



Integração de Dados Gravimétricos, Geóide e Magnetotéluricos no SE do Cráton S. Francisco: *Underplating* Magmático, Soerguimento e Erosão no Cretáceo Inferior

Luís Gustavo R. Pinto¹, Marcelo B. Pádua², Naomi Ussami¹, Ícaro Vitorello², Antonio L. Padilha², Carla Braitenberg³, 1- Depto. de Geofísica do IAG-USP, 2- Divisão de Geofísica Espacial do INPE-MCT, 3- Institute of Earth Sciences, Universidade de Trieste, Itália

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III 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

In SE São Francisco Craton a positive, circular, 7 m amplitude geoid anomaly coincides with the outcrop of Archean to Lower Proterozoic basement which includes the Quadrilátero Ferrífero. This circular shaped exposure of basement is defined by the erosional limit of Bambuí Group, a Neoproterozoic sedimentary cover of the São Francisco basin. In the same exposed basement, positive gravity anomalies are observed. An integrated gravity study with results of broad-band and long period magnetotelluric (MT) soundings from SE São Francisco Craton (Brazil) are presented and a new crustal model is proposed. Residual Bouguer anomalies were inverted using a 3-D algorithm. Estimated mean crustal thickness is provided by previous seismic receiver function studies in the region. MT data inversion of two radial profiles within the circular geoid anomaly resulted in a geoelectrical crustal model whereby the deepest 20 km of the lower crust is more conductive ($< 100 \Omega\text{m}$) which coincides with the region where the gravity data mapped a denser lower crust. This anomalous lower crust resulted from magmatic underplating, responsible for the Lower Cretaceous mafic dykes (130 Ma, Ar/Ar ages) found in this part of the craton. We also propose that this magmatism has uplifted a large segment of the cratonic lithosphere and eroded the Bambuí sedimentary cover. The thermal anomaly associated with this magmatism has its offshore extension along the Vitória-Trindade volcanic chain.

Introdução

De acordo com a definição de Almeida et al. (1981), o Cráton São Francisco (CSF) é o maior segmento litosférico cratônico do Brasil, ou seja, um núcleo cratônico que foi poupado de processos geológicos mais jovens do que 1.8 Ga. Alckmin et al. (1993) redefiniram os limites do cráton S. Francisco (Fig. 1) baseando-se em novos dados de geologia de superfície, novas datações geocronológicas e tomando como base informações de campo onde as rochas da cobertura do cráton não

apresentam deformações associadas às faixas móveis (Fig. 1).

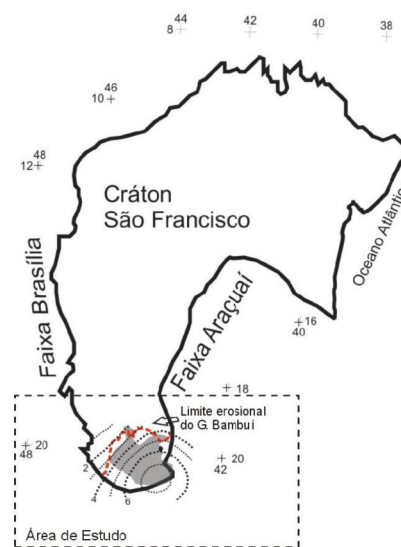


Figura 1 – Localização da área de estudo, adaptada de Alckmin et al. (1993). Os limites geológicos do cráton estão indicados em linha preta com suas respectivas faixas móveis. Linha vermelha tracejada indica o limite erosional do Grupo Bambuí. Padrão cinza indica o embasamento exposto, linha pontilhada preta são as anomalias do geóide em intervalo de contorno de 1 metro.

