



Estrutura da crosta sob Cavalcante, Goiás: um estudo por função do receptor

¹Soares, J.E.P., ²Berrocal, J., ¹Fuck, R.A., ³França, G.S.A., ¹Silva, S.E., ¹Nascimento, E.L.C.

¹IG/UnB, ²IAG/USP, ³DFTE/UFRN emails: soares@unb.br; berrocal@iag.usp.br; rfuck@unb.br

Copyright 2004, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Técnico-científica do I 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.

Abstract

Receiver functions from an array of three broadband seismographic stations improved the understanding of Moho behavior in the Brasília Belt and São Francisco Craton boundary, in central Brazil. They determined the westwards dip of Moho under Cavalcante. Together with refraction data, permitted inferring the Rio Paranã discontinuity as a former crustal listric fault, and the Brasília Belt-São Francisco Craton boundary as a block moved upwards. Crustal Vp/Vs in the region is 1.69 and Moho depth varies between 38 km and 43 km. There is a low Vp/Vs crustal anomaly NNE of Cavalcante, probably related to granite intrusions of Goiás Tin Province.

Introdução

Estudos utilizando função do receptor foram realizados na região de Cavalcante, Goiás, ao longo da linha de refração sísmica profunda de Cavalcante, com o objetivo de aprimorar o comportamento da Moho na porção centro-oeste da linha de refração, onde dois tiros do experimento foram perdidos, comprometendo localmente a determinação da estrutura crustal.

O modelo obtido com os dados de refração apresenta uma crosta com espessura de aproximadamente 43 km a oeste da cidade de Cavalcante, 38 km no limite com o Cráton São Francisco e 42 km sob o cráton. O afinamento da crosta apresenta relação ainda não entendida com a descontinuidade do Rio Paranã. A falta de dados sísmicos sob Cavalcante gerou dúvidas sobre a topografia da Moho na região de transição, uma vez que, apesar da variação de pouco mais de 4 km na espessura da crosta, os dados gravimétricos não mostram anomalia positiva relacionada.

O presente trabalho apresenta os resultados da aplicação do método de função do receptor na região de Cavalcante utilizando dados de um arranjo de três estações sísmográficas de banda larga, espaçadas de aproximadamente 10 km, instalada sobre a linha de refração sísmica.

Contexto Regional

As estações sísmográficas de Cavalcante situam-se na Província Tocantins, Brasil central, sobre o cinturão de dobras e empurrões da Faixa Brasília (Fuck et al., 2002; Araújo Filho, 2000), no domínio do Grupo Araí, em uma janela de exposição do embasamento. Aproximadamente 50 km a leste do arranjo sísmográfico ocorre a descontinuidade do Rio Paranã, interpretada como o limite do Cráton São Francisco. É um limite tectônico marcado

pelo cavalgamento do grupo Araí por sobre rochas carbonáticas do Grupo Bambuí a leste.

O cinturão de dobras e empurrões traduz um ambiente de margem continental passiva, representando o domínio plataformal relacionado ao Cráton São Francisco durante a existência do extinto oceano de Goiás. A inversão desse oceano ocorreu no Neoproterozóico, dando origem à configuração atual da Faixa Brasília.

Função do receptor

É uma técnica que permite isolar a estrutura da Terra sob a estação sísmográfica na forma de uma série temporal, onde o primeiro pulso contém a energia da onda P e os demais pulsos a energia de ondas P convertidas em S (Ps) e ondas múltiplas (PpPms, PpSms + PsPms, etc). É obtida através da deconvolução do componente vertical, de telessismos com ângulo de incidência próximo à vertical, do componente radial.

Tem sido utilizada, principalmente, para determinar a razão Vp/Vs média e a espessura da crosta sob a estação, uma vez que a Moho é uma descontinuidade marcante e gera fases diretas e múltiplas que se destacam.

