

# Estrutura da plataforma continental do sudeste com ondas de superfície do sismo de S. Vicente de 2008: primeiros resultados

Paula Gomes de **Carvalho**<sup>1\*</sup> & Marcelo **Assumpção**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduação em Geofísica – IAG/USP. E-mail: [paula@iag.usp.br](mailto:paula@iag.usp.br)

<sup>2</sup> Departamento de Geofísica – IAG/USP. E-mail: [marcelo@iag.usp.br](mailto:marcelo@iag.usp.br)

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at 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. 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

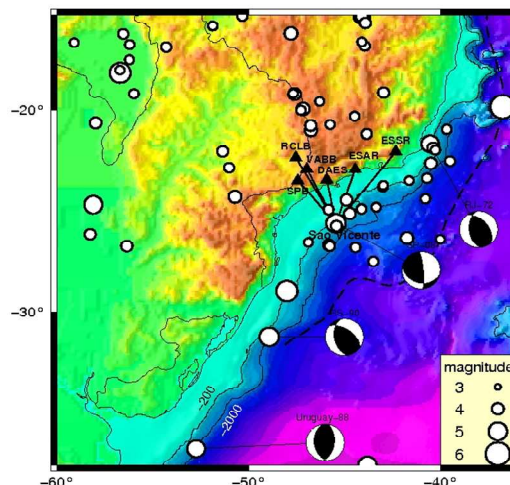
We present the first results of a study about the structure of the continental shelf in SE Brazil. We use records of the earthquake occurred in 2008 near São Vicente, São Paulo's southern coast. The surface waves (Love and Rayleigh) show variation of velocity with the period (dispersion) that is being analyzed using five seismographic stations located in Brazilian SE. The preliminary results shown in this paper are compared with velocities found by Feng et. al., 2007 et. al. (2007) for the periods of 10, 20 and 30s. We also obtained the velocity profile for the ESAR station (Angra dos Reis, RJ - Brazil) using the velocity inversion (Herrmann & Ammon, 2002). The velocities in the continental crust are larger than the oceanic crust velocities and also indicates that the Santos Basin's basement is about 12 kilometers deep. The velocity inversion of the others stations will be made in the future, as well as the study of the focal mechanism of the earthquake.

## Introdução e objetivos

O sismo ocorrido em 22 de abril de 2008 no Oceano Atlântico, a 270 km da cidade de São Vicente, litoral Sul de São Paulo, foi sentido em várias cidades e registrado por diversas estações sismográficas brasileiras. O tremor (de 5,2 graus na Escala Richter) ocorreu na Bacia de Santos, que é uma ampla bacia sedimentar pertencente à Margem Sudeste Brasileira, localizada entre as bacias de Campos, a norte, e de Pelotas, a sul. O arcabouço dessa bacia é composto por uma coluna evaporítica, depositada durante a separação África – América do Sul, bem preservada in situ em algumas áreas, que foi formada devido à alta taxa de subsidência que levou a acumulação de mais de 2.000 metros de sais em menos de um milhão de anos (Mohriak, Szatmari & Anjos, 2008).

Como principais objetivos do trabalho podemos apontar o estudo da estrutura da crosta na plataforma continental e o mecanismo de falhamento do sismo de São Vicente. Como se sabe, os maiores campos produtores de petróleo do Brasil estão localizados na plataforma e perto do talude (águas profundas). Desse modo, este projeto visa subsidiar estudos sobre a sismicidade dessas áreas

da costa leste brasileira (estimando o risco sísmico, além de auxiliar na localização de epicentros na costa leste brasileira), utilizando os registros de ondas de superfície (Love e Rayleigh) geradas pelo sismo de São Vicente (registradas por estações mostradas na Figura 1) e suas variações de velocidade com o período (dispersão). Além de, posteriormente, utilizar o modelamento das formas de onda para determinar o mecanismo focal do sismo, com a finalidade de obter mais informações sobre a estrutura da crosta da plataforma continental e do talude da costa brasileira.



