

Estudos preliminares da anisotropia sísmica em Senador Sá-CE

George Sand França^{*1}, Joaquim Mendes Ferreira¹, Carlos da Silva Vilar¹, Aderson Farias do Nascimento¹ e Francisco H. R. Bezerra²,

¹Departamento de Física, ²Departamento de Geologia, UFRN, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

In the João Câmara and Açú areas, NE Brazil, the Precambrian fabric has been interpreted as predominantly controlling the crustal seismic anisotropy. This interpretation is due to the polarization of the fastest S wave splitting which is parallel to Precambrian lineaments. The seismic activity in Senador Sá occurred between two shear zones. Initially, two stations presented the NE and NNE polarization; and delay time 8.16 ms/km and 2.56 ms/km. The investigation of regional lineaments shows that these features present a NE trend, which is compatible with our preliminary seismic anisotropy study. A detailed study using other stations located between the shear zones could shed further light on this issue and confirm or not the Precambrian-controlled seismic anisotropy in NE Brazil.

Introdução

A região Nordeste é a principal área de atividade sísmica do Brasil. Nos últimos anos, do ponto de vista regional, esta região tem sido investigada por diferentes técnicas sismológicas (Assumpção, 1998; Ferreira *et al.*, 1998; Souza & Mitchell, 1998; Vilar, 2004; Feng, 2004).

Recentemente foram realizados estudos de anisotropia sísmica nesta região, em especial, nas localidades de João Câmara - RN (do Nascimento *et al.*, 2002) e de Açú - RN (do Nascimento *et al.*, 2004). Segundo estes autores, a anisotropia sísmica crustal nestas duas regiões é controlada pela petrotrama Pré-cambriana. Neste contexto, é interessante investigar a causa da anisotropia sísmica crustal em outras regiões do Nordeste do Brasil.

A região de Senador Sá, localizada no estado do Ceará, Nordeste do Brasil, está inserida na Faixa Noroeste Ceará (FNC), que corresponde à Faixa Médio Coreau, pertencente, no contexto geológico-geotectônico regional, à Província Borborema (Almeida *et al.*, 1981; Brito Neves, 1978; Jardim de Sá, 1994). Na Figura 1 estão representadas as principais feições geológicas, dentre as

quais podemos destacar uma seqüência de *horsts* e *grabens*.

Esta região foi palco, no ano de 1997, de uma campanha, utilizando estações sismográficas, que visou o estudo da atividade sísmica (França, 1999; França *et al.*, 2005). Dando continuidade a esse estudo, o presente trabalho tem como objetivo principal apresentar uma análise preliminar sobre um estudo de anisotropia crustal nesta região, bem como sua possível causa.

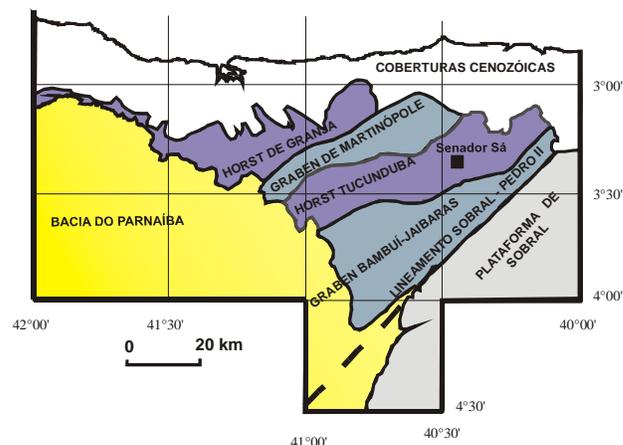


Figura 1 - Mapa geológico simplificado da região, destacando a sucessão de *horsts* e *grabens* na Faixa Noroeste Ceará (FNC), segundo Costa *et al.*, 1973. Quadrado representa a cidade de Senador Sá.

