



## Influência das heterogeneidades randômicas na formação do traço sísmico

Alex Tito de Oliveira (PPGG/ UFRN e INCT-GP)\* e Walter Eugênio de Medeiros (DGEF-PPGG/ UFRN e INCT-GP)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no XV Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica sediado no Rio de Janeiro, Brasil, 31 Julho a 3 de Agosto de 2017.

Seu conteúdo foi revisado pelo comitê técnico do XV Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou dos seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem previa autorização da SBGf.

### Resumo

A resolução sísmica mede a capacidade de identificar ou individualizar camadas a partir das ondas refletidas nas interfaces das camadas. É usual caracterizar a resolução sísmica a partir do comprimento de onda dominante do pulso sísmico, tomando comprimentos de cerca de metade (ou um quarto) do comprimento de onda. Em princípio, heterogeneidades de espessura abaixo deste limiar, ou heterogeneidades subsísmicas, não poderiam ser detectadas individualmente. É possível, entretanto, estimar propriedades estatísticas dessas heterogeneidades através do efeito provocado pelas mesmas na formação da coda sísmica. Nesse estudo, utilizaremos uma modelagem sísmica simplificada do traço sísmico incluindo o efeito das heterogeneidades subsísmicas, de modo a demonstrar, através da análise, do espectro de potência do traço, o efeito produzido por heterogeneidades subsísmicas na formação da coda sísmica.

### Introdução

Na área de exploração sísmica, a Terra é muitas vezes compreendida como uma série de camadas homogêneas e isotrópicas. Essa forma de aproximação teórica faz com que os modelos não levem em conta as heterogeneidades de pequena escala as quais consideramos como estruturas subsísmicas (Ikelle, 1993).

É comum se admitir que as técnicas clássicas da sísmica tais como a inversão, a migração ou a tomografia de reflexão, não são bem adaptadas para recuperar distribuições de parâmetros com comprimentos característicos muito pequenos, já que essas técnicas tem por finalidade a reconstituição de heterogeneidades com dimensões acima da resolução sísmica. Assim sendo, uma grande parte do sinal subsequente não é usado e é considerado como ruído (Jannaud, 1993).

No entanto essa parte do sinal não é ruído porque ela é reproduzível, na verdade ela possuía características de coda (Jannaud, 1993). Todavia os estudos relacionados à coda sísmica ainda não foram tão explorados, pelo menos no que diz respeito à sísmica de exploração.

O conceito de coda vem sendo predominantemente aplicado na Sismologia para se referir a um trem de ondas que ocorre na cauda do registro sísmico, em associação com ondas transmitidas. Nesse texto, vamos utilizar o termo coda e não cauda, pelo fato do primeiro ser de uso mais comum. Além disso, neste trabalho utilizaremos esse termo para se referir a um trem de ondas registrado na sísmica de reflexão, que ocorre entre chegadas associadas a eventos dominantes, seguindo a mesma abordagem de Willis e Burns (2006) e Robertsson e Laws (2006). Por vez, na sísmica de reflexão, é também usada a expressão “*ringing tail of scattered energy*” (Willis e Burns (2006).

Gibson (1988) argumentou que do ponto de vista teórico toda a teoria de coda baseada em espalhamento simples, desenvolvida por Aki e Chouet (1975) poderia ser

aplicada para espalhamento produzido por reflexão. Nesse trabalho, usaremos essa abordagem.

As codas têm atraído atenção devido a trabalhos que apontam que a sua formação está relacionada ao espalhamento da frente de onda em pequenas flutuações de velocidade consideradas subsísmicas (Jannaud, 1993). Dessa forma, para se compreender algumas informações da coda sísmica se faz necessário um modelo que integre os pacotes de camada com as pequenas heterogeneidades em grande escala. Nesses casos, as camadas geológicas serão representadas pelos pacotes de camadas, enquanto as estruturas subsísmicas, por sua vez, serão representadas por pequenas heterogeneidades, as quais se manifestam numerosas e distribuídas irregularmente (Jannaud, 1993).