**Figura 1:** Sismos ocorridos no SE (círculos brancos), com destaque para o de São Vicente. Também estão plotadas as estações (triângulos pretos) analisadas. Os diagramas “beach-balls” são estimativas de mecanismos de sismos maiores, indicando predominância de falhamentos inversos. A linha tracejada no oceano mostra o limite entre crosta continental esticada (e submersa) e crosta oceânica.

## Metodologia

Os sismogramas originários de um terremoto são dominados por ondas de longo período e maior amplitude que chegam depois das ondas de corpo Primárias (P) e Secundárias (S). Essas ondas são denominadas ondas de superfície e possuem a energia concentrada próxima a superfície da Terra (Stein & Wysession, 2003).

Podem ser de dois tipos: Love e Rayleigh e são trens de ondas que têm um poder de destruição maior do que as ondas P e S. As ondas Love correspondem à sobreposição de ondas SH (componente horizontal das ondas S) com vibrações horizontais concentradas nas

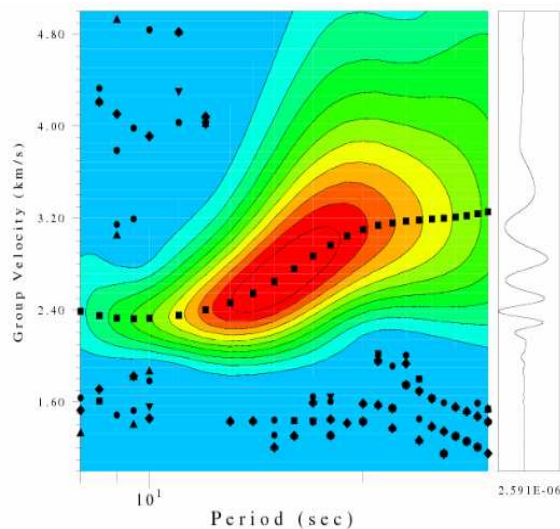
camadas mais externas da Terra. Já a onda de superfície Rayleigh é uma combinação de vibrações P e SV (componente vertical das ondas S) contidas no plano vertical.

A respeito desse tipo de onda, podem ser considerados dois tipos de velocidades: de Fase (velocidade com que cada pico de onda se propaga no espaço) e de Grupo (velocidade com que o grupo de ondas se propaga como um todo no espaço).

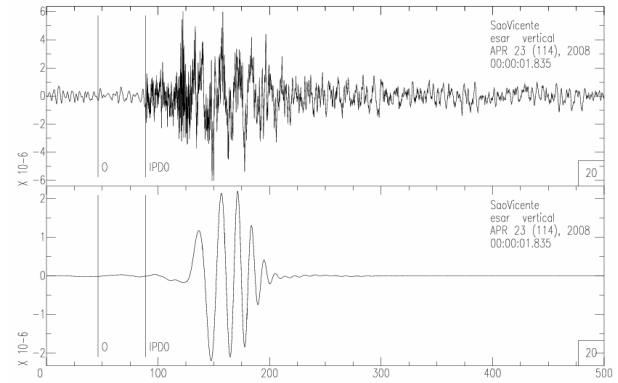
A velocidade de propagação das ondas de superfície varia com o período. Essa variação depende do intervalo amostrado em profundidade por cada período. Isso faz com que a dispersão dessas ondas tenha papel importante no estudo da estrutura da Terra. Períodos maiores geralmente apresentam maiores velocidades e são registrados primeiro, pois como são proporcionais ao comprimento de onda, amostram maiores profundidades, que possuem velocidades de propagação das ondas sísmicas superiores (Stein & Wysession, 2003).

Nessa primeira etapa do processamento dos dados, além pacote de Herrmann & Ammon (2002) utilizado para a construção das curvas de dispersão da onda Rayleigh (Figura 2) e também para a inversão de velocidade em profundidade, foi utilizado o programa SAC (Seismic Analysis Code) para a análise dos sismogramas (Figura 3).

