



# Influência da Orientação do Eixo de Simetria na Análise de AVO/AVA em Meios Anisotrópicos

Telesson Neves Teles e Claudio Florida

CPGG/DEE/UFBA

## ABSTRACT

Anisotropy is characterized by the angular dependence of the kinematical and dynamical quantities. In this way, any rotation applied to an anisotropic medium can result in expressive changes in these quantities when observed from a fixed reference system. This is the case for the so called true amplitude computations, as the AVO and AVA analysis in anisotropic media. In particular, the amplitude in a general stratified anisotropic medium depends on directivity of the source, geometrical spreading and reflection coefficients. Generally, all these three quantities have strong angular dependence, such that the reflected amplitude in anisotropic media is highly sensitive to the angular orientation of the symmetry axis. In this paper we investigate the effects of rotations in symmetry axis (planes) on each one of the named quantities and their overall effects on the reflected amplitude for a plane interface model consisting of a TI or orthorhombic medium over an isotropic one. The results presented clearly show that suitable rotations in symmetry axis (e.g., dipping rock fractures) can even reverse the amplitude response of the medium.

## INTRODUÇÃO

A análise de AVO/AVA compreende o estudo da variação da amplitude refletida com o ângulo para um ponto refletor fixo. Por outro lado, anisotropia sísmica é caracterizada pela dependência das quantidades cinemáticas e dinâmicas com a direção (ângulo) de propagação. Desta forma, a análise de AVO/AVA mostra-se bastante sensível à presença de anisotropia, conforme já exposto por diversos autores (Blangy, 1994; Tsvankin, 1995; Ruger, 1997; Krasovec et al., 1998; Florida, 1998).

A dependência angular em anisotropia varia com a simetria considerada e com a orientação espacial do(s) plano(s) de simetria do meio. O assunto tem despertado grande interesse atualmente. Ruger (1997) obteve expressões aproximadas para AVO em meios VTI e HTI. Krasovec et al. (1998) analisou a resposta de AVO para meios horizontal e verticalmente fraturados, os quais resultam em meios VTI e HTI, respectivamente. Grechka e Tsvankin (1998) investigaram a inversão de NMO para meios transversalmente isotrópicos com eixos de simetrias inclinados, os quais denominaram de TTI (tilted transverse isotropy). Florida (1998) mostrou que o comportamento angular da amplitude sísmica registrada pode mudar significativamente quando rotacionamos o meio anisotrópico, uma vez que nesses meios a amplitude depende de três fatores que apresentam fortes dependências angulares, quais sejam, a diretividade da fonte, o espalhamento geométrico e o coeficiente de reflexão.

O principal objetivo desse trabalho é promover um estudo exaustivo da influência da rotação de meios anisotrópicos sobre cada um dos três fatores citados acima e seus efeitos sobre a amplitude refletida final. A dependência angular (com o ângulo de incidência do raio na interface) e a influência de cada uma dessas quantidades na amplitude refletida são avaliadas em separado, para rotações do meio anisotrópico entre 0 e 90 graus, mantendo-se o eixo ou o plano de simetria no plano de reflexão. Consideramos um modelo constituído de uma interface plana separando dois meios, um superior anisotrópico e um inferior isotrópico. As simetrias investigadas foram as transversalmente isotrópica e a ortorrômbica, pela importância das mesmas na sísmica de reflexão. Consideramos, ainda, apenas o registro de ondas qP-qP para fontes pontuais explosiva e de força vertical inseridas na estrutura anisotrópica. Resultados numéricos são apresentados e comparados com aqueles esperados para meios isotrópicos.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de melhor avaliar os efeitos da rotação do eixo de simetria do meio sobre a resposta de AVO/AVA, consideramos um modelo constituído de dois semi-espacos homogêneos, o superior anisotrópico e o inferior isotrópico, separados por uma interface plano-horizontal. Para esta situação, a amplitude do raio refletido escreve-se como (Florida, 1998):

$$A(\mathbf{x}) = D(\mathbf{x}_o)R(\mathbf{x}_r)L(\mathbf{x}_o, \mathbf{x})$$

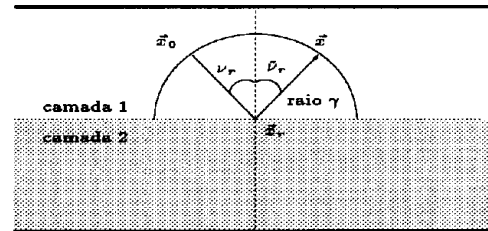
Onde  $D$  é a diretividade da fonte, quantidade que caracteriza a distribuição angular inicial da energia emitida pela fonte, depende do tipo de fonte e da anisotropia do meio onde a mesma está inserida;  $R$  é o coeficiente de reflexão, o qual diz respeito à partição de energia do raio incidente na interface em raios refletido e transmitido e  $L$  corresponde ao espalhamento geométrico, quantidade que reflete a variação da distribuição de energia ao longo da frente de onda que se propaga da fonte até o refletor e daí de volta à