Teoria e Método

A anisotropia é a variação, num meio homogêneo, de uma propriedade física com a direção. Na passagem de ondas sísmicas por um meio anisotrópico, ocorre variação da velocidade de propagação com a direção, resultando na observação de uma determinada polarização para o movimento da partícula do solo. Esta polarização dependerá do tipo de onda sísmica em análise, da direção de propagação e das propriedades elásticas do meio que esta atravessou. A maior facilidade em identificar e quantificar a anisotropia sísmica na propagação da onda S faz com que este tipo de onda seja preferencialmente utilizado neste tipo de estudo.

A onda S, ao se propagar num meio anisotrópico, sofre um fenômeno denominado de divisão da onda cisalhante (*shear-wave splitting*), que é semelhante ao fenômeno da birrefringência ótica. Ela se divide em duas novas ondas cisalhantes, que se propagam com velocidades diferentes (S-lenta e S-rápida), e que estão polarizadas em direções ortogonais. Os parâmetros necessários para caracterizar a *shear-wave splitting* são a direção de polarização da onda S-rápida e a diferença temporal entre as onda S-rápida e a onda S-lenta (tempo de atraso normalizado).

O método para visualizar e identificar a divisão da onda S utiliza o diagrama de polarização (DP). O DP é a projeção, sobre um dado plano, de um movimento de partícula em três dimensões, para um intervalo de tempo. Para um dado intervalo, três DPs de planos mutuamente ortogonais mostram todo o movimento de partícula.

Os DPs e o movimento de partícula foram obtidos com o auxílio dos programas computacionais PITSA (*Programmable Interactive Tool for Seismic Analysis* - Scherbaum & Johnson, 1992) e SAC (*Seismic Analysis Code* - Taplay e Tull, 1992). Eles permitem rotacionar os sismogramas horizontais Norte-Sul (NS) e Leste-Oeste (EW), em componentes radiais (R, na direção da linha do epicentro à estação) e transversais (T, ortogonal a R). Uma vez realizada esta rotação, tem-se um novo conjunto de três componentes (Vertical, R, T), ortogonais, como mostra a Figura 2a.

A direção de polarização é obtida através do ângulo do DP da onda S-rápida no plano horizontal somado ao azimute. Para determinar a diferença temporal da onda S dividida é necessário identificar a chegada da onda S-lenta, rotacionando os componentes R e T do sismograma de modo que a energia sísmica chegue primeiro no componente S-rápida (Figura 2b). A chegada da S-lenta é feita no outro componente. Assim, a diferença de tempo entre as chegadas pode ser feita diretamente no sismograma. O DP resultante é mostrado na Figura 2c. Ainda na Figura 2c, a chegada da onda S-lenta é demonstrada pela repentina mudança na direção de movimento de partícula, indicado pela seta.