Foram analisados dados de cinco estações (todas localizadas na porção SE do Brasil): ESAR (Rio de Janeiro), ESSR (Espírito Santo), RCLB (São Paulo), SPB (São Paulo) e VABB (São Paulo) mostradas na Figura 1. Os valores de velocidades de grupo encontrados também foram comparados com os analisados por Feng (2007) em seu trabalho.



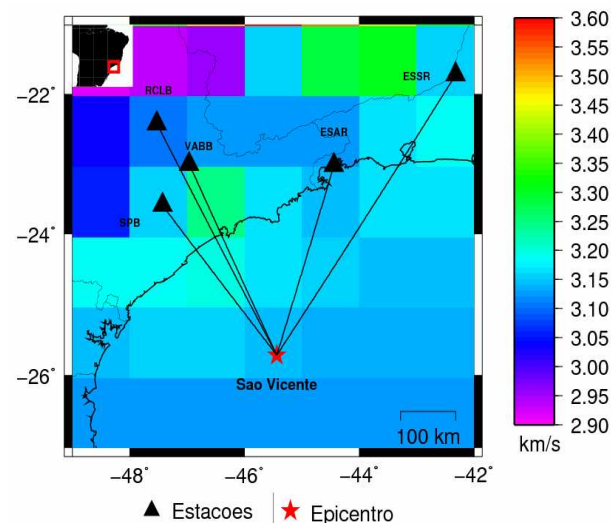
**Figura 2:** Exemplo da Curva de Dispersão gerada pelo pacote de Herrmann & Ammon (2002) para a estação ESAR (onda Rayleigh). Cores quentes representam períodos de maior energia da onda de superfície. Essa curva foi invertida para a construção do perfil de velocidade.



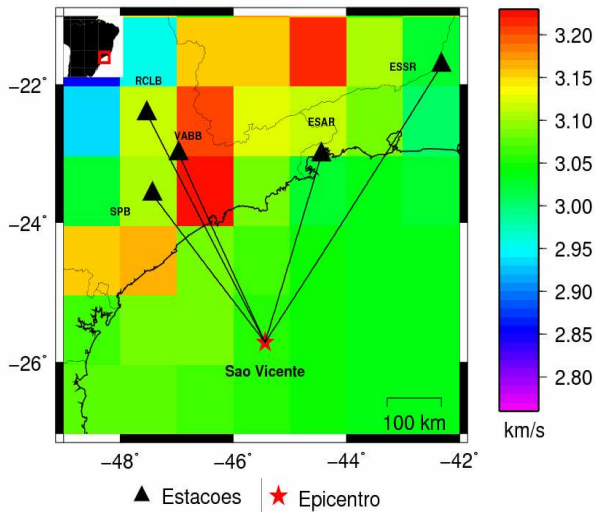
**Figura 3:** Sismograma filtrado para estação ESAR. O traço de baixo é o resultado do filtro match que passa apenas a onda Rayleigh definida na Figura 2. Nota-se que períodos maiores das ondas de superfície apresentam maiores velocidades, pois amostram interfaces mais profundas.