A espessura crustal é função do parâmetro de raio p (vagareza horizontal), da velocidade Vp média e da razão Vp/Vs média na crosta. O parâmetro p é calculado a partir da distância epicentral. A velocidade Vp média é obtida de forma independente ou, simplesmente, aproximada, p.ex., pelo ambiente tectônico (Zandt & Ammon, 1995). A razão Vp/Vs média é calculada com o uso de fases múltiplas.

A razão Vp/Vs pode ser determinada por meio dos tempos Ps-P e PpPms-Ps segundo a relação (Zandt et al., 1995)

$$\frac{V_p}{V_s} = \left\{ (1 - p^2 V_p^2) \left[2 \left(\frac{t_{Ps} - t_P}{t_{PpPms} - t_{Ps}} \right) + 1 \right]^2 + p^2 V_p^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

onde p é o parâmetro de raio, Vp a velocidade crustal média da onda P e t o tempo das fases subscritas.

Estabelecido o valor de Vp e determinado o valor Vp/Vs a profundidade da Moho (H) é obtida pela relação (Zandt et al., 1995)

$$H = \frac{V_p (t_{Ps} - t_P)}{\left(\sqrt{\frac{V_p^2}{V_s^2} - p^2 V_p^2} - \sqrt{1 - p^2 V_p^2} \right)} \quad (2)$$

Função do receptor de Cavalcante

Os dados do arranjo sísmográfico de Cavalcante foram processados utilizando o pacote do Ammon (1997), com filtro passa baixa de Gauss ($[\exp(-w^2/4a^2)]$) com a igual a 3 e "nível d'água" de 0.001. Os traços foram analisados

em janelas de tempo variando de 15s a 90s, sendo selecionados visualmente os melhores traços.

Observou-se que (i) os traços com mesma distância epicentral e azimutes diferentes apresentam diferenças sistemáticas no tempo da Ps, com maior homogeneidade entre os sismos provenientes de oeste (maior Ps) e de leste (menor Ps) e que (ii) o mesmo evento ou eventos com distâncias e azimutes próximos apresentam o mesmo tempo da fase Ps nas três estações do arranjo. Optou-se por analisar separadamente os eventos com epicentros a oeste e a leste do arranjo sismográfico, empilhando os eventos com fontes de mesma distância dentro de cada grupo. Os traços finais de função do receptor são mostrados na Fig. 1. Foram plotados em relação a Δ^2 , a fim de linearizar o alinhamento das fases Ps e PpPms (França, 2003).

A razão Vp/Vs foi determinada a partir da análise conjunta dos dados de função do receptor e refração sísmica profunda. As fases PpPms foram lidas nas funções do receptor onde tinham maior qualidade, O1, O5, O6 e O7 dos sismos a oeste e L1 e L3 dos sismos a leste (Fig.1), e seus tempos aplicados na equação 1. O valor de Vp utilizado foi de 6,4 km/s, obtido por refração profunda. O resultado final foi a Vp/Vs média de 1,69 (Tabela 1).

Tabela 1 – Vp/Vs média para a crosta na região de Cavalcante obtida com função do receptor, considerando Vp média de 6,4 km/s.

Traço	p (s/°)	PpPms-P (s)	Vp/Vs
O1	6,33	16,971	1,699
O5	8,67	16,049	1,699
O6	8,75	16,217	1,688
O7	8,84	16,004	1,712
L1	5,22	15,869	1,679
L3	6,18	15,745	1,686

O1,... L1 - traços dos sismogramas leste e oeste.

O valor Vp/Vs de 1,69 foi utilizado nos modelos 1D de refração profundo dos tiros de Cavalcante e obtido a curva teórica caminho-tempo para a fase S refletida na Moho (SmS). Sobreposta aos sismogramas, a curva teórica permitiu determinar o alinhamento correto das fases SmS e obter o valor Vp/Vs médio da crosta para cada tiro. Os resultados da refração confirmam o valor de Vp/Vs de 1,69 como representativo da região (Fig. 2, Tabela 2). Adicionalmente, determinações de Vp/Vs para Brasília, Goianésia e Minaçu, obtidas por outros autores, todas sobre o mesmo contexto geotectônico de Cavalcante corroboram o valor de 1,69 (Tabela 2).

