



MODO DE CONVERSÃO PS: REFLETIVIDADE PARA ZERO-OFFSET EM MEIOS ANISOTRÓPICOS

Fredy V.A. Artola¹, Ricardo Leiderman¹, Sergio A.B. Fontoura¹, Marcos Gallotti², Paulo Johann², Mércia B. C. Silva¹ & Israel R. Júnior¹

¹Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo GTEP, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil
²PETROBRAS, Brasil.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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.

RESUMO

Aqui, discutem-se as possibilidades da existência de refletividade PS para *zero-offset* em um contexto geral de camadas horizontais elasticamente anisotrópicas. Mostra-se que, para alguns casos, quando se introduz anisotropia na análise do problema da refletividade, é possível prever energia significativa associada ao modo convertido PS para *zero-offset*. Considerando-se que, existem evidências da existência de energia associada a onda convertida para *zero-offset*, em dados provenientes de levantamentos sísmicos multicomponentes, neste artigo é proposta uma argumentação teórica que permite prever este fenômeno. Isto é feito a partir de uma formulação analítica aproximada para o cálculo de coeficientes de reflexão em meios arbitrariamente anisotrópicos.

INTRODUÇÃO

No âmbito da sísmica multicomponente, quando se refere a energia registrada pelos geofones horizontais, acredita-se que, para *zero-offset*, esta é nula (Lawton et al., 1995; Garotta & Granger 2001, etc). Apesar disto, Mueller (1991) tem mostrado a presença significativa de energia para *zero-offset/near-offset* associada à reflexão da onda convertida em dados de campo. Thomsen (2002) tem comentado a observação desde fenômeno e avaliado sua relevância.

Com muita frequência, para explicar este fato, tem sido sugeridas algumas explicações *Ad-Hoc* de modo a manter-se o acordo entre os dados e a teoria, já que a simples teoria prevê uma refletividade *zero-offset* nula. Aqui, refere-se como simples teoria, à simplificação isotrópica dos materiais terrestres.

O objetivo deste artigo é investigar os possíveis cenários nos quais podem esperar-se encontrar casos de refletividade não nula. Isto é feito a partir de uma abordagem geral onde consideram-se efeitos anisotrópicos. Inicialmente, a partir da formulação aproximada proposta por Jileck (2001) são analisadas as relações fundamentais entre os parâmetros elásticos e a refletividade PS para *zero-offset*. Também é discutido o tipo de "envolvimento" dos parâmetros que condicionam a existência do fenômeno acima mencionado. As deduções feitas são confirmadas mediante experimentos numéricos, realizados utilizando-se a formulação exata assim como mediante sismogramas sintéticos gerados com a ajuda do programa ANRAY 4.2 cujos códigos são baseados na teoria do raio.

REFLETIVIDADE PS EM MEIOS ANISOTRÓPICOS

Em geral, a refletividade PS em meios anisotrópicos é muito mais complexa do que se poderia esperar. Os fenômenos de reflexão e transmissão assumem algumas características não previstas pela simples teoria. Uma destas características especiais está relacionada com a reflexão da onda convertida PS para uma incidência normal P. Em geral, em meios isotrópicos, para uma incidência oblíqua P podem prever-se modos convertidos refletidos e transmitidos. Os modos convertidos surgem necessariamente para compensar o efeito da refração da onda transmitida P (as direções dos deslocamentos da onda P incidente e transmitida são diferentes) de modo a garantir a continuidade do deslocamento e do *stress* na interface. Quando a incidência é normal, as direções do deslocamento da onda incidente e transmitida são coincidentes, razão pela qual, não há onda convertida para uma incidência normal.

Por outro lado, em alguns meios anisotrópicos, especificamente, naqueles que possuem eixos ou planos de simetria oblíquos, para uma incidência normal P, a direção do deslocamento da onda transmitida não é vertical, e sim oblíqua. Para compensar este efeito, de modo a garantir as condições de continuidade do deslocamento e do

stress na interface, é necessária a ocorrência de conversão (refletida e transmitida).