superfície. Todas essas três quantidades dependem do modo de propagação considerado (qP-qP, qP-qS1, etc) e variam com a direção de propagação e, portanto, com o ângulo de incidência do raio na interface. A separação da amplitude refletida nessas três quantidades permite uma melhor compreensão da análise de AVO/AVA em meios anisotrópicos, uma vez que possibilita determinar a importância de cada uma delas na amplitude final registrada (Floridia, 1998) e, portanto, na análise de AVO/AVA.

Assumimos, também, que fontes e receptores estão situados ao longo de um círculo de raio unitário centrado no ponto de reflexão, conforme mostra a figura 1. Isto reduz a resposta de AVO a uma resposta de AVA. Com isso conseguimos um melhor entendimento sobre o tema sob investigação, bem como facilitamos as comparações com os resultados esperados para meios isotrópicos. De fato, quando o meio é isotrópico o

espalhamento geométrico e a diretividade de fonte explosiva são constantes ao longo do círculo. No caso em que o meio é anisotrópico a variação angular das quantidades acima deve-se justamente aos efeitos da anisotropia.

Figure 1: Modelo utilizado para investigar a



influência da rotação de meios anisotrópicos na análise de AVO/AVA.

## RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Aqui apresentaremos os resultados que ilustram, para o modelo da figura 1, a dependência angular da diretividade da fonte (explosiva ou força vertical), do coeficiente de reflexão, do espalhamento geométrico e da amplitude refletida de onda qP-qP para rotações do meio anisotrópico entre 0 e 90 graus, mantendo-se o eixo (ou o plano) de simetria no plano de reflexão. Para a camada anisotrópica, consideramos as duas simetrias mais representativas na sismica de reflexão: a transversalmente isotrópica (TI) e a ortorrômbica. No primeiro caso, fixamos os parâmetros de Thomsen em  $\delta=0.12$ ,  $\epsilon=0.13$ ,  $\gamma=0.1$  (irrelevante para o estudo em questão),  $\alpha=2.73\text{km/s}$ ,  $\beta=1.24$  e  $\rho=2.35\text{ g/cm}^3$  com o meio isotrópico dado por  $\alpha=2.02\text{ km/s}$ ,  $\beta=1.23\text{km/s}$  e  $\rho=2.13\text{ g/cm}^3$ . No segundo caso, os parâmetros elásticos do meio são dados pela matriz na forma reduzida a seguir (valores em  $\text{km}^2/\text{s}^2$ ):

$$\begin{pmatrix} 97.47 & 17.75 & 23.77 & 0 & 0 & 0 \\ 17.75 & 59.57 & 23.47 & 0 & 0 & 0 \\ 23.77 & 23.47 & 74.91 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20.07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 24.37 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23.86 \end{pmatrix}$$

com um meio isotrópico hipotético dado por  $\alpha=10.00\text{km/s}$ ,  $\beta=5.24$  e  $\rho=1.00\text{ g/cm}^3$ . Todas as quantidades estão normalizadas pelos valores de incidência normal, preservando-se, desta forma, apenas a informação relativa das quantidades estudadas. A variação das quantidades com o ângulo de incidência

## CONCLUSÃO

A influência da rotação de meios anisotrópicos na diretividade da fonte, espalhamento geométrico, coeficiente de reflexão e seus efeitos sobre a amplitude refletida final foi investigada. Os resultados obtidos mostram que todas as quantidades são sensíveis à rotação do meio. Em geral, o comportamento da amplitude refletida é fortemente dependente da orientação espacial do meio anisotrópico. Os resultados mostram, desta forma, a importância de se considerar a orientação do meio em estudos de AVO/AVA e em análises onde as amplitudes relativas verdadeiras são objetivadas.

## REFERÊNCIAS

- Blangy, J.P., 1994. AVO in transversely isotropic media – an overview. *Geophysics*, 59, 775-781.
- Floridia, C., 1998. Efeitos da anisotropia na análise de AVO. MSc thesis, CPGG/UFBA.

Grechka, V. And Tsvankin, I., 1998. Inversion of azimuthally dependent NMO velocity in transversely isotropic media with tilted axis of symmetry, 1998 International exposition and SEG annual meeting, Expanded Abstracts, ST 2.4, New Orleans, Louisiana-USA.