Foley (2008), em artigo recente argumenta que apesar das litosferas cratônicas serem estáveis, tectonicamente independentes e de apresentarem manto litosférico espesso e com baixo fluxo térmico, crátons podem apresentar episódios de rejuvenescimento ao longo de sua história. Os resultados geofísicos da parte mais profunda da crosta e manto superior do SE do Cráton S. Francisco aqui apresentados demonstram que este segmento de litosfera cratônica foi alterado no Cretáceo Inferior, durante o magmatismo Serra Geral da Província Paraná. Soerguimento e erosão acompanharam a

impregnação de magma na base da crosta e no manto superior.

Metodologia

Foram integrados novos dados geofísicos (topografia, geóide, gravimetria e MT banda larga e de longo período) aos dados já existentes como espessura média da crosta fornecida pela função do receptor (Assumpção et al., 2002; França & Assumpção, 2004).

Topografia e Geóide

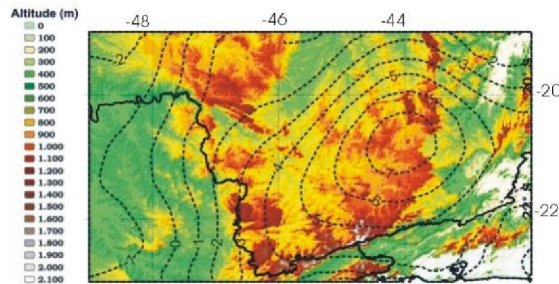


Figura 2 – Topografia (cores) e anomalias do geóide (contorno pontilhado) em metros. Modificado de Leite (2005).

Gravimetria

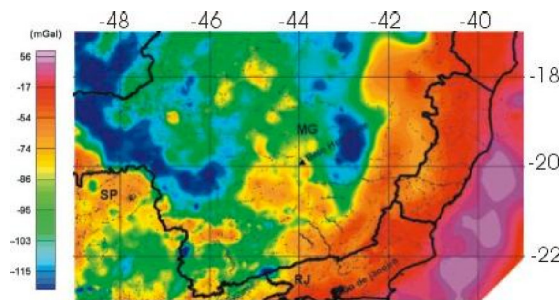


Figura 3 – Mapa de anomalias Bouguer do SE do Cráton S. Francisco. IGSN 1971, GRF1967. MG = Minas Gerais, SP = São Paulo e RJ = Rio de Janeiro. Os pontos pretos são as estações gravimétricas.

Na Fig. 3 são mostradas as anomalias Bouguer. A fim de isolar a anomalia positiva localizada no SE do Cráton S. Francisco, utilizou-se a técnica de separação regional-residual onde o componente regional foi estimado utilizando-se o modelo de compensação flexural para uma placa elástica fina sob a ação das cargas topográficas mostradas na Fig. 2 e espessura elástica efetiva de 40 km (Molina et al., 2000). O campo regional isostático assemelha-se ao previsto pelo ajuste polinomial de grau 3. As anomalias residuais são mostradas na Fig. 4 após remoção do componente regional.

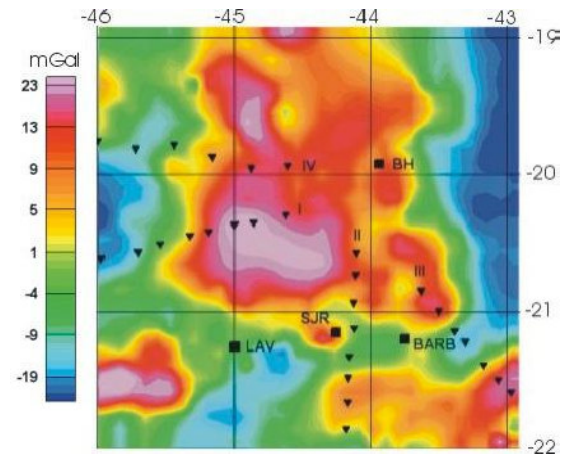


Figura 4 – Mapa de anomalias Bouguer residuais após a remoção do campo regional previsto pelo modelo flexural para a placa do São Francisco com $T_e=40$ km. Os triângulos pretos cheios são as estações MT discutidas no texto. Perfis MT-III e MT-IV são aqueles publicados em Bologna et al. (2007) e Figueiredo et al. (2008), respectivamente. Cidades BH = Belo Horizonte, SJR = S. João del Rei, BARB=Barbacena, LAV = Lavras