### Tratamento e interpretação dos dados

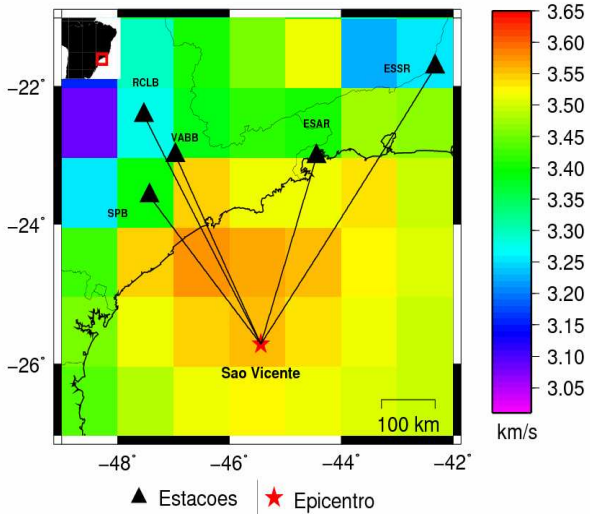
Utilizando os valores de velocidades de grupo da onda Rayleigh encontrados em Feng et. al. (2007) para períodos de 10, 20 e 30s (mostrados nas Figuras 4a, 4b e 4c) para a região do sismo de São Vicente, foram calculadas médias dessas velocidades de propagação (Figura 5a) das ondas de superfície somente na parte continental (ou seja, a partir do limite oceano - continente) para as estações analisadas, exceto ESAR, e foi construído um perfil de velocidade x profundidade (Figura 5b), através um modelo geológico fixado a priori que forneceu o melhor ajuste dos dados através da curva de dispersão, mostrada na Figura 5a.



(a) T= 10s

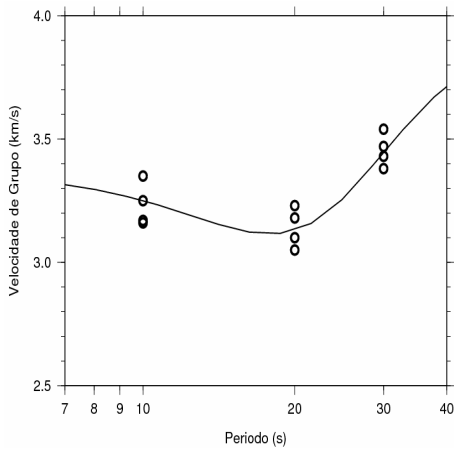


(b) T= 20s

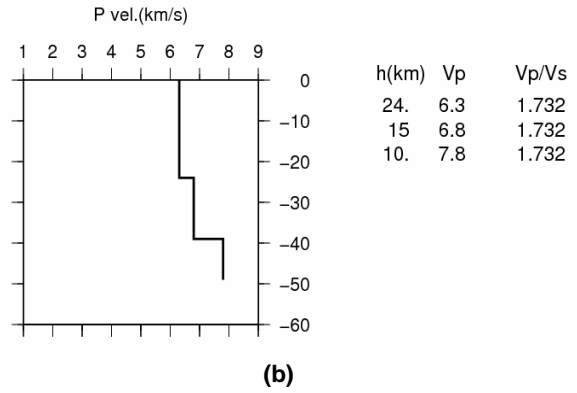


(c) T= 30s

**Figura 4:** Velocidades encontradas por Feng et. al., 2007 para o períodos de (a) 10s, (b) 20s e (c) 30s, numa grade que varia de 1 em 1 grau.



(a)

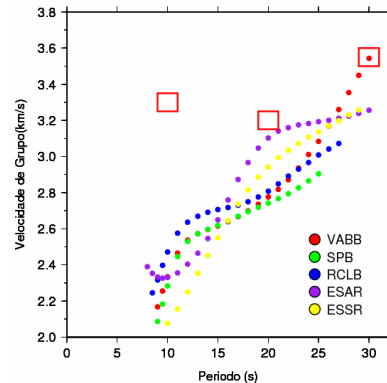


(b)

**Figura 5:** (a) Curva de dispersão. Círculos representam os valores médios das velocidades de grupo para a onda Rayleigh na parte continental e foram obtidos de Feng et. al. (2007). (b) Modelo Geológico da crosta continental, fixado.

Na figura acima, pode ser observado que o modelo geológico simples para uma crosta continental, fixado a priori, que melhor se ajustou aos dados de velocidades médias no continente apresenta três nítidas camadas: a primeira com velocidade média das ondas P de 6,3 km/s, correspondendo à crosta superior; abaixo a crosta inferior com espessura de 15 km e velocidade de 6,8 km/s) e por fim a aproximadamente 39 km a divisão crosta – manto, caracterizada pelo brusco aumento de velocidade, onde a velocidade das ondas P passa para 7,8 km, correspondendo ao início do manto superior.