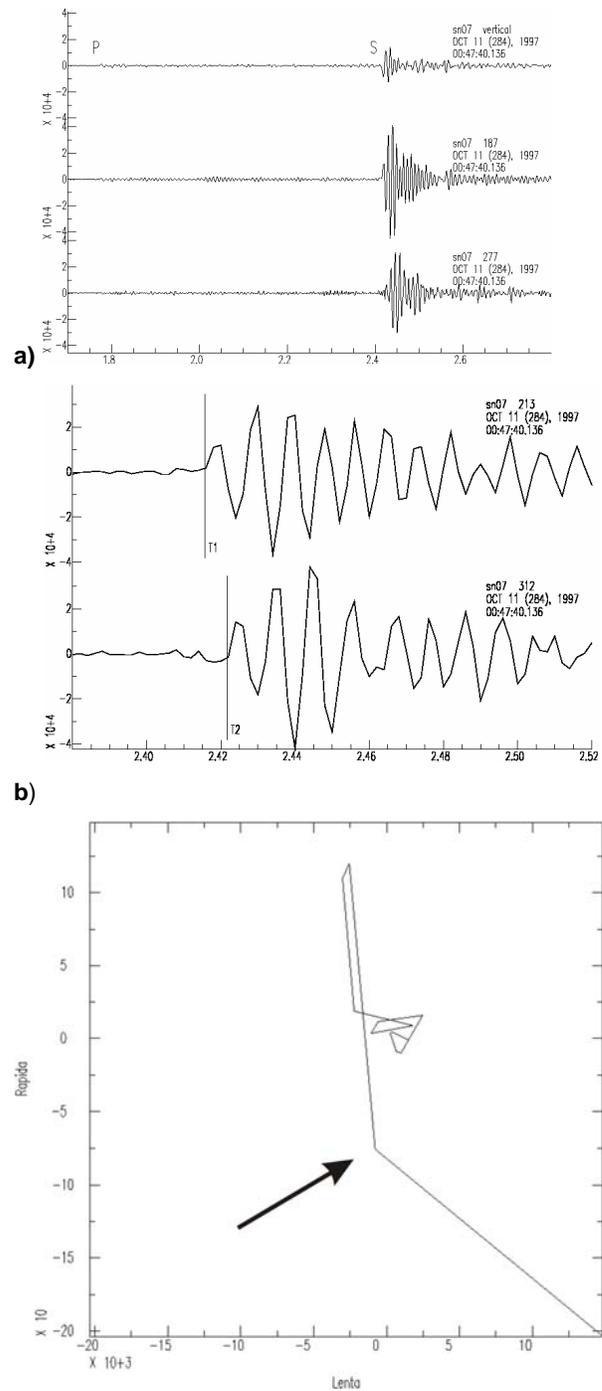


Figura 2 – Exemplo da divisão da onda cisalhante na estação SN07. (a) Componente vertical, seguida por componentes horizontais rotacionadas nas direções Radial (187°) e Transversal (277°). (b) As componentes horizontais são rotacionadas para as direções de polarização das ondas S-rápida e S-lenta. T1 e T2 são as marcas dos tempos de chegada das ondas S-rápida e S-lenta. (c) Diagrama de Polarização (DP) mostrando o movimento de partícula. Seta indicar a chegada da S-Lenta.

Análise dos Dados e Resultados

Os sismogramas utilizados neste trabalho foram coletados por uma rede sismográfica digital composta por sete estações triaxiais, com registrador tipo DAS 72A, e uma estação analógica, com registro em papel enfumacado. A rede digital operou na região de Senador Sá-CE durante o período de junho a novembro de 1997.

De um total de 160 eventos, registrados em pelo menos quatro estações, 28 foram utilizados neste estudo. Na Figura 2 são apresentadas as localizações geográficas da área sísmica, das estações sismográficas e dos epicentros dos eventos utilizados. A Figura 3 mostra os mecanismos de falha obtidos na região em estudo e em áreas vizinhas por Ferreira *et al.* (1998) e França *et al.* (2005).

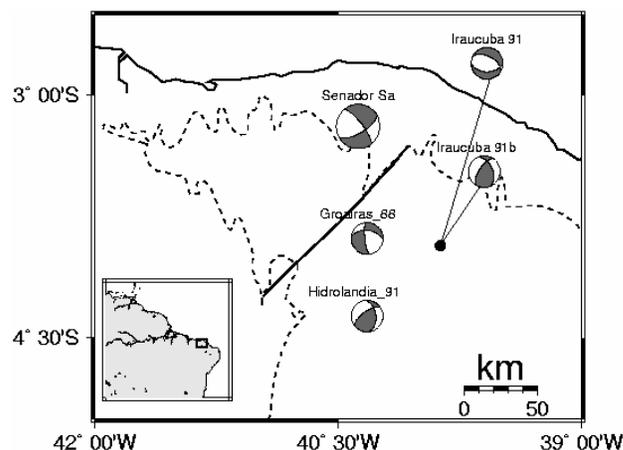


Figura 4 - Mapa contendo os mecanismos focais determinados na região de Senador Sá e áreas vizinhas.

