha de sutura colisional entre a PB e a Placa Sanfranciscana está indicada.

O gradiente da Margem Leste é maior, e a razão mais provável está nas diferenças de estilo de abertura. A Margem Leste, com uma abertura em estilo típico de margem passiva, enquanto na Margem Leste a tectônica foi transcorrente/transtrativa. Entretanto, possivelmente esses gradientes estejam subestimados por causa da escolha de uma profundidade única de compensação (30 km) para a área oceânica e continental. Apesar de se esperar que a justaposição da crosta oceânica com a crosta continental apresente equilíbrio isostático e, portanto, deveriam ter a mesma profundidade de compensação, o resultado da inversão na crosta oceânica é muito influenciado pela escolha de uma profundidade de compensação mais adequada para o continente. Assim, os valores da espessura da crosta oceânica devem estar superestimados. O mesmo, porém

de forma inversa, deve ocorrer com a estimativa para a espessura da crosta do Cráton do São Francisco. Nesse caso, as espessuras devem estar subestimadas, pois a profundidade de compensação mais adequada para o cráton (litosfera mais espessa e maior tempo de estabilidade) deve ser maior do que a da província (litosfera mais fina e menor tempo de estabilidade). Entretanto, apesar disso, os resultados demonstram claramente que a crosta do cráton é mais espessa que a da província. A região limite entre as duas crostas está bem marcada pela linha de sutura colisional entre a Província Borborema e a Placa Sanfranciscana (Figura 2), interpretada por Oliveira (2008).

Na Figura 2, os pontos azuis correspondem às estimativas de espessuras da crosta obtidas por meio de sísmica profunda (Berrocal *et al.* 1989, no Cráton do São

Francisco; e Matos 1989, na Província Borborema, região do Rifte Potiguar). Os pontos vermelhos correspondem às estimativas de espessuras obtidas por meio do processamento de dados telessísmicos (França *et al.* 2006, função do receptor). A comparação desses dados com os resultados da inversão é boa, pelo menos quando se consideram as espessuras estimadas por meio da função do receptor. Em dois casos a diferença é menor do que 0,5 km. No terceiro (canto nordeste da província) a diferença chega a 3,0 km. Essa também é a discrepância que ocorre com a estimativa de espessura efetuada por sísmica profunda na região do Rifte Potiguar. No Cráton do São Francisco, a discrepância é maior e chega a 5,0 km. Nesse último caso, o motivo pode estar nos parâmetros empregados na inversão, que são mais adequados às características da litosfera da província do que da litosfera do cráton.

Um produto adicional da inversão são os mapas gravimétricos das componentes regional e residual isostáticas (figuras 3 e 4). A componente regional, gerada pela interface de separação de dois meios homogêneos (crosta e manto), foi calculada por meio do algoritmo de Parker (1972). Essa componente é caracterizada por anomalias de grandes componentes de onda, e tem a mesma configuração que a variação de profundidade da interface crosta-manto. A componente residual isostática é mais complexa, pois está associada com feições geológicas da crosta que produzem anomalias com comprimentos de onda pequenos e médios. Ela é muito semelhante, em configuração, ao mapa residual da anomalia Bouguer (filtro gaussiano, comprimento de onda = 300 km, Oliveira (2008)), e retrata muito bem as principais correlações geológicas. Porém, o mapa de anomalias isostáticas residuais destaca com mais ênfase uma anomalia positiva na região do *Trend Cariri-Potiguar*, aparentemente associada com fontes densas colocadas na crosta no período Mesozóico-Cenozóico (A na Figura 4).