Tendo em vista os aspectos anteriormente mencionados, vamos estabelecer os seguintes objetivos neste trabalho:

- 1) criar modelos sintéticos que integrem grandes e pequenas heterogeneidades;
- 2) destacar os traços gerados por tais modelos;
- 3) comparar os traços na tentativa de evidenciar diferenças;
- 4) identificar as codas sísmicas correspondentes aos traços analisados;
- 5) analisar o espectro de potência das codas sísmicas.

### **Coda Sísmica**

Keiiti Aki foi o primeiro pesquisador a propor uma teoria de explicação da coda. Elas foram caracterizadas como o resultado do retroespalhamento de ondas sísmicas por pequenas heterogeneidades que estavam distribuídas aleatoriamente na crosta e no manto superior. Embora as codas estejam relacionadas com pequenas heterogeneidades, nem sempre haverá, contudo, a possibilidade de sua existência, já que nem sempre o meio responderá com reflexões individuais nas pequenas heterogeneidades.

Segundo Imhof (2003) a influência de camadas no traço sísmico pode ser entendida de acordo com a relação entre comprimento de onda e espessura das camadas. Ele distinguiu três situações básicas, que estão ilustradas na Figura 1.

Quando a espessura da camada for muito maior que o comprimento de onda modelo A, se tem a situação ideal da sísmica de reflexão, teremos no traço um pulso isolado associado a cada interface.

Já no modelo B, temos a espessura das camadas internas da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda, que é a situação que possibilita a existência das codas, já que o meio irá responder à propagação da onda, ainda ocorrendo reflexões relacionadas as pequenas camadas, mas sem individualizá-las claramente.

Contudo no modelo C, as camadas são muito finas, quando comparadas ao comprimento de onda, de modo que não ocorreram reflexões individuais relacionadas a essas camadas de maneira que o pacote de camadas se comportará como um meio homogêneo e anisotrópico (Backus, 1962).

### **Metodologia**

A metodologia utilizada nesse trabalho leva em consideração a validação da teoria aplicada por Jannaud (1993) para ondas transmitidas, ao qual ele utilizou um coeficiente de retroespalhamento baseando-se na incidência da onda P e no espalhamento medido na onda P. Esse coeficiente é obtido a partir da solução da onda elástica através da soma da onda incidente e da onda espalhada.

Ikelle (1993) propôs que para obtermos algumas informações da coda sísmica seriam necessários modelos que integrassem os pacotes de camadas com as pequenas heterogeneidades. Baseando-se na proposta de Ikelle, foram elaborados alguns modelos

geológicos sintéticos na tentativa de se obter as características das codas (figuras 2, 3 e 4), em seguida foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Utilização da modelagem acústica bidimensional, para simular a propagação das ondas através de um arranjo end-on com 3 fontes e 309 receptores em cada um dos modelos (figura 5)
- 2) Com o objetivo de se analisar o efeito produzido pelas heterogeneidades no traço sísmico, foi isolado um traço de cada modelo, mas precisamente um traço de mesmo offset para critério de comparação.
- 3) Análise do efeito produzido pelas heterogeneidades subsísmicas sobre o espectro de amplitude de cada um dos meios.
- 4) Modelagem do pulso da fonte, através da expressão analítica de Ricker, para critério de comparação com pulso referente à primeira chegada do modelo homogêneo.
- 5) Comparação com objetivo de diferenciar a Coda de ruídos que neste trabalho podem ser considerados flutuações numéricas devido a pequenos erros de modelagem.
- 6) Após a identificação das codas, foram realizados novos cortes nos traços sísmicos, dessa vez com o objetivo de isolar apenas a região do traço referente à coda.
- 7) Geração dos espectros de potência da coda.
- 8) Normalização dos espectros de potencia da coda pelo espectro de potência da fonte, sendo realizada um deconvolução no domínio da frequência.

## Resultados

Analisando os traços obtidos através das modelagens foi possível verificar a presença das codas nos modelos que possuem heterogeneidades subsísmicas (figura 6).