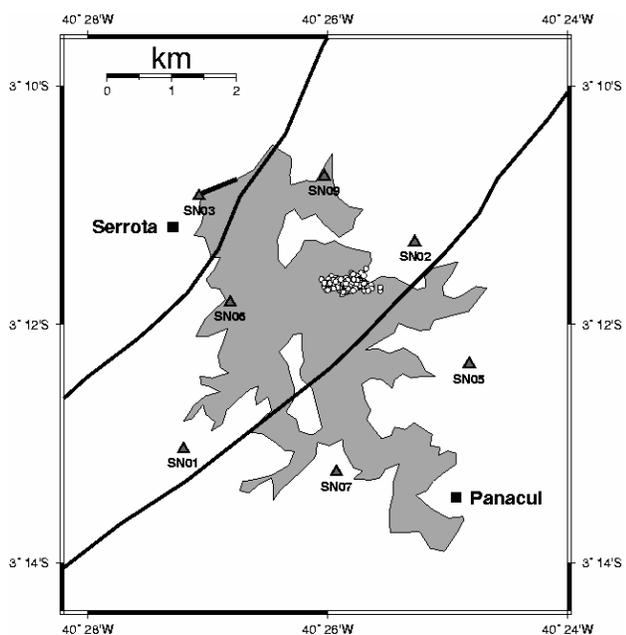


Figura 3 – Mapa mostrando os epicentros (círculos) e as estações (triângulos) utilizados neste estudo. Contorno cinza representa o açude Tucunduba e as linhas grossas são zonas de cisalhamento que cruzam a região.

Para a determinação dos hipocentros foi adotado um modelo de velocidades de semi-espaco com velocidade da onda P crustal igual a 5,95 km/s e valor da razão V_p/V_s igual 1,69 (França 1999, França *et al.*, 2005). Com esses dados, o ângulo crítico que delimita a janela da onda cisalhante utilizável para a análise de anisotropia sísmica é de $36,3^\circ$.

A estação SN01 foi excluída por estar fora da janela cisalhante. Entretanto, as estações SN03, SN06 e SN09 apresentaram distorções na chegada da onda S (sinal não impulsivo) e estão sendo objeto de um estudo mais detalhado. Assim, para uma análise preliminar, objeto deste estudo, somente as estações SN02, SN05 e SN07 foram utilizadas na análise da anisotropia sísmica.

Na estação SN02 não foi observada a divisão da onda S. Portanto, os sismogramas desta estação não serão apresentados. Nas estações SN05 e SN07 foram observadas divisão da onda S. Na estação SN05 a direção de polarização da onda S-rápida é aproximadamente NE e na estação SN07 é aproximadamente NNE. A Tabela 1 mostra as direções de polarização, onde a média é de $60^\circ N \pm 7,8^\circ$ para a estação SN05 e de $14^\circ N \pm 7,25^\circ$ para a estação SN07.

Estação	DP	TN
SN05	$60^\circ N \pm 7,8^\circ$	8,16 ms/km
SN07	$14^\circ N \pm 7,25^\circ$	2,56 ms/km

Tabela 1 – Resultados da direção de polarização (DP) e do tempo de atraso normalizado (TN) para as estações SN05 e SN07.

Com relação ao tempo de atraso normalizado, a estação SN05 apresentou um valor médio de 8,16 ms/km e a estação SN07 de 2,56 ms/km (Tabela 1). A não correlação entre o tempo de atraso normalizado e o azimute é ligeiramente observada. Isto é uma característica da anisotropia e, embora ocorra com os dados analisados, deve-se ter em mente que o intervalo de azimute é pequeno.

Discussões e Conclusões

Do Nascimento *et al.* (2002; 2004) mostraram que a anisotropia crustal na região Nordeste do Brasil, mais especificamente, no estado do Rio Grande do Norte, tem como causa predominante a foliação pré-cambriana, em contraste com a anisotropia de dilatação extensiva (EDA - fraturas e poros alinhados paralelamente ao campo de esforço), que é normalmente observada em várias regiões tectônicas (Crampin, 1987, Crampin & Lovell, 1991).

O alinhamento de fraturas e poros preferencialmente alinhados ao campo de esforço, na EDA, prevêem a polarização da onda S-rápida paralela ao esforço máximo compressivo da região (S_{Hmax}). O campo de esforço, estimado através de mecanismo focal, é bem conhecido. Nas proximidades, o mecanismo focal indica que S_{Hmax} está orientado na direção ESE-WNW (Ferreira *et al.*, 1998; Assumpção, 1998). França *et al.*, (2005) estimaram a direção de S_{Hmax} como sendo 278°. Estes resultados diferem da polarização da onda S-rápida para estação SN05 e SN07 (Tabela 1), sugerindo que o efeito da EDA na região não é dominante.