MT Banda Larga e de Longo Período

Dados magnetotelúricos de banda larga e longo período foram coletados ao longo de um perfil ENE-WSW de 230 km de extensão (perfil I na Fig. 4) e um segundo perfil NS de 160 km de extensão (perfil II na Fig. 4). Os perfis III e IV são aqueles já publicados em Bologna et al. (2007) e Figueiredo et al. (2008), respectivamente.

Para os perfis I e II, uma descrição sobre a aquisição, processamento e inversão dos dados está detalhada em Pádua (2004). Os dados foram processados utilizando o código robusto de Egbert (1997). A análise das distorções presentes nos dados foi feita utilizando o método de decomposição tensorial (Groom e Bailey, 1989), em seguida efetuou-se a inversão 2-D de Siripunvaraporn e Egbert (2000).

Resultados

A premissa inicial é de que os dados da função do receptor (Assumpção et al. 2002; França e Assumpção, 2004) não indica afinamento crustal sob a área de ocorrência de anomalias Bouguer positivas. Os resultados da inversão dos dados magnetotelúricos dos perfis I e II, indicam que a crosta média e inferior apresenta baixa resistividade elétrica ($< 100 \Omega.m$) se comparados com a mesma profundidade de outros segmentos da litosfera cratônica no CSF (Fig. 5).

O alto gravimétrico localizado no centro da área da Fig. 4 foi então interpretado como um segmento da crosta inferior com densidade maior, possivelmente causada por

processo magmático de intrusão de sils na base da crosta, ou seja, um *underplating* magmático.

A inversão dos dados gravimétricos residuais foi efetuada utilizando o algoritmo proposto por Oldenburg (1974). A profundidade média da crosta no SE do Cráton S. Francisco de 40 km foi estimada a partir dos valores de espessuras crustais obtidas pelo método da função do receptor de dados teleísmicos (Assumpção et al. 2002; França e Assumpção, 2004) no CSF. Foram considerados dois contrastes de densidade, 0,1 g/cm³ e 0,05 g/cm³, que representariam graus diferenciados de intrusão magmática na crosta inferior. No primeiro caso, a altura da crosta inferior mais densa alcança 9 a 10 km da base da crosta, enquanto que para contraste de densidade menor de 0,05 g/cm³, a altura dobra e alcança o mesmo nível crustal com menor resistividade elétrica, aproximadamente 15 km de altura ou 25 km de profundidade a partir da superfície (Fig. 5). Os resultados sugerem que durante o magmatismo intrusivo, uma parte significativa da litosfera do SE do Cráton S. Francisco teve a crosta e manto superior alterados em sua densidade e condutividade elétrica.

A Fig. 5 mostra de forma integrada o mapa da profundidade do topo da crosta afetada pelo magmatismo intrusivo do Cretáceo Inferior, tomando como referência a interface crosta-manto em 40 km, para o contraste de densidade 0,05 g/cm³. Os resultados mostrados nas seções elétricas dos perfis I e II indicam também, em seção vertical, a topografia do topo da camada mais densa localizada na crosta média-inferior.

Discussão

Os novos dados crustais apresentam consistência com a ocorrência de enxames de diques toleíticos do Cretáceo Inferior nesta parte do CSF e nas faixas de empurrão (Espinhaço Meridional e Cinturão Mineiro) de idade mais antiga (Silva e Kuyumjian, 1996). Idades Ar/Ar em diques de Conceição do Mato Dentro (Rosset et al., 2007) indicam idade de intrusão dos diques entre 126 e 130 Ma. Segundo esses mesmos autores, em termos genéticos, esses diques apresentam similaridades aos diques toleíticos com alto TiO₂ da parte sul da bacia do Paraná e do norte do Etendeka na Namíbia.