Isto pode ser deduzido de uma forma simples a partir de algumas expressões aproximadas propostas para o cálculo de coeficientes de reflexão e transmissão em meios anisotrópicos.

Por causa do crescente interesse no estudo da onda convertida, alguns autores tem desenvolvido trabalhos teóricos conducentes à obtenção de formulações aproximadas para os coeficientes de reflexão (R_{P-S_i}) e transmissão (T_{P-S_i}) em meios anisotrópicos, de modo a serem usadas na solução de alguns problemas específicos (Zillmer et al., 1997; Vavrycuk, 1999 e Jíleck, 2001). Mesmo considerando-se as condições de validade de ditas aproximações (em geral, válidas para anisotropia fraca e contraste suave), estas podem ser utilizadas de uma forma simples na dedução de relações que podem responder as indagações relacionadas com a refletividade PS para *zero-offset*, sem medo de perder generalidade no que diz respeito ao significado físico do problema.

Segundo a formulação de Jíleck, 2001; R_{P-S_i} pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} R_{P-S_1} &= \mathfrak{R} \cos \Phi + \mathfrak{I} \sin \Phi \\ R_{P-S_2} &= -\mathfrak{R} \sin \Phi + \mathfrak{I} \cos \Phi \end{aligned} \quad (1)$$

onde \mathfrak{R} e \mathfrak{I} são dados por:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &= v_1 + v_2 \frac{\cos \phi_P}{\cos \phi_S} + v_3 \frac{\sin \phi_P}{\cos \phi_S} + \\ &v_4 \cos \phi_P \sin \phi_P + v_5 \sin^2 \phi_P + \\ &v_6 \frac{\cos \phi_P \sin^2 \phi_P}{\cos \phi_S} + v_7 \frac{\sin^3 \phi_P}{\cos \phi_S} + \\ &v_8 \cos \phi_P \sin^3 \phi_P + v_9 \sin^4 \phi_P + \\ &v_{10} \frac{\cos \phi_P \sin \phi_P}{\cos \phi_S} + v_{11} \frac{\sin^5 \phi_P}{\cos \phi_S} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{I} &= h_1 \frac{1}{\cos \phi_S} + h_2 \cos \phi_P + \\ &h_3 \sin \phi_P + h_4 \frac{\cos \phi_P \sin \phi_P}{\cos \phi_S} + \\ &h_5 \frac{\sin^2 \phi_P}{\cos \phi_S} + h_6 \cos \phi_P \sin^2 \phi_P + \\ &h_7 \sin^3 \phi_P + h_8 \frac{\cos \phi_P \sin \phi_P}{\cos \phi_S} + h_9 \frac{\sin^4 \phi_P}{\cos \phi_S} \end{aligned}$$

Aqui, ϕ_P representa o ângulo de incidência e ϕ_S é o ângulo de reflexão após a conversão. $(v_i)_{i=1,\dots,11}$ e $(h_i)_{i=1,\dots,9}$ são funções que dependem do azimute ψ e dos contrastes das propriedades elásticas dos materiais que definem as interfaces. Φ é o ângulo de polarização das componente qS_1 e qS_2 com relação aos vetores de polarização associados a SV ou SH. A determinação deste ângulo pode ser realizado mediante o método desenvolvido por Jech & Psencik, 1989 e é discutido, para alguns casos, por Jíleck, 2001 (Apêndice C).

Para os casos especiais de simetria VTI e isotrópica, $\Phi = 0$. Em geral, para os casos de mais baixa simetria $\Phi \neq 0$.