A comparação entre os traços de mesmo offset dos diferentes modelos da relevância as codas presentes nos demais modelos quando comparados à inexistência de codas no Modelo 1 sem heterogeneidades, onde essa

comparação mostrar nitidamente que as heterogeneidades subsísmicas possuem influencia significativa sobre a formação do traço sísmico (figura 7).

Uma comparação entre o espectro do pulso da primeira chegada, e o espectro modelado através da expressão analítica Ricker, possibilita afirmar que o espectro da primeira chegada é equivalente ao pulso da fonte. Além disso, os resultados apresentados possibilitaram verificar a influência das codas sobre o espectro de amplitude, onde as codas agem ocasionando deformações no espectro, com aumentos e diminuições na sua amplitude, ao qual podemos estar relacionando aos diversos espalhamentos existentes (figura 8).

A normalização do espectro de potencia da coda através da divisão pelo espectro de potencia da fonte e pelo valor máximo de suas potências, possibilitou obter a função refletividade no domínio da frequência responsável pelo espalhamento das codas.

Analisando o espectro das codas normalizados, é possível perceber que os espectros são:

- 1) Diferentes e reproduzíveis.
- 2) As mudanças são maiores nas maiores frequências.
- 3) Em principio é possível estimar parâmetros médios ou efetivos a partir da modelagem do espectro com um modelo estatístico equivalente (Jannaud, 1993).

## Conclusões

A modelagem acústica realizada permitiu caracterizar a influência na coda formada por diferentes modelos sintéticos, foi possível verificar que o espectro de amplitude de cada um dos meios, também sofre influência das codas. Neste trabalho mostramos que são aplicáveis os conceitos das codas de transmissão, para as codas de reflexão. E que o espectro da primeira chegada é válido como uma ótima aproximação do espectro da fonte.

A análise dos espectros de potência das codas possibilitou obter a função refletividade no domínio da frequência que associado as codas é a responsável pelo espalhamento. Os resultados obtidos por esse trabalho revelam que tanto a coda do traço sísmico como os espectros de potência incorporam características que estão associadas às heterogeneidades subsísmicas.

### Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. Jesse Costa da UFPA por ter cedido o algoritmo de modelagem acústica para o desenvolvimento deste trabalho. E ao Instituto Nacional de Ciências e tecnologia em Geofísica do Petróleo INCT- GP/CNPq pelo subsídio para pesquisa. Agradecemos também a toda estrutura oferecida pelo Departamento de Geofísica (DGEF/ UFRN).

### Referências

Jannaud, L.R., Adler, P.M., Jacquin, C.G, 1993. Spectral analysis and inversion of experimental codas: *Geophysics*, 58(3), 408-418.

Ikelle, L.T., Yung, S.K., Daube, F, 1993. 2-D Random media with ellipsoidal autocorrelation functions: *Geophysics*, 58(9), 1359-1372.

Willis, E.M., Burns, R.D., Rao, R.; Minsley, B., Toksoz, N.M., Ventri, L., 2006. Spatial orientation and distribution of reservoir fractures from scattered seismic energy: *Geophysics*, 71(5), 43-51.

Burns, R.D., Willis, E.M, 2007. Fracture properties from seismic scattering: The leading Edge, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA., Laura Ventri, ENI/Agip, San Donato, Italy.

Robertsson, J.O.A., Laws, R., Chapman, C., Vilotte, J.P., Delavaud, E., 2006. Modeling of scattering of seismic waves from a corrugated rough sea surface: a

comparison of three methods: *Geophys. Journal International*, 167, 70–76.

Thorbecke, JAN., Wapenaar, K., Draganov, D, 2003. From reflection data to transmission coda: EAGE, 65, Conference and Technical Exhibition, Stavanger, Norway.

Inhof, M.G, 2003. Scale dependence of reflection and transmission coefficients: *Geophysics*, 68(1), 322-336.

Gibson, B.S, 1988. Comparison of amplitude decay rates in reflection, refraction and local earthquake records: Keiiti Aki and Ru-Shan Wu, *Scattering and Attenuations of Seismic Waves*, 128(1), 309-331

Backus, G.E, 1962. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering: *Journal of Geophysical Research*, 67(11), 4427-4440.