Tabela 2 – Vp/Vs crustal média para o cinturão de dobras e empurrões da Faixa Brasília e oeste do Cráton São Francisco.

Localidade	Vp/Vs	Método
Goianésia	1,687	¹ FR
Goianésia	1,71	² FR
Brasília	1,684	¹ FR
Brasília	1,70	² FR
LR SMB tiro Brasília	1,687	³ RSP
LR SMB tiro Minaçu	1,686	³ RSP
LRSC – tiro1	1,688	³ RSP
LRSC – tiro 3	1,685	³ RSP
LRSC – tiro 5	1,690	³ RSP
LRSC – tiro 6	1,690	³ RSP
LRSC – tiro 7	1,684	³ RSP

LR SMB – linha de refração sísmica Minaçu-Brasília; LRSC – linha de refração sísmica Cavalcante; FR – função do receptor; RSP – refração sísmica profunda; 1- França, 2003; 2- Assumpção et al., 2004; 3- Soares et al., 2004.

Considerando Vp média da crosta de 6,4 km/s e Vp/Vs de 1,69, a profundidade H da Moho foi determinada para cada traço através da equação 2, veja Tabela 3. Excetuando o último traço do setor leste (L8), que apresenta Ps fora do alinhamento, os demais possuem profundidades próximas com média de $38,0 \pm 0,9$ km para o lado leste e $41,5 \pm 1,2$ km para o oeste.

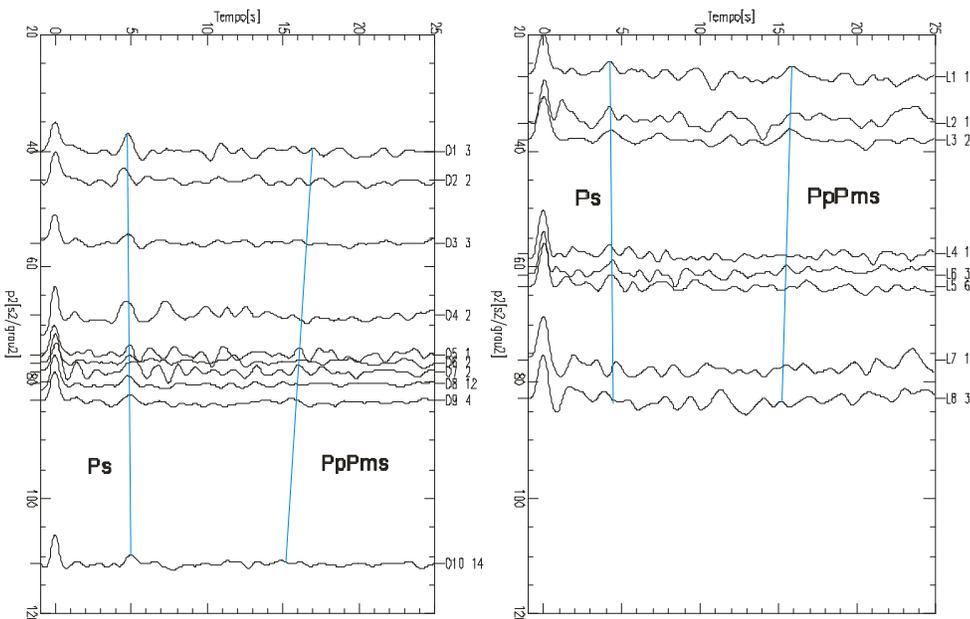


Figura 1 – Resultados de função do receptor dos tele-sismos com epicentros a oeste e leste das estações sismográficas de Cavalcante. À direita de cada traço estão o nome e o número de traços empilhados, respectivamente. As linhas azuis identificam o alinhamento das fases Ps e PpPms. As leituras das fases e os azimutes dos traços estão listados nas tabelas 1 e 3.