Entretanto, resultados regionais de fotolineamentos e lineamentos topográficos mostram uma tendência entre NE-NNE, compatível com a polarização das estações (Figura 5). A concordância entre a direção da foliação e a direção de polarização da onda S-rápida também foi observada em Açú e João Câmara (do Nascimento *et al.*, 2002; 2004). Assim, de acordo com essas análises iniciais, a anisotropia sísmica na região de Senador Sá-CE, é controlada pela petrotrama dúctil desta região.

No futuro, analisaremos detalhadamente as estações que apresentaram distorções, ou seja, SN03, SN06 e SN09; em especial, SN06 e SN09 porque estão entre duas zonas de cisalhamento. Isto será muito importante, pois nos dará condições de comprovar, de forma mais segura, que a estrutura tectônica é a causa predominante da anisotropia sísmica na região. Será realizado também um estudo *in situ* dos lineamentos e das foliações desta região.

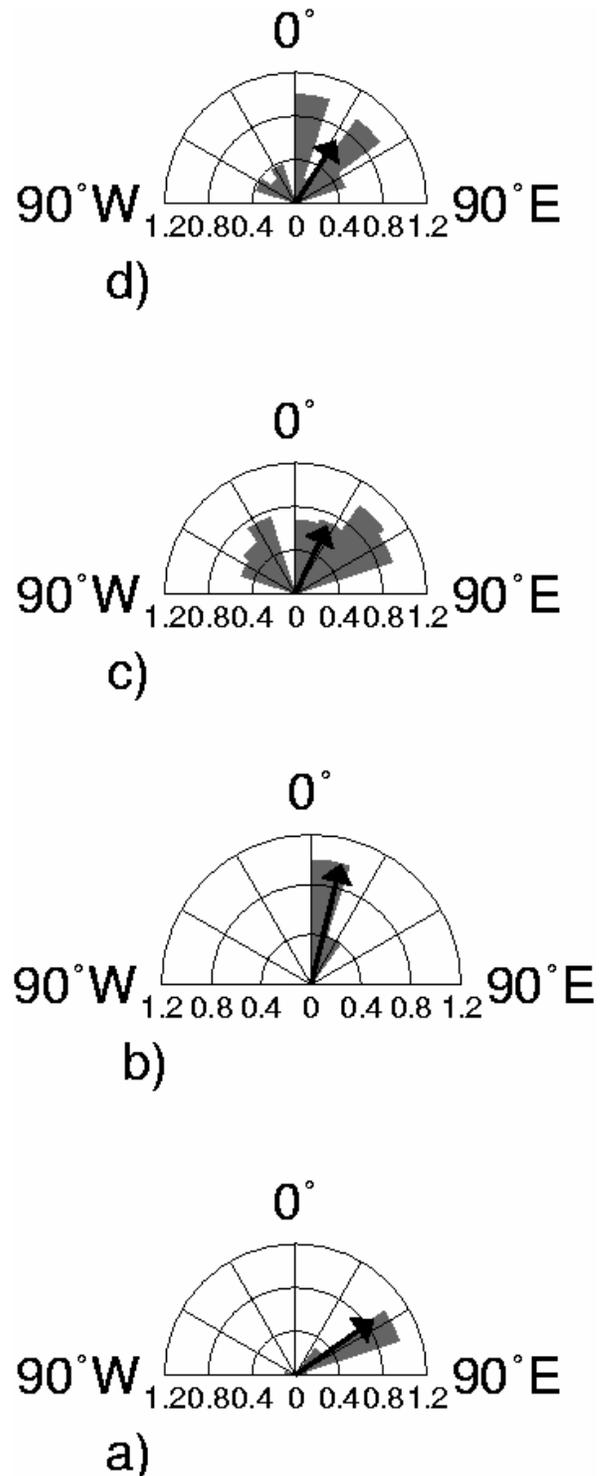


Figura 5 – a) Polarização da onda S-rápida na estação SN05, b) Polarização da onda S-rápida na estação SN07 c) Resultados regionais de Fotolineamentos e d) Resultados regionais de Lineamentos topográficos, mostrando uma preferência na direção NE-NNE.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos Eduardo Alexandre e Carlos dos Anjos pelo trabalho de coleta dos dados e aos órgãos de fomento CNPq, FUNPEC/CONNECIT, FAPERN e FINEP. Algumas figuras foram produzidas com o auxílio do programa GMT (*Generic Mapping Tools* - Wessel & Smith, 1991).

Tapley, W. C & Tull, J. E., 1992, SAC – Seismic Analysis Code: Users Manual, *Lawrence Livermore National Laboratory*, Revision 4, 388p.

Vilar, C. S., 2004, Estrutura Tridimensional da onda S na Litosfera do Nordeste Brasileiro. *Tese de Doutorado*, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 258p.

Wessel, P. & Smith, W. H. F., 1991, Free software helps map and display data, *EOS Trans. Am. Geophys. Un.* **72**, 441.

Referências Bibliográficas

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A., 1981, Brazilian structural Provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.*, **17**: 1-29.

Assumpção, M., 1998, Seismicity and Stresses in the Brazilian Passive Margin. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 160-169.