### Conclusões

As estimativas das espessuras da crosta apresentadas acima indicam que existem duas regiões de espessamento na crosta da província: a primeira na região do Planalto da Borborema (33,5 km) e a segunda na região do Domínio Ceará, que corresponde ao arco magmático de Santa Quitéria (32,5 km). A primeira representa uma raiz da crosta, associada ao soerguimento do Planalto da Borborema desde o Cenozóico. A segunda é um registro vestigial da colisão entre a Província Borborema e o Cráton Oeste-Africano durante a Orogênese Pan-Africana - Brasileira, que causou espessamento da crosta ao longo da Zona de Cisalhamento Sobral - Pedro II (Lineamento Transbrasiliense). Na região do *Trend Cariri-Potiguar*, localizada entre essas duas regiões de espessamento, ocorre um afinamento que representa o registro no interior do continente de um rifteamento cretáceo abortado. Em evento simultâneo, ou posterior a esse afinamento, ocorreu também a intrusão de rochas densas no interior da crosta. Na crosta oceânica observa-se que o gradiente de afinamento da Margem Leste é maior do que o da Margem Equatorial. Isso decorre da diferença de estilos tectônicos entre as duas margens durante a

separação continental. Por causa dos parâmetros empregados na inversão, mais adequados para a província do que para a região oceânica e o Cráton do São Francisco, a espessura da área oceânica está superestimada, enquanto a do cráton está subestimada. A comparação dos resultados da inversão na Província Borborema, com o cálculo de espessura obtido por meio de dados telessísmicos é boa (diferença de 0,5 km em duas de três estimativas), apesar das premissas do método de inversão para a estimativa da espessura da crosta não satisfazerem a maioria das características isostáticas da província. Entretanto, a comparação com estimativas a partir de dados de sísmica profunda é menos adequada.

### Referências

- Almeida F.F.M. et al.** 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *In: SBG-Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8<sup>o</sup>, Campina Grande, Atas, Boletim 6, p. 363-391.*
- Banks R.J. et al.** 1977. Isostatic compensation on a continental scale: local versus regional mechanisms. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, 51:431-452.*
- Berrocal J. et al.** 1989. Modelo preliminar da estrutura crustal na região próxima ao Reservatório de Sobradinho (BA) através do método de refração sísmica profunda. *In: SBGf, Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, 1<sup>o</sup>, Rio de Janeiro, Resumos-Abstracts, p. 109.*
- Castro D.L. et al.** 1997. Relevo da interface crosta-manto no Nordeste Setentrional do Brasil: Comparação entre vínculos de isostasia e suavidade. *In: SBGf, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 5<sup>o</sup>, Anais, 2:682-685, São Paulo, SP.*
- França G.S. et al.** 2006. O estudo da crosta no NE do Brasil, usando Função Receptor. *In: SBGF, Simp. Bras. Geof., 2<sup>o</sup>, Natal, Estudo da Crosta, Resumos Expandidos, 1 cd-rom.*
- Matos R.M.D.** 1989. Imagem sísmica crustal da Bacia Potiguar emersa. *In: SBGf, Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, 1<sup>o</sup>, Rio de Janeiro, Boletim de Resumos Expandidos, Métodos Sísmicos, v.1, p.223-227.*
- Oliveira R.G.** 2008. *Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de Sua Margem Continental (Nordeste do Brasil)*. Tese de Doutorado, PPGG/CCET/UFRN, Natal, 411p.
- Parker R.L.** 1972. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, 31:447-455.*
- Sandwell D.T. & Smith W.H.F.** 1997. Marine Gravity from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research, 102(B5):10,039-10,054.*
- Ussami N.** 1999. *Estruturação e Limites da Placa Litosférica São Franciscana: Contribuição Gravimétrica*. Tese de Livre Docência, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, 61p.