REFLECTIVIDADE ZERO-OFFSET

Da análise de \mathfrak{R} e \mathfrak{I} pode-se observar facilmente que, quando o ângulo de incidência ϕ_P é zero (incidência P vertical) \mathfrak{R} e \mathfrak{I} se reduzem a:

$$\mathfrak{R} = v_1 + v_2 \frac{1}{\cos \phi_S} \quad (3)$$

$$\mathfrak{I} = h_1 \frac{1}{\cos \phi_S} + h_2$$

onde v_1, v_2, h_1 e h_2 são dados por:

$$\begin{aligned} v_1 &= K_1 (\Delta A_{35} \cos \psi + \Delta A_{34} \sin \psi) \\ v_2 &= K_2 (\Delta A_{35} \cos \psi + \Delta A_{34} \sin \psi) \\ h_1 &= -K_1 (\Delta A_{35} \cos \psi - \Delta A_{34} \sin \psi) \\ h_2 &= -K_2 (\Delta A_{35} \cos \psi - \Delta A_{34} \sin \psi) \end{aligned} \quad (4)$$

e $\Delta A_{ij} = A_{ij}^{(2)} - A_{ij}^{(1)}$, onde os sobrescritos (1) e (2) representam os meios superior e inferior. K_1 e K_2 são valores constantes diferentes de zero.

De (3) e (4), vê-se que, sempre que exista ΔA_{34} e/ou ΔA_{35} , \mathfrak{R} e \mathfrak{I} serão diferentes de zero, isto implica que $R_{P-S_i} \neq 0$.

A dedução imediata é que, R_{P-S_i} pode ser igual ou diferente de zero. Tudo dependerá da estrutura do arranjo elástico associado aos meios.

EM QUE CASOS $R_{p-s_i} \neq 0$ PARA ZERO-OFFSET?

A matriz geral dos parâmetros elásticos é mostrada na Figura 1.

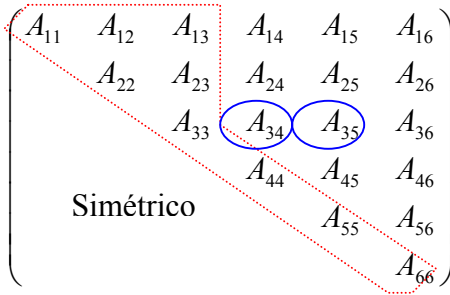


Figura 1. Matriz dos parâmetros elásticos normalizados A_{ij} .

Para meios isotrópicos (ISO) os elementos localizados fora da região delimitada pela linha tracejada (vermelha) são sempre nulos. Esses elementos também são nulos para meios dos tipos VTI, HTI e ortorrômbico (ORTO), desde que os meios (nos modelos) sejam referenciados a um sistema de coordenadas cujos eixos são coincidentes com os principais eixos de simetria. Observa-se também que os elementos A_{34} e A_{35} da matriz dos coeficientes elásticos são nulos mesmo quando efetuada uma rotação ao redor do eixo vertical. Por esta razão, para os casos acima mencionados, a propagação vertical da onda P é puramente vertical. A consequência imediata disto é que R_{p-s_i} é sempre nulo.

Para os casos transversalmente isotrópicos com eixo de simetria inclinado (ITI) e monoclinico (MONO) (VTI + fraturas inclinadas) ou para alguns outros casos de mais baixa simetria, A_{34} e/ou A_{35} são não nulos. Assim, das equações (3) e (4), para estes casos, R_{p-s_i} é não nulo para zero-offset.

Nota-se que isto é válido mesmo quando um dos meios (por exemplo, o meio incidente) for isotrópico.

As idéias exposta acima são confirmadas pelos resultados obtidos usando-se a formulação exata, assim como mediante sismogramas sintéticos gerados com ajuda do programa ANRAY 4.2 cujos códigos são baseados na teoria do raio.

RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS MEDIANTE A FORMULAÇÃO EXATA

As Figuras 2a e 2b mostram os resultados numéricos obtidos mediante a formulação exata para dois modelos diferentes. A Figura 2a é relativo a um modelo que consiste em um meio incidente isotrópicos sobre um semi-espaco com simetria elástica do tipo ITI. A Figura 2b é relativo