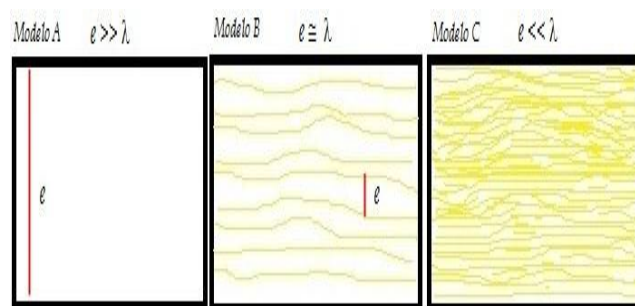


Figura 1: Relação das espessuras com o comprimento de onda.

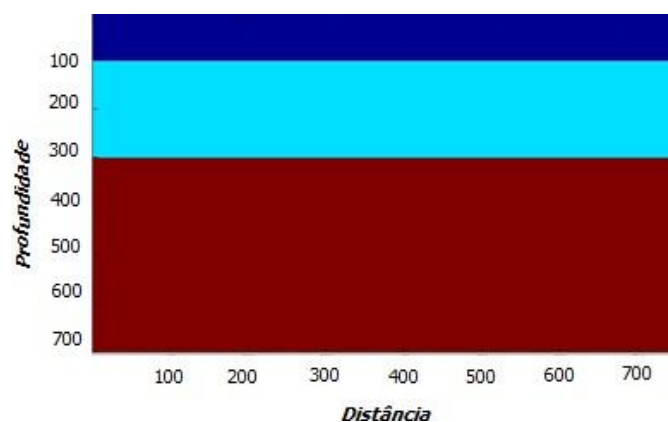


Figura 2: Modelo 1, sem heterogeneidades randômicas.

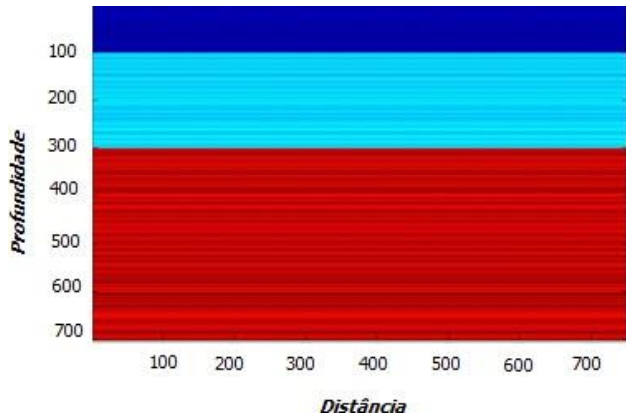


Figura 3: Modelo 2, com heterogeneidades em forma de estratificações.

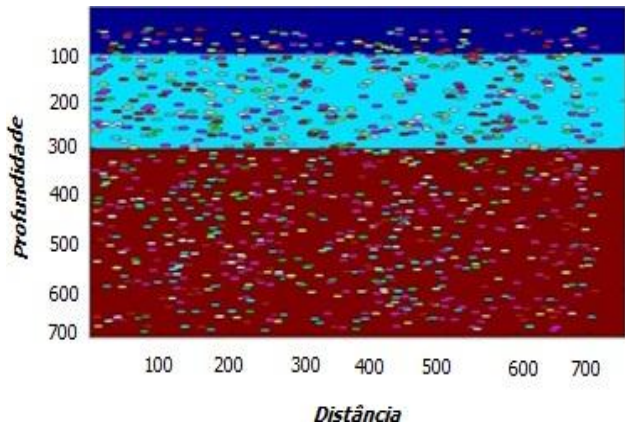


Figura 4: Modelo 3, com heterogeneidades elipsoidais.