As curvas de dispersão obtidas com o pacote de Herrmann & Ammon (2002) mostram que existe uma variação entre os resultados para estação com o percurso das ondas somente no oceano e com o percurso tanto no oceano quanto no continente, como pode ser visto na Figura 6, evidenciando uma diferença de composição geológica entre os percursos das ondas até serem registrados pelas estações. Os valores encontrados por Feng (2007) para períodos de 10, 20 e 30s (já vistos anteriormente na Figura 4a, 4b e 4c) também estão representados por quadrados vermelhos e são uma média da velocidade da onda Rayleigh no trajeto dentro do continente para cada um dos períodos representados abaixo.



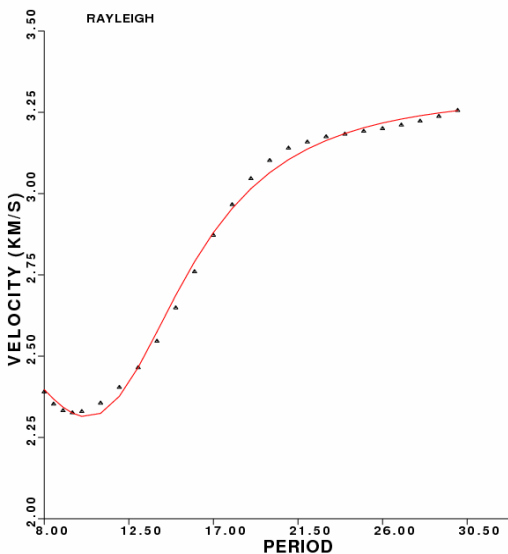
**Figura 6:** Curvas de Dispersão para a onda Rayleigh para o sismo de São Vicente. Quadrados vermelhos são os valores de velocidade encontrados por Feng et. al. (2007) para os períodos correspondentes a 10, 20 e 30s.

Nota-se que a estação ESAR é a que apresenta maior diferença nos valores de dispersão em relação às demais estações. Isso porque o percurso epicentro-ESAR é somente no oceano, ao passo que das demais estações foi um percurso misto oceano mais continente.

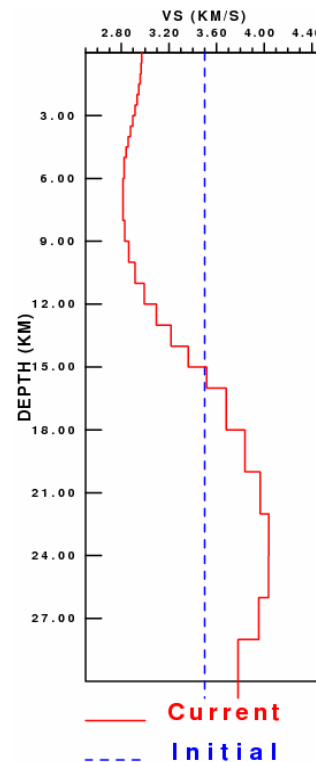
As velocidades apresentadas por Feng para os períodos de 10, 20 e 30s (representadas pelos quadrados vermelhos na Figura 6) são maiores do que as medidas aqui, pois as velocidades das ondas de superfície encontradas por Feng são praticamente uma média da velocidade continental (há menor precisão dos dados a partir do limite crostas oceânica – continental), ao passo que as calculadas nesse trabalho correspondem a uma média entre velocidade continental e velocidade oceânica (evidenciando que a velocidade de propagação das ondas de superfície em estruturas oceânicas é menor do que em continentais).

Desta forma, tendo-se em mãos valores encontrados para as velocidades de grupo das ondas de superfície no continente (obtidos de Feng et. al., 2007) e também no percurso oceano mais continente, do sismo de S. Vicente, futuramente serão obtidas as velocidades somente no oceano para todas as estações analisadas. Essas velocidades, quando invertidas, fornecerão a estrutura média da plataforma continental.