A presença de um segmento na crosta média-inferior com densidade mais elevada (entre 0,05 e 0,1 g/cm³) produz uma anomalia do geóide de 2 m de amplitude máxima. Na Fig. 2, observa-se que o alto do geóide no SE do Cráton S. Francisco atinge 7 m. Removendo-se o componente topográfico e o efeito do *underplating* a amplitude da anomalia reduz-se a 3 m (Leite, 2005). Portanto, é necessário mais uma anomalia de massa na base da crosta ou no manto superior que explique a anomalia de 3 m no geóide. Nos perfis geoeletricos I e II mostrados na Fig. 5, são observadas baixas resistividades elétricas no manto litosférico (> 40 km) sob a crosta afetada pela intrusão magmática. Uma hipótese a ser testada é se o processo que provocou a alteração na estrutura elétrica do manto é de natureza composicional e responsável por um pequeno aumento

de densidade, sendo, portanto, a possível causa da anomalia do geóide remanescente.

Tomando como referência outra zona de ocorrência de enxames de diques toleíticos ao longo da margem continental, o Arco de Ponta Grossa, observa-se um alto gravimétrico (Sá et al., 1993) que pode ser associado à ocorrência de *underplating* na base da crosta, sem contudo ter associada uma anomalia do geóide positiva significativa ou de igual amplitude daquela observada no SE do CSF. A diferença fundamental entre a região do presente trabalho e o Arco de Ponta Grossa, onde enxames de diques de 130 Ma são também observados, é que no SE do CSF a atividade magmática continuou temporalmente e espacialmente durante a fase de espalhamento do fundo oceânico, dando origem à cadeia de ilhas vulcânicas Vitória-Trindade. Ernesto et al. (2002) invocam um mecanismo do tipo "convecção do manto na borda da placa litosférica" do CSF como aquele proposto por King e Ritsema (2002) que seria responsável pelo magmatismo recorrente e assinatura de manto litosférico no vulcanismo da ilha de Trindade naquela latitude.

A atividade intrusiva dos diques máficos sob o SE do CSF pode ter relação genética com o soerguimento e erosão da cobertura do grupo Bambuí nesta latitude e exposição do embasamento arqueano uma vez que o *underplating* tem distribuição aproximadamente circular, coerente com o limite erosional do grupo Bambuí.

Conclusões

Os resultados da inversão de dados gravimétricos e MT sugerem que durante o magmatismo Serra Geral (~130 Ma) parte significativa do SE do Cráton S. Francisco teve a crosta e manto superior alterados em sua densidade e condutividade elétrica. O aumento da densidade, entre 0,05 g/cm³ e 0,10 g/cm³, coincide espacialmente com um segmento da crosta médio-inferior mais condutivo (< 100 Ω.m). O modelo crustal proposto é consistente com a ocorrência de enxames de diques máficos no Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional.

Agradecimentos

À FAPESP pelo financiamento das pesquisas (Projeto Temático Proc. 01/02848-0), bolsas de doutorado a L.G.R. Pinto e M.B. Pádua. Aos técnicos de campo do INPE durante a aquisição dos dados MT.

Referências

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Neves, B.B.B., Fuck, R.A., 1981, Brazilian Structural Provinces: An introduction, Earth Science Reviews, 17, 1-29.
- Alkmin, F.F., Brito-Neves, B.B. e Alves, J.A.C., 1993, Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão. in "O Cráton do São Francisco", eds. J.M.L. Dominguez and A. Misi, 45-62, Salvador, SBG Núcleo Bahia/Sergipe.