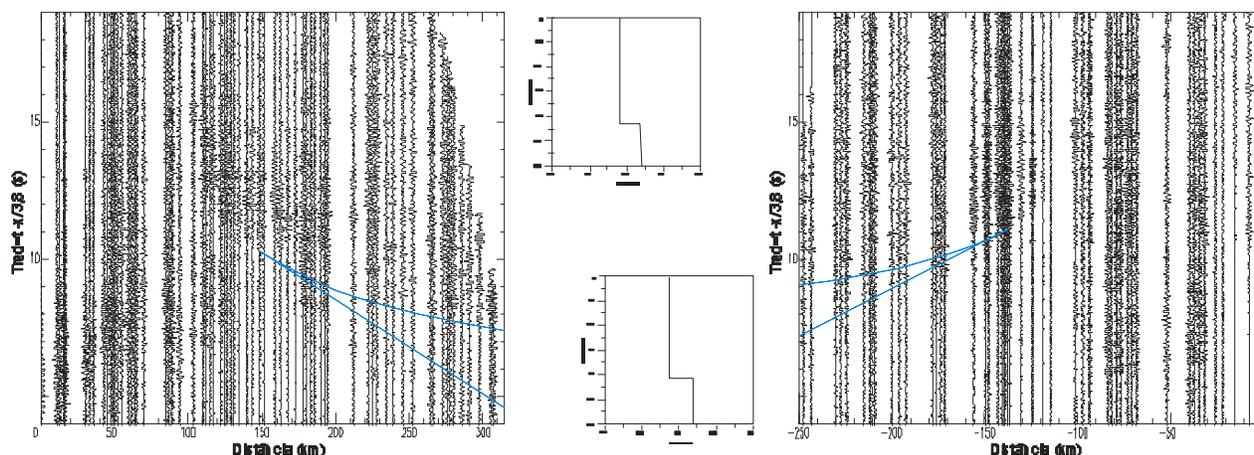


Figura 2– Modelagem 1D da reflexão da onda S na descontinuidade de Moho (SmS) para os tiros 1 e 6 da linha de refração sísmica profunda de Cavalcante. As curvas azuis são curvas tempo x distância teóricas do modelo ao lado. Os sismogramas foram filtrados na banda passante de 1-6 Hz e os tempos reduzidos com a velocidade de 3,8 km/s.

Considerando V_p média da crosta de 6,4 km/s e V_p/V_s de 1,69, a profundidade H da Moho foi determinada para cada traço através da equação 2, veja Tabela 3. Excetuando o último traço do setor leste (L8), que apresenta Ps fora do alinhamento, os demais possuem profundidades próximas com média de $37,4 \pm 0,9$ km para o lado leste e $41,1 \pm 0,9$ km para oeste.

Tabela 3 – Espessura da crosta sob Cavalcante obtida para os traços de função do receptor dos telessismos a oeste e leste do arranjo sismográfico.

Traço	Azimute (°)	p (s/°)	Ps-P	H(km)
O1	301	6,33	4,777	42,5
O2	212	6,72	4,501	39,9
O3	301	7,48	4,831	42,3
O4	300	8,27	4,614	39,8
O5	340	8,67	4,900	41,9
O6	282	8,75	4,886	41,7
O7	282	8,84	4,760	40,6
O8	230	8,96	4,760	40,5
O9	259	9,12	4,825	40,9
O10	253	10,55	5,002	40,9
L1	47	5,22	4,248	38,3
L2	136	5,93	4,198	37,6
L3	42	6,18	4,323	38,6
L4	13	7,59	4,199	36,7
L5	171	7,96	4,325	37,5
L6	171	7,83	4,427	38,5
L7	98	8,72	4,658	39,8
L8	7	9,10	3,849	32,6

O1,... L1 - traços dos sismogramas leste e oeste.

Discussão

Os resultados de função do receptor são concordantes com os da refração sísmica profunda. A aproximação dos dados por setor permitiu determinar o mergulho para oeste da descontinuidade de Moho sob Cavalcante, comprovando as espessuras crustais de 43 km e 38 km obtidas pela refração sísmica a oeste e leste do arranjo sismográfico de Cavalcante, respectivamente. Esses resultados permitiram inferir a existência de duas falhas listricas de dimensões crustais que, provavelmente, guia-

ram a abertura do extinto oceano de Goiás e posteriormente foram invertidas durante seu fechamento. As expressões em superfície desses falhamentos são o empurrão do Rio Paranã a oeste e a Serra Geral de Goiás a leste (Fig. 3).