Krasovec, M.L., Rodi, W. And Toksoz, M.N., 1998. Sensitivity analysis of Amplitude Variation with Offset (AVO) in fractured media, 1998 International exposition and SEG annual meeting, Expanded Abstracts, AVO 2.2, New Orleans, Louisiana-USA.

Ruger, A., 1997. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry: *Geophysics*, 62, no. 03, 713-722.

Tsvankin, I., 1995. Body-wave radiation patterns and AVO in transversely isotropic media. *Geophysics*, 60, 1409-1425.

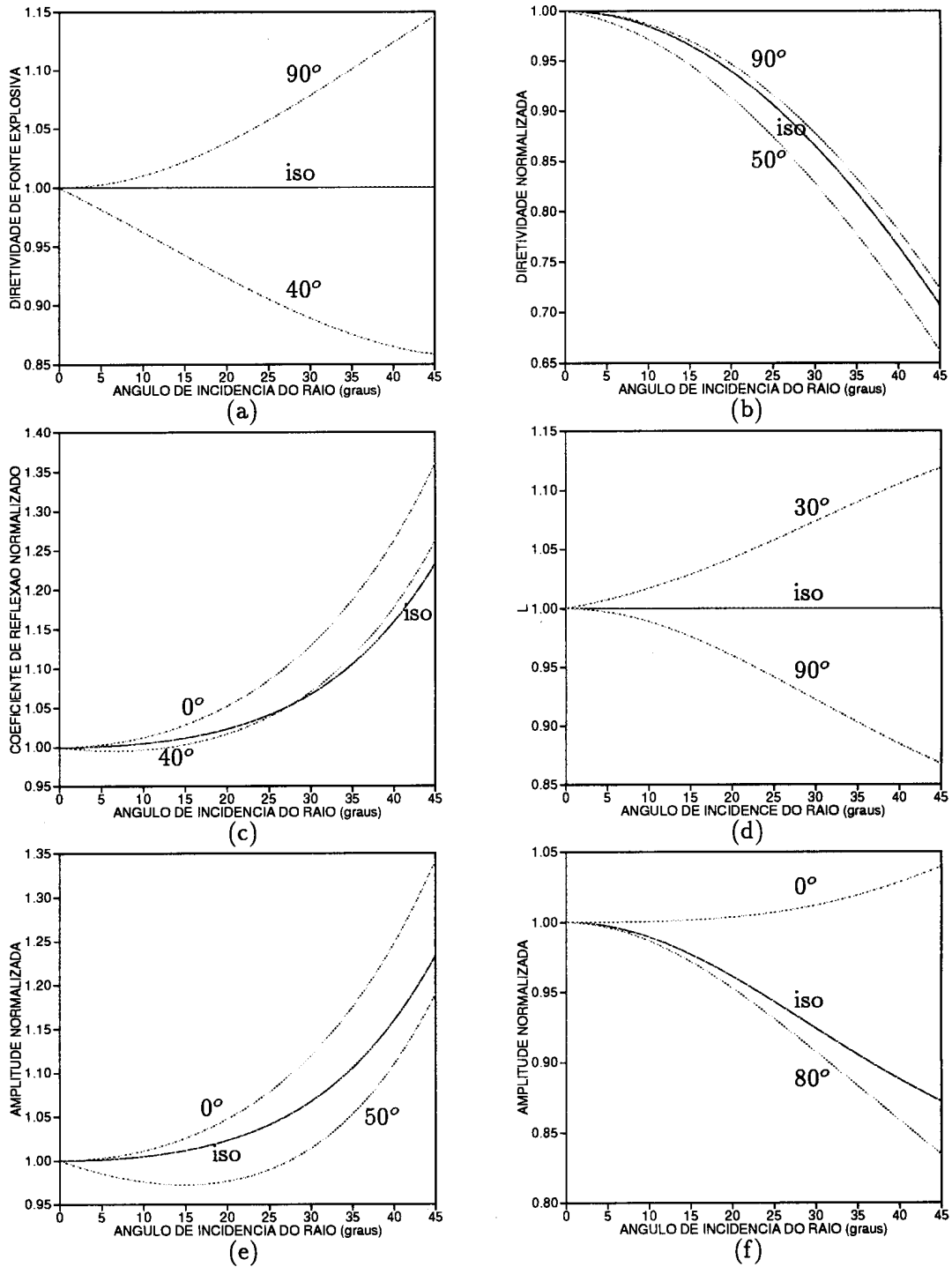


Figure 2: Efeito da rotação do meio TI no intervalo de 0 a 90 graus. Gráficos das curvas extremas neste intervalo. (a) diretividade de fonte explosiva, (b) diretividade de fonte de força vertical, (c) coeficiente de reflexão, (d) espalhamento

geométrico (através do fator  $L$ ), (e) amplitude refletida - fonte explosiva, (f) amplitude refletida - fonte de força vertical.

