



Características sísmicas da litosfera da Província Borborema: resultados parciais do experimento de refração sísmica profunda

José Eduardo P. Soares^{*1}, Marcus Vinicius de Lima², Reinhardt A. Fuck¹ e Jesus Berrocal³

(1) Laboratório de Estudos da Litosfera (LabLitos) IG/UnB;

(2) IAG/USP;

(3) Berrocal & Associados Ltda.

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV 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.

Abstract

A deep seismic refraction experiment was conducted November, 2008 along a NW-SE profile, from Granja, Ceará to Sirinhaém, Pernambuco, crossing the main tectonic domains of the Borborema Province. Integrated analysis of preliminary seismic results together with results from receiver function, gravimetric Bouguer anomaly and topographic maps, as well as geological evidence, lead to conclude that the crust of the Borborema Province was significantly stretched in the Cretaceous, during Pangaea break up, South Atlantic opening and South America-Africa separation. In this context it appears that the Santa Quitéria arc and the Borborema plateau were points of resistance to stretching. From a rheological standpoint, these terrains must be different from the others. The province is in isostatic equilibrium.

Introdução

Em novembro de 2008 foi realizado o experimento de refração sísmica profunda na Província Borborema, NE do Brasil, no bojo do projeto Estudos Geofísicos e Tectônicos na Província Borborema (Instituto do Milênio CNPq/MCT). A linha de refração foi realizada ao longo de perfil de 880 km de extensão na direção NW-SE, desde Granja, Ceará até Sirinhaém, Pernambuco (Figura 1). Contou com 400 sensores, um a cada 2,2 km, e 19 pontos de tiro, um a cada 50 km ao longo do perfil. Os tiros foram realizados em furos de 10 polegadas de diâmetro e 45 m de profundidade com o explosivo, em forma de gel, acomodados nos dois terços inferiores do furo e, a porção superior, tamponada com brita zero. Os tiros extremos foram detonados com carga de 4 toneladas de explosivo e os tiros intermediários com carga de 1,4 toneladas. Com os tiros extremos (4 toneladas) foi possível obter registros até aproximadamente 550 km de distância do tiro e para os tiros intermediários (1,4 toneladas) os registros ficaram nítidos até distâncias em torno de 400 km.

Contexto tectônico

A Província Borborema (Almeida *et al.*, 1981) foi formada no Neoproterozóico, como parte do amálgama de Gondwana ocidental (Brito Neves *et al.*, 2000). É o resultado de aglutinação de terrenos geológicos distintos justapostos por zonas de cisalhamento de dimensões crustais. De NW para SE a linha de refração cruza os domínios Médio Coreau, Ceará Central, Orós-Jaguaribe, Rio Grande do Norte e Zona Transversal (Figura 1), que são delimitados, respectivamente, pelas zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II, Senador Pompeu, Portalegre, Patos e Pernambuco. Estudos geológicos recentes definiram na porção NW do domínio Ceará Central a existência de arco magmático neoproterozóico (Fettel *et al.*, 2003), permitindo discriminar o Arco Santa Quitéria, a NW, da porção sudeste do domínio Ceará Central. Em superfície o limite SE do arco é representado por falha de empurrão vergente para SE.

Processamento de dados

Os dados de refração foram submetidos a etapas de pré-processamento e processamento, que podem ser resumidas em:

- 1) conversão dos dados do formato original do equipamento para o formato SAC, do programa *Seismic Analysis Code* (Tapley e Tull, 1991);
- 2) correção da deriva de tempo dos registradores;
- 3) edição dos cabeçalhos dos traços;
- 4) corte dos registros em janelas de 150 s com início na hora origem do evento;
- 5) montagem das seções sísmicas de refração das ondas P e S reduzidas com velocidade de 8,0 km/s e 4,62 km/s e filtradas na banda passante de 1-10 Hz e 2-8Hz, respectivamente;
- 6) identificação e classificação dos alinhamentos de fases, primários e secundários, nos sismogramas (Figura 2);
- 7) leitura do tempo de chegada das fases;
- 8) modelagem 1D e 2D do tempo de chegada das fases para os diferentes domínios a partir do programa *rayinvr* (Zelt e Smith, 1992);
- 9) confecção do modelo 2D final.