- Assumpção, M.S., James, D. e Snoke, J.A., 2002, Crustal thicknesses in SE Brazilian shield with receiver function: implications for isostatic compensation. *J. Geophys. Res.*, 107, 2-11.
- Bologna, M. S., Vitorello, I., Padilha, A.L. e Pádua, M.B., 2007, Restringindo propriedades físicas da litosfera no sul da Província Ígnea do Alto Paranaíba com dados magnetotéluricos: evidência de metassomatismo no manto. Expanded Abstract in 10th International Congress of Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil. CD-ROM.
- Egbert, G.D., 1997, Robust multiple stations magnetotelluric data processing. *Geophys. J. Int.*, 130, 475-496.
- Ernesto, M. et al., 2002, Paraná magmatic province-Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic consideration and alternative heat sources. *J. Volc. Geothermal Res.*, 248, 1-22.
- Figueiredo, I.; Meju, M. A.; Fontes, S.L., 2008 Heterogeneous crust and upper mantle across the SE Brazilian Highlands and the relationship to surface deformation as inferred from magnetotelluric imaging, *J. of Geophys. Res.*, 113, p. 1/B03404-15.
- Foley, S.F., 2008, Rejuvenation and erosion of the Cratonic Lithosphere, *Nature Geoscience*, 1, 503-510.
- Groom, R.W. e Bailey, R.C., 1989, Decomposition of magnetotelluric impedance tensor the presence of local three-dimensional galvanic distortions. *Geophysics*, 56, 176-206.
- King, S.D, Ritsema, J., 2000, African hot-spot volcanism, small-scale convection in the upper mantle beneath craton. *Science*, 290, 1137-1140.
- Leite, E.P., 2005, Inversão 3-D de anomalias do geóide com aplicação no estudo da evolução térmica da margem continental leste do Brasil. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 185 pp.
- Molina, E.C., Ussami, N. e Marangoni, Y.R., 2000, Digital 5'x5' Gravity Maps of the São Francisco Craton, the Marginal Fold/Thrust Belts and Contiguous Continental Margin/Oceanic Basins (2a. Edição). Texto explicativo e CD-ROM. IAG-USP, São Paulo.
- Oldenburg, D.W., 1974, The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39, 526-536.
- Pádua, M.B., 2004, Estudo de indução eletromagnética na caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do Cráton S. Franciso. Tese de doutorado, INPE, São José dos Campos, 164 pp.
- Pinese, J.P.P., 1997, Geoquímica, geologia isotópica e aspectos petrológicos dos diques máficos pré-cambrianos da região de Lavras (MG), porção sul do Cráton do São Francisco, Tese de doutorado, Instituto de Geociências da USP.
- Rosset, A., De Min, A., Marques, L.S., Macambira, M.J.B., Ernesto, M., Renne, P.R., Piccirillo, E.M., 2007, Genesis and geodynamic significance of Mesoproterozoic and Early Cretaceous tholeiitic dyke swarms from the São Francisco craton (Brazil), *Journal of S. American Earth Sci.*, 24, 69-92.
- Sá, N.C., Ussami, N., Molina, E.C., 1993, Gravity Maps of Brazil I: Representation of free-air and Bouguer anomalies. *J. Geophys. Res.*, 98, 2187-2197.
- Silva, A. M., Kuyumjian, R.M., 1996, Enxames de diques máficos do Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional. *Boletim de Resumos Expandidos, XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia*, p. 505.
- Siripunvaraporn, W. e Egbert, G.D., 2000, REBOCC: An efficient data-subspace inversion for two dimensional magnetotelluric data. *Geophysics*, 65, 791-903.