Com o pacote de Herrmann & Ammon (2002) (utilizando os dados de dispersão das ondas Rayleigh) foi feita a inversão de velocidade de grupo inicialmente somente para a estação ESAR. A escolha da inversão para essa estação reside no fato de ela ser a única com percurso das ondas de superfície somente em área oceânica (que consiste no principal objeto de estudo desse trabalho). O ajuste dos dados pela curva de dispersão, bem como a inversão realizada podem ser vistos nas Figuras 7 e 8, respectivamente (para o modelo inicial foi usada uma velocidade constante de 3,5 km/s para a onda S para todas as camadas).



**Figura 7:** Curva de dispersão gerada pelo programa Surf96 e utilizada para a inversão de velocidade em profundidade mostrada na Figura 8. Linha vermelha corresponde ao melhor ajuste dos dados (triângulos pretos) para estação ESAR.



**Figura 8:** Perfil de velocidade gerado através do programa Surf96 (Herrmann & Ammon, 2002) para dados de dispersão da estação ESAR. Linha azul é o modelo inicial, linha vermelha é o modelo final.  $V_s = 3,5$  km/s do modelo inicial corresponde à velocidade esperada do embasamento da crosta superior.

Analisando-se a Figura 8, pode-se identificar o início do embasamento da plataforma continental entre 12 e 15 km, onde já se pode observar uma velocidade das ondas S na faixa de 3,5 km/s, que é uma velocidade típica em rochas cristalinas, sendo o início da crosta. Os primeiros 12 km correspondem à camada de sedimentos da plataforma.

### Conclusões preliminares e perspectivas futuras

Modelo geológico fixado (5b) para se ajustar a curva de dispersão mostrada em 5a, sugere uma espessura média de 39 km da crosta continental, tendo velocidades da onda P variando de 6,3 a 6,8 km/s para crosta superior e inferior, respectivamente.

Resultados obtidos da comparação dos valores da velocidade de propagação das ondas de superfície Rayleigh através do sismo de São Vicente com os mostrados em Feng et. al. (2007) indicam que a velocidade de propagação das ondas na crosta continental é maior do que na crosta oceânica.

O uso do Pacote de Herrmann & Ammon (2002), permitiu a inversão de velocidade para a estação ESAR, podendo ser inferido uma camada de 12 a 15 km de espessura de sedimentos. O início da crosta pode ser identificado na faixa da velocidade da onda S de 3,5 km/s, velocidade correspondente à de rochas cristalinas. A espessura da

crosta não pôde ser definida, pois os períodos observados não foram grandes o suficiente ( $T \leq 30s$ ).

Futuramente, as demais estações também serão utilizadas para a realização da inversão de velocidade através da “remoção” da parte continental do trajeto epicentro – estação, obtendo-se um perfil de velocidade x profundidade somente para a plataforma continental, principal foco de estudo desse trabalho, podendo-se desta forma, possivelmente, conseguir informações mais confiáveis sobre a espessura média do pacote de sedimentos.

### **Referências**

**Feng et. al., 2007, M', S. Van der Lee and M. Assumpção, 2007.** Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental-mode group velocities of Rayleigh waves. J. Geophys. Res., 112, B04312, doi:10.1029/2006JB004449.

**Herrmann, R.B. and Ammon, C.J., 2002,** Computer Programs in Seismology, Vol. IV, St. Louis University, Missouri.

**Mohriak, W.; Szatmari, P; Anjos, S. M. C.:** SAL: Geologia e Tectônica – exemplos nas Bacias Brasileiras. 2008.

**Stein & Wysession,** An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure. 2003.

**University of California,** SAC – Seismic Analysis Code: version 101.1.

### **Agradecimentos**

Ao IAG/USP pela infra-estrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa, à ANP (PRH-19) pela bolsa de Iniciação Científica para Paula Gomes de Carvalho e ao Grupo de Sismologia do IAG.