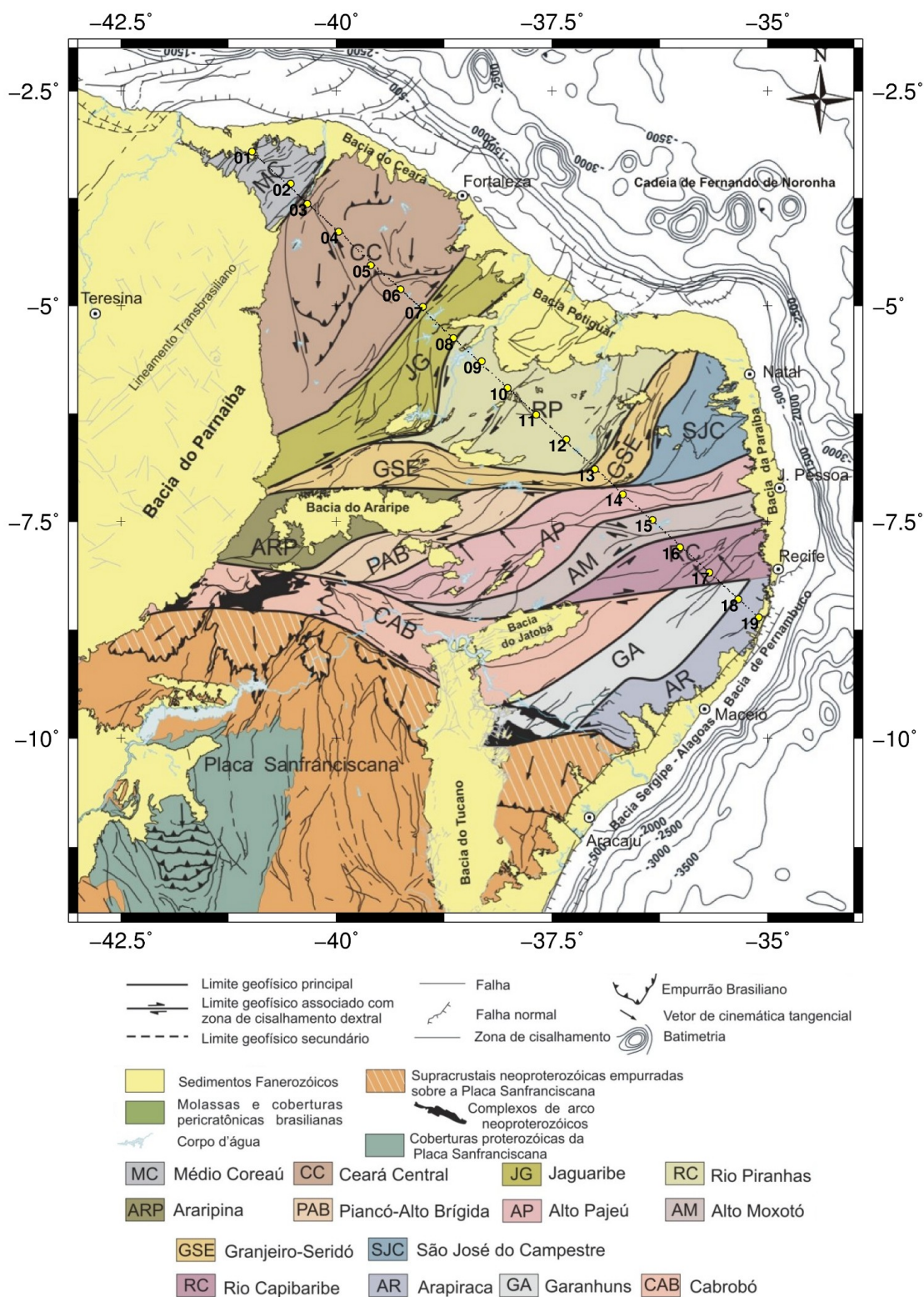


Figura 1 – Mapa geológico da Província Borborema contendo a linha de refração sísmica profunda (pontos pretos) e as explosões efetuadas (círculos amarelos). Separação da Província Borborema em terrenos e domínios tectono-estratigráficos segundo Oliveira (2008).