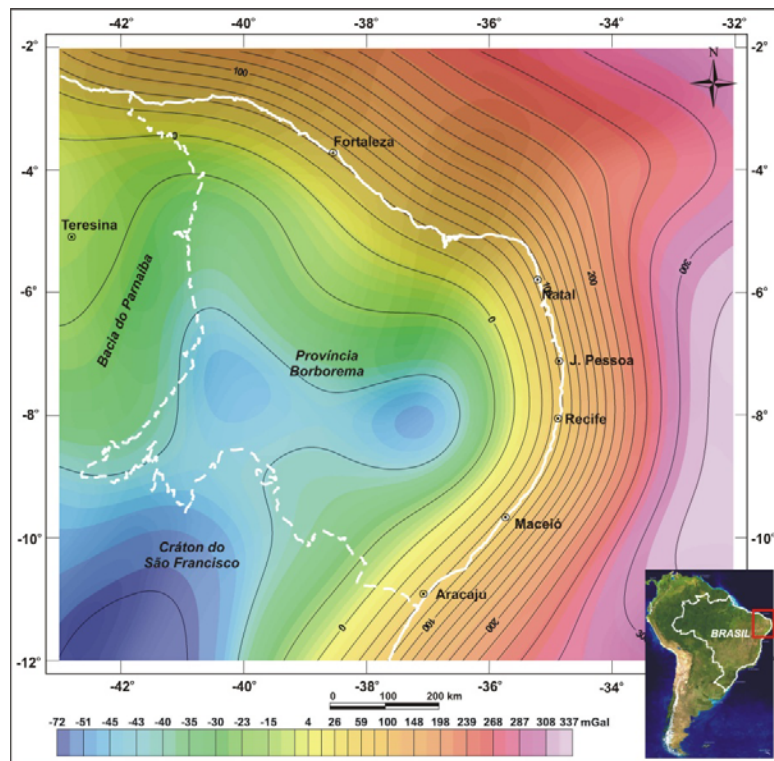


Figura.3: Mapa gravimétrico regional isostático. A linha branca tracejada é o limite da Província Borborema.

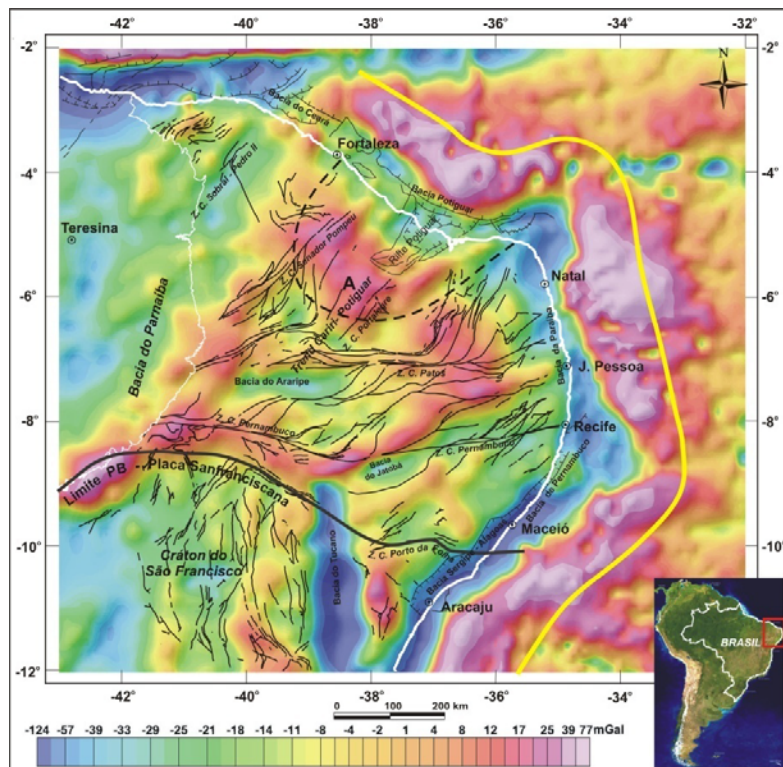


Figura 4: Mapa gravimétrico residual isostático com superposição das principais estruturas. O traço amarelo é o limite inferido para a interface crosta continental - crosta oceânica (Oliveira 2008). O traço preto descontínuo é o limite da Depressão Sertaneja. A linha de sutura colisional entre a PB e a Placa Sanfranciscana está indicada.