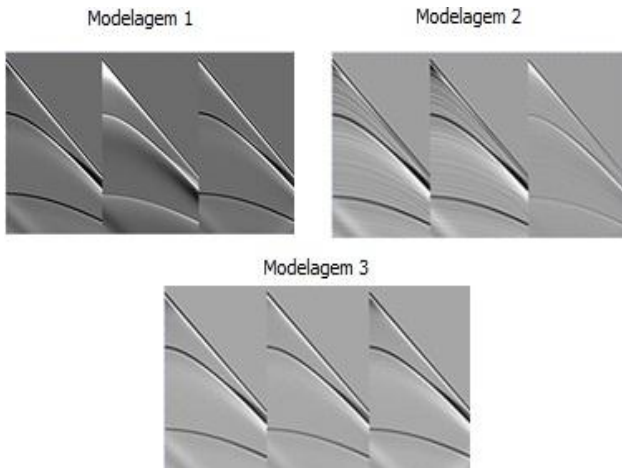


Figura 5: Modelagem Acústica para cada um dos modelos.

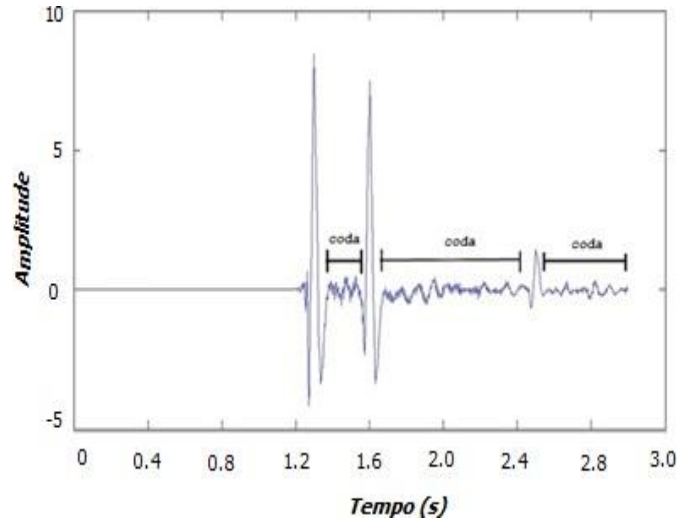


Figura 6: Amostragem das codas do traço de offset 500 da Modelagem 3.

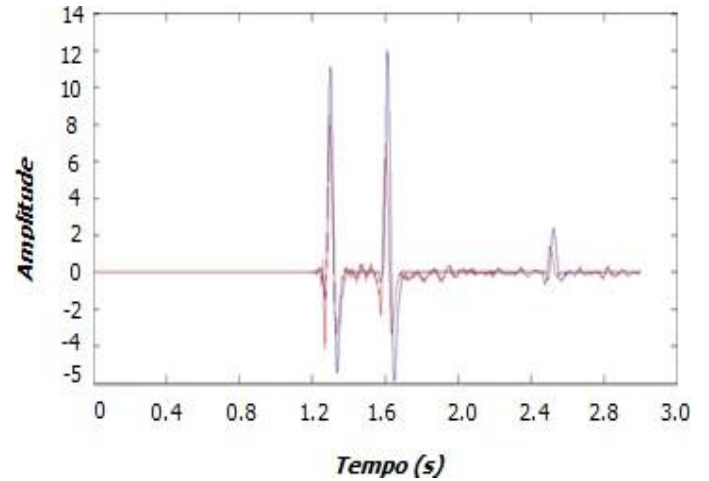


Figura 7: Comparação entre os traços do Modelo 1 em azul e Modelo 3 em vermelho.

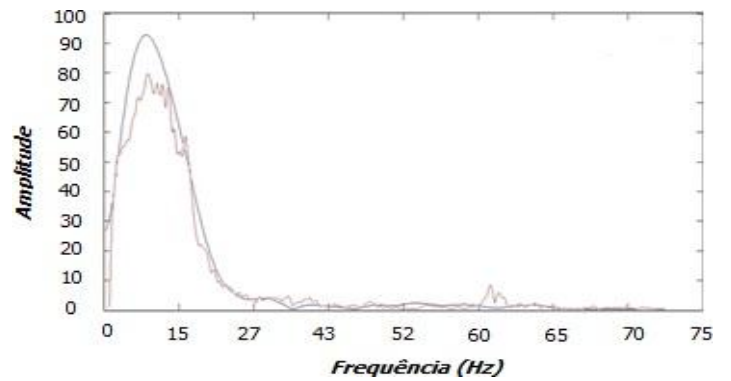


Figura 8: Comparação entre os espectros de amplitude das reflexões na segunda interface do Modelo 1 em azul e Modelo 2 em vermelho.