Seções sísmicas de refração

As principais feições das seções são:

i) primeiras chegadas (quebras) que incluem as fases da crosta superior (Pg) e a refração da Moho (Pn); as fases da crosta superior se alinham com inclinação positiva e deixam de ser primeiras quebras a partir de, aproximadamente, 180 km de distância da fonte; a partir daí, a Pn se torna primeira quebra, apresentando alinhamento aproximadamente horizontal, o que traduz velocidade próxima a 8,0 km/s para o manto litosférico; nos domínios Rio Grande do Norte e Zona Transversal, a Pn não é tão clara, não sendo possível identificá-la nos sismogramas de alguns tiros;

ii) a refração da crosta inferior (Pi), apesar de ser fase interna do sismograma, é sempre nítida, traduzindo a existência de crosta inferior bem definida ao longo de todo o perfil sísmico;

iii) a reflexão da Moho (PmP) é uma hipérbole que se destaca nos sismogramas; de forma geral apresenta ponto crítico por volta de 80 km de distância e pode ser identificada até *offsets* em torno de 250-300 km;

iv) em seguida à fase PmP os sismogramas apresentam uma faixa de energia sem coerência, conferindo um aspecto de “sujeira” ao sismograma, mostrando região de alta refletividade na parte superior do manto litosférico; e

v) reflexão profunda que se torna assíntota à fase Pn; por não apresentar refração associada, essa reflexão sugere região de inversão de velocidade no manto superior.

Discussão

Os dados foram modelados por domínios tectônicos e integrados em modelo crustal preliminar mostrado na Figura 3. Apesar da necessidade de sucessivos ajustes no modelo na região da junção, a estrutura maior da crosta está bem definida e mostra diferenças entre os lados NW e SE.

Os resultados sísmicos, analisados em conjunto com os resultados de função do receptor, mapas gravimétrico e topográfico, além de evidências geológicas, permitem tecer as seguintes considerações sobre a litosfera da Província Borborema sob o perfil sísmico:

i) a Moho é uma superfície irregular, com comportamento diferenciado em cada domínio/subdomínio tectônico. De forma geral a crosta se apresenta mais fina sob a porção central da linha, nos domínios Ceará Central (~29 km) e Orós-Jaguaribe, e mais espessa sob o Arco Santa Quitéria a NW e Planalto da Borborema a SE (~35 km);

ii) a distribuição de velocidade das ondas P (Vp) é relativamente homogênea ao longo da crosta, com pequenas diferenças entre os domínios;

iii) a velocidade média obtida para a crosta na porção NW do perfil (Arco de Santa Quitéria) é menor do que a velocidade média da crosta na parte SE (Planalto da Borborema);

iv) uma característica marcante é a divisão bem definida da crosta em crosta superior e inferior, caracterizando a

descontinuidade de Conrad. A crosta superior, normalmente, é formada por mais de uma camada;

v) quanto mais fina a crosta, maior o valor de anomalia Bouguer e mais baixa a topografia, e vice-versa;

vi) na maioria das vezes, independente da topografia, os diferentes domínios mantêm as coberturas metassedimentares;

vii) a crosta do Planalto da Borborema possui razão $V_p/V_s=1,8$ (Barbosa, 2008; Pavão, 2010) e sob o Arco Santa Quitéria $V_p/V_s=1,75$, sendo em ambos os casos maior que os valores determinados nas porções intermediárias, onde $V_p/V_s < 1,73$;

viii) não há evidências de *underplating* sob o perfil sísmico;

ix) o manto litosférico aparenta ser bastante homogêneo, com Vp entre 8,0 e 8,1 km/s;

x) reflexão profunda presente nos sismogramas acusa a existência de descontinuidade no manto superior a profundidades de aproximadamente 50-55 km, provavelmente com inversão de velocidade, parecendo indicar a passagem da litosfera para a astenosfera.

Considerações finais

O conjunto de evidências permite concluir que a litosfera da Província Borborema foi significativamente estirada no Cretáceo, durante a fragmentação de Pangea, abertura do Oceano Atlântico Sul e separação da América do Sul da África.