O afinamento da crosta sob a descontinuidade do Rio Paranã sugere a existência de um bloco de transição entre o domínio São Franciscano plataformal e cratônico propriamente dito, que teria sido soerguido em relação aos blocos laterais quando da inversão da bacia. Em superfície o bloco soerguido foi erodido e o relevo invertido, gerando uma calha de aproximadamente 40 km de largura, com expressão para norte e para sul do perfil sísmico, onde posteriormente foi depositado o Grupo Bambuí (Fig. 3).

Uma controvérsia relacionada ao afinamento crustal é a falta de uma anomalia gravimétrica positiva associada. Os resultados de função do receptor comprovam as espessuras crustais obtidas pela refração sísmica e vêm fortalecer a hipótese de que o manto litosférico sob o domínio São Franciscano possui densidade baixa ($<< 3,3 \text{ g/cm}^3$), principalmente se comparado ao manto neoproterozóico vizinho, provavelmente por ter sido ultra depletado em FeO ao longo de sua história (Soares et al., 2004). A alta velocidade das ondas P obtidas pela refração sísmica (8,25 km/s) se deve, principalmente, à baixa temperatura da litosfera paleoproterozóica.

Valor anômalo de espessura foi encontrado para os eventos provenientes de ~N7E, representado pelo traço L8 (Fig. 1, Tabela 3). Esse traço é o resultado da soma de dois eventos (3 registros). Possui Ps menor que 4s e H menor que 33 km (Tabela 3), sugerindo uma anomalia na crosta a NNE de Cavalcante. O traço L4 (N13E) parece ter sido, também, afetado. A falta de uma anomalia gravimétrica positiva que abone o afinamento crustal obtido pelo traço L8 (~10 km em relação à maior profundidade) deixa dúvidas sobre a representatividade do valor de V_p/V_s de 1,69 para a crosta a NNE. Essa região é a Província estanífera de Goiás, caracterizada por mais de

uma geração de granitos (Botelho, 1997). Se existe um conjunto de plutons/batólitos aflorantes, é de supor que outros tantos estejam em profundidade, sendo capazes de diminuir, consideravelmente, a razão Vp/Vs local, o que amenizaria a diferença de espessura sugerida pelo traço L8. Utilizando a múltipla PpPms desse traço, primeiro pico positivo a esquerda do alinhamento proposto na Fig. 1, o valor de Vp/Vs obtido é de 1,6 e H de 37,5 km, dentro da profundidade média ($37,4 \pm 0,9$ km) obtida para o lado leste. Provavelmente o valor baixo da fase Ps do traço L8 é o resultado da superposição de dois efeitos: a crosta é ligeiramente mais fina e, principalmente, possui Vp/Vs menor que as regiões circunvizinhas.

Conclusão

Estudos de refração sísmica profunda e função do receptor são complementares. Em Cavalcante permitiram determinar de forma simples o valor da Vp/Vs local e aprimorar a geometria da Moho e a estrutura crustal na região.

A análise dos dados de função do receptor por setor permitiu determinar o mergulho da Moho para oeste sob o arranjo sismográfico de Cavalcante. A determinação de valor médio para a profundidade da Moho sob uma estação sismográfica significa uma simplificação dos resultados de função do receptor, tanto maior quanto mais estruturado for o meio.

A passagem entre os domínios plataformal e cratônico é marcada pelo afinamento da crosta, sugerindo o deslocamento para cima de um bloco crustal intermediário, provavelmente soerguido durante a formação da Faixa Brasília.

O manto litosférico sob o domínio São Franciscano possui baixa densidade ($<<3,3$ g/cm³) e velocidade Vp de 8,25 km/s.