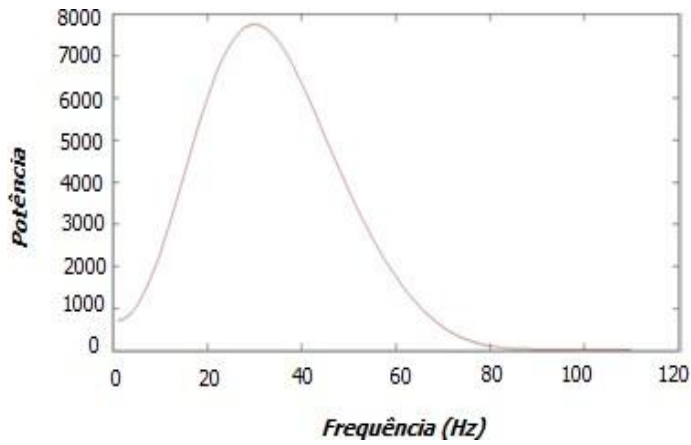


Figura 9 : Espectro de Potência do pulso referente a reflexão na primeira interface do Modelo 1

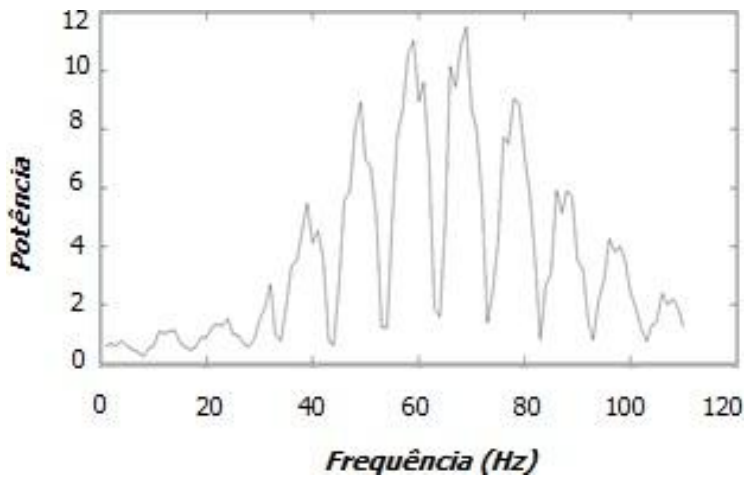


Figura 10: Espectro de Potência da coda do segundo meio do Modelo 3.

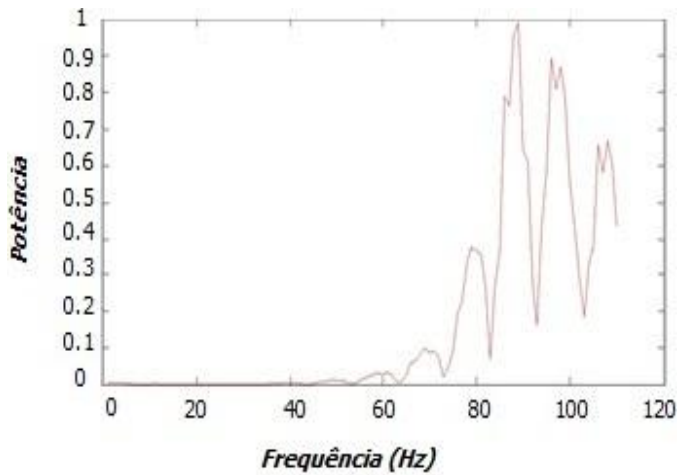


Figura 11: Espectro de Potência normalizado da coda do segundo meio do Modelo 3.