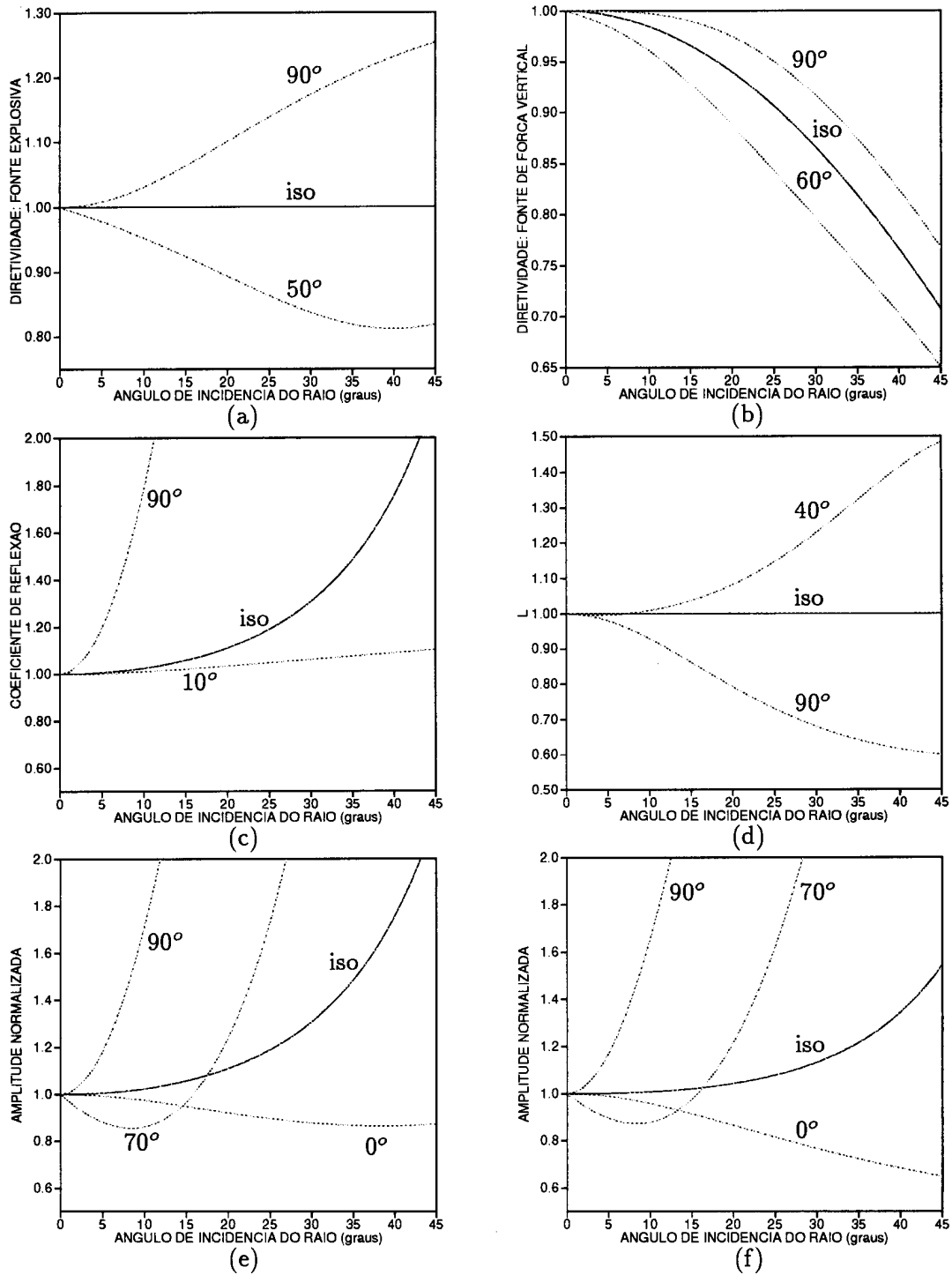


Figure 3: Efeito da rotação do meio ortorrômbico no intervalo de 0 a 90 graus. Gráficos das curvas extremas neste intervalo. (a) diretividade de fonte explosiva, (b) diretividade de fonte de força vertical, (c) coeficiente de reflexão, (d) espalhamento geométrico (através do fator  $L$ ), (e) amplitude refletida para o caso de fonte explosiva, (f) amplitude refletida para o caso de fonte de força vertical.