A Província estanífera de Goiás representa uma anomalia negativa na razão de Poisson média da crosta ($Vp/Vs << 1,69$), rompendo o comportamento homogêneo apresentado pela crosta São Franciscana ($Vp/Vs = 1,69$) no Brasil central.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo financiamento ao

Projeto 96/1566-0. São gratos, também, aos fazendeiros da região de Cavalcante que têm sido parceiros nos trabalhos de campo.

Referências

- Ammom, C.J. 1997. An overview of receiver function analysis, obtido via internet: <http://www.essc.psu.edu/~ammom/HTML/RftnDocs/rftn01.html>.
- Araújo Filho, J.O. de. 2000. The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection of two brasiliano fold-thrust belts in central Brazil and its implications for the tectonic evolution of western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30(1), p. 144-148.
- Assumpção, M., An, M., Bianchi, M., França, G., Rocha, M., Barbosa, J.R. & Berrocal, J., 2004. Seismic studies of the Brasília Fold Belt at the western border of the São Francisco Craton, central Brazil, using receiver function, surface wave dispersion, and teleseismic tomography. *Tectonophysics*, no prelo (versão revisada em Nov/2003).
- Botelho, N.F., 1997. Granites and related ore deposits in Central Brazil. *Int. Symp. on Granites and Assoc. Mineral. Ext. Abstr. Programs*, Salvador-Brazil, SGM, pp.36-37.
- França, G.S.L.A. de, 2003. Estrutura da crosta no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, usando função do receptor. Tese de doutorado, IAG/USP.
- Fuck, R.A., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Botelho, N.F., Junges, S.L., Hollanda, M.H.B.M. de, Moraes, R. & Armstrong, R., 2002. Crosta continental Paleoproterozóica no embasamento da porção norte da Faixa Brasília: novos dados Sm-Nd U-Pb. In: 41 Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa. *Anal.*, v. 1, p. 308.
- Zandt, G., Myers, S.C. & Wallace, T.C., 1995. Crust and mantle structure across the Basin and Range-Colorado Plateau boundary at 37°N latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, no B6, p. 10529-10548.
- Zandt, G. & Ammon, C.J. (1995). Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, v. 374, p. 152-154.
- Soares, J.E., Berrocal, J., Fuck, R.A. & Ventura, D.B.R., 2004. Seismic structure of central Brazil lithosphere (em preparação).

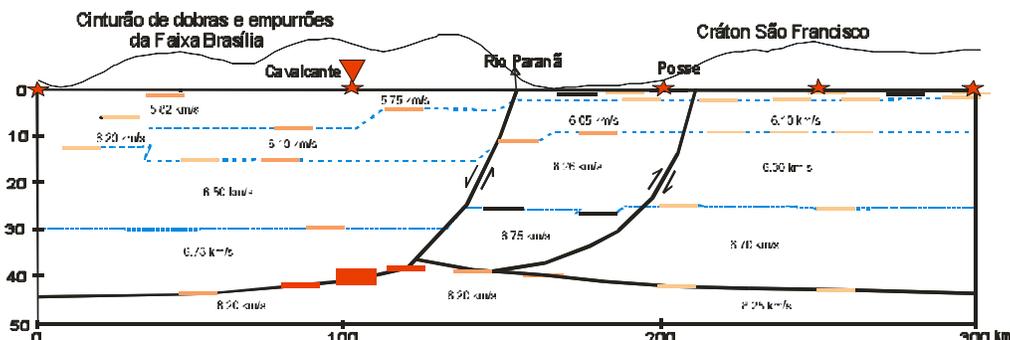


Figura 3 – Modelo sísmico da parte leste da Faixa Brasília/oeste do Cráton São Francisco. As estrelas representam os tiros da linha de refração profunda e o triângulo invertido as estações sismográficas de Cavalcante. Os traços amarelos são o resultado da modelagem 1D das reflexões críticas do levantamento de refração profunda. Os traços vermelhos os valores obtidos por função do receptor e as linhas azuis e pretas resultado da interpretação. O exagero da escala vertical do modelo é de 1,5 vezes. A topografia não tem escala, mas a maior diferença de altitude é inferior a 1000m.