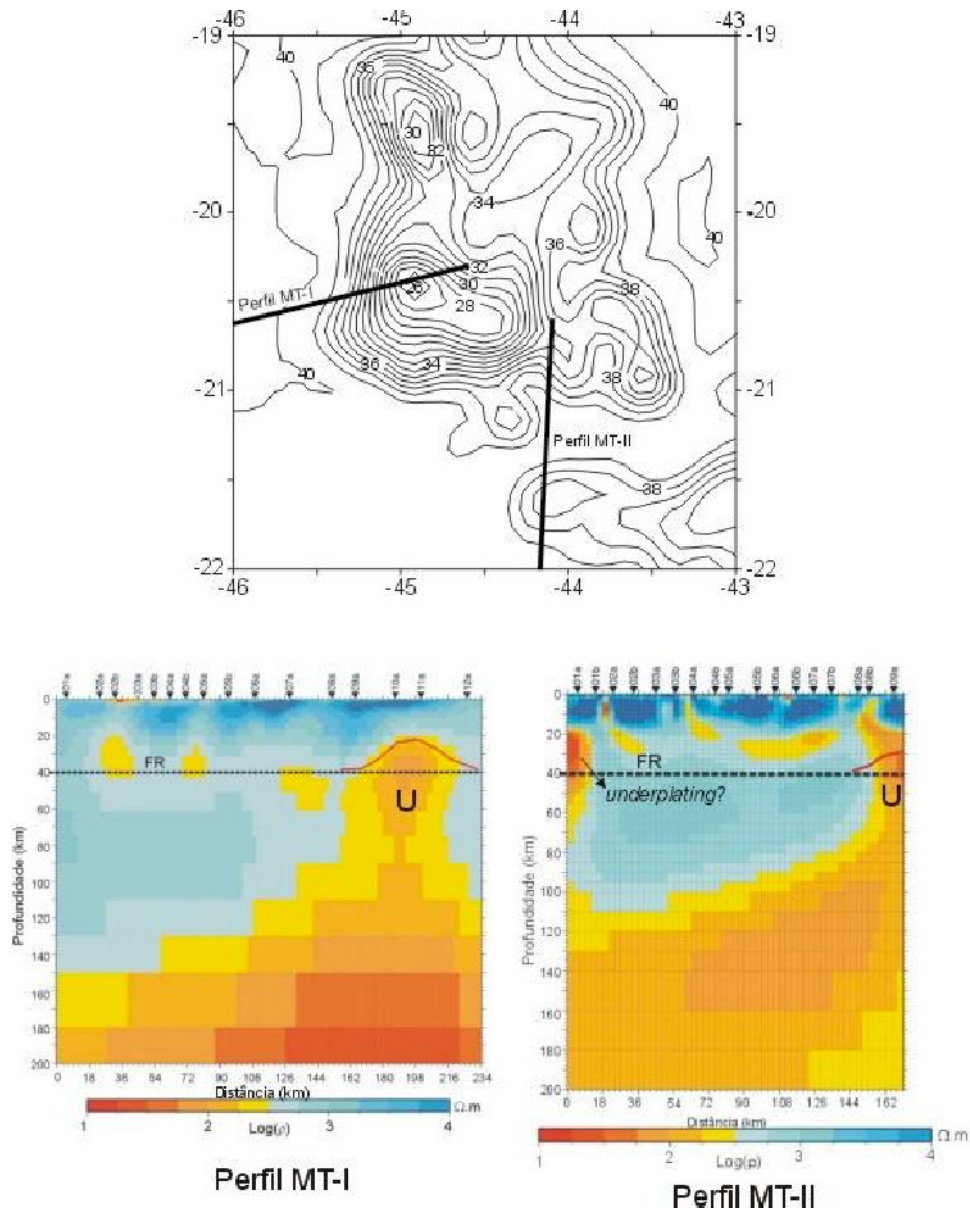


Figura 5 – No alto é mostrado o resultado da inversão dos dados gravimétricos, para contraste de densidade $0,05 \text{ g/cm}^3$ e abaixo o resultado da inversão dos dados de MT para os perfis I e II. Intervalo de contorno do mapa de “underplating” é 1 km. Em linha vermelha nos perfis de MT é indicada a profundidade do topo da crosta inferior onde a densidade é maior. FR = profundidade média da Moho pela função do receptor (40 km). U = Underplating