Aparentemente, o Arco Santa Quitéria e o Planalto da Borborema funcionaram como regiões de maior resistência ao estiramento e, como consequência, o afinamento crustal da província foi mais expressivo nos domínios intermediários. Do ponto de vista reológico estes domínios têm de ser diferentes dos demais, o que é sugerido pelos valores mais elevados da razão V_p/V_s nesses terrenos.

Aparentemente parte do afinamento crustal se deu por estiramento simples, no qual a Moho subiu e a topografia desceu, estirando a crosta como se estira goma de mascar. Outra parte está associada à transformação das rochas da base da crosta em rochas da parte superior do manto litosférico. Este processo é sugerido por região de alta refletividade presente nos sismogramas logo após a reflexão da Moho (PmP) e, também, pelo comportamento homogêneo do manto litosférico mostrado pelos valores de Vp.

A inversão de velocidade no manto superior, muito provavelmente, está associada ao limite litosfera-astenosfera.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pela bolsa de estudos (Proc. 2006/06296-5) e ao CNPq pelo suporte financeiro (Proc. 42.0222/2005-7, 57.3713/2008-1).

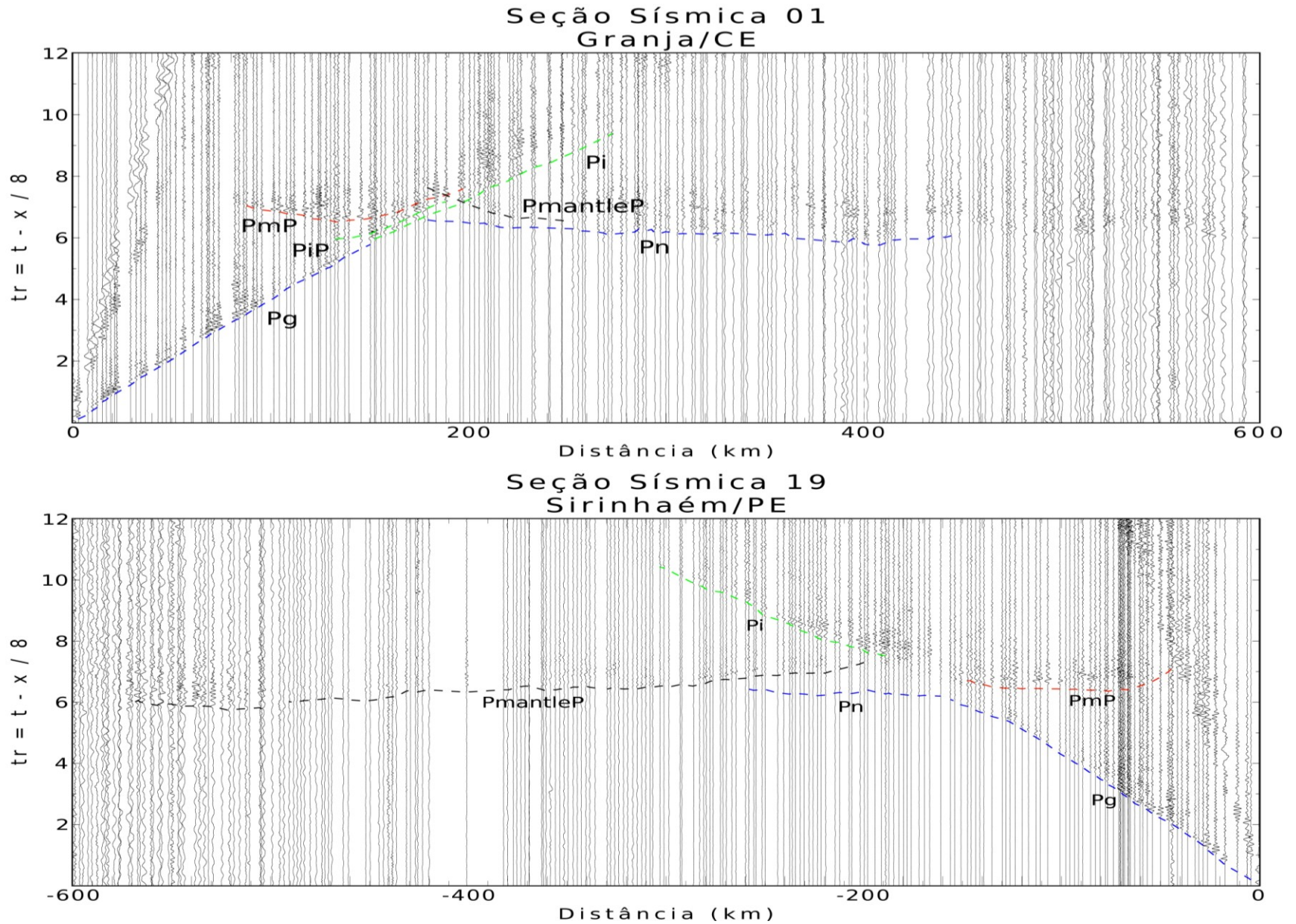


Figura 2 – Seções sísmicas registradas dos tiros direto (parte superior da figura) e reverso (parte inferior), dos pontos de tiro 01 e 19, respectivamente. Os sismogramas estão plotados com traço normalizado, em tempo reduzido e filtrados de 1 a 10 Hz.

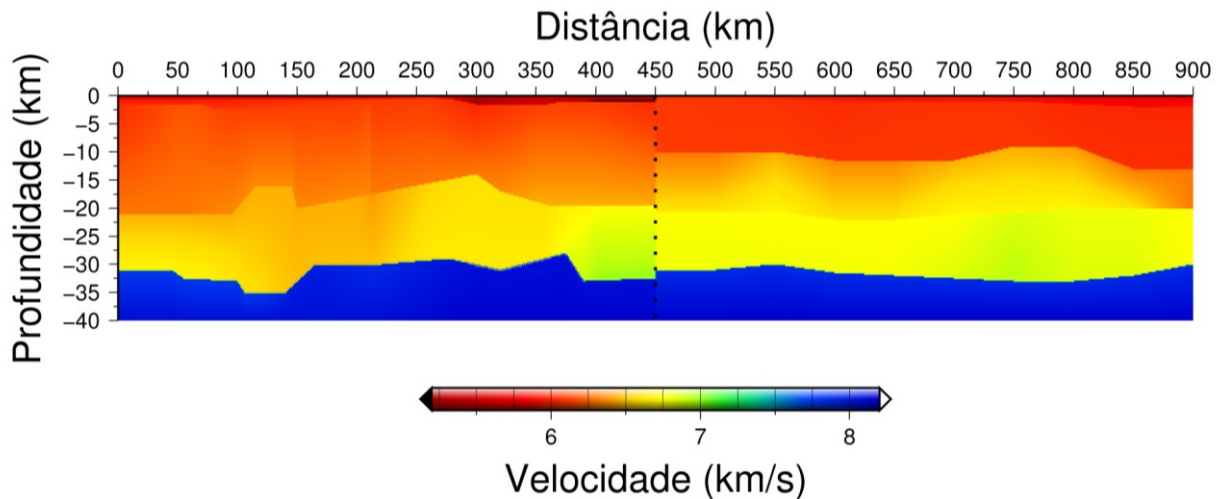


Figura 3 – Modelo sísmico 2-D da litosfera da Província Borborema, representativo de perfil NW-SE, de Granja, Ceará até Sirinhaém, Pernambuco.

Referências

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., 1981. Brazilian structural provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, 17, 1-29.

Barbosa, M. F. N., 2008. Estimativas de espessura crustal na Província Borborema (NE/Brasil) através da função do receptor. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 61p.

Brito Neves, B. B., Santos, E. J., Van Schmus, W. R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, 151-182.

Fetter, A. H., Santos, T. J. S., Van Schmus, W. R., Hackspacher, P. C., Brito Neves, B. B., Arthaud, M. H., Nogueira Neto, J. A., Wernick, E. 2003. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa

Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana. *Gondwana Research*, 6, 265-273.

Oliveira, R. G., 2008. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil). Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 415p.

Pavão, C. G., 2010. Estudo de espessura de descontinuidade rasas com função do receptor de alta frequência na Província Borborema. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas), Universidade de Brasília, 124p.

Tapley, W. C. & Tull, J. E., 1991. SAC – Seismic Analysis Code. Lawrence Livermore National Laboratory, CA, 423p.

Zelt, C. A., Smith, R. M., 1992. Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophysical International Journal*, 108, 16-34.