Brito Neves, B.B., 1978, A propósito da evolução litoestratigráfica do Pré-Cambriano do Nordeste. *J. Mineral.* (vol. Djalma Guimarães), **7**: 19-27.

Costa, M. J., França, J. B., Lins, C. A. C., Bacchiogga, I. F., Cruz, W. B. & Habekost, C. R., 1973, Projeto Jaibaras; Relatório Final, Recife, DNPM-CPRM, 5v.

Crampin, S., 1987, Geological and industrial implications of extensive-dilatancy anisotropy. *Nature*, **328**, 491-496.

Crampin, S. and Lovell, J. H., 1991, A decade of shear-wave splitting in the earth's crust: What does it mean? What use can we make of it? And what should we do next? *Geophys. J. Int.*, **107**, 387-407.

do Nascimento, A. F., Pearce, R. G. and Takeya, M. K., 2002, Local shear wave observations in João Câmara, northeast Brazil. *J. Geophys. Res.*, **107(B10)**, 2232 doi: 10.1029/2001JB000560.

do Nascimento, A. F., Bezerra, F. H. R. and Takeya, M. K., 2004, Ductile Precambrian fabric control of seismic anisotropy in the Açú dam area, northeastern Brazil. *J. Geophys. Res.*, **109**, B10311 doi: 10.1029/2004JB003120.

Feng, M., 2004, Tomografia de Ondas de Superfície na América do Sul: Inversão Conjunta de Velocidade de Grupo e Forma de Onda. *Tese de Doutorado*, IAG/USP, São Paulo, 122p.

Ferreira, J. M., Oliveira, R. T., Takeya, M. K. and Assumpção, M., 1998, Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: Evidence from focal mechanism around the Potiguar marginal basin. *Geophys. J. Int.*, **134**, 341-355.

França, G. S. L. A., 1999, Estudo Sísmico no Açude Tucunduba, Senador Sá, CE, *Dissertação de Mestrado*, PPGG-UFRN, Natal, 85p.

França, G. S., Ferreira, J. M. and Takeya, M. K., 2005, Seismic activity in Senador Sá – CE, Brazil, 1997-1998. Aceito para publicação na *Rev. Bras. Geof.*

Jardim de Sá, E. F., 1994, A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia brasileira/pan-africana. *Tese de Doutorado*, UnB, Brasília, 804p.

Scherbaum, F. & Johnson, J., 1992, PITSA – Programmable Interactive Tool for Seismic Analysis. Version 4.0, 174p.

Souza, J. L. de & Mitchell, B. J., 1998, Lg coda Q variations across South America and their relation to crustal evolution. *Pure Appl. Geophys.*, **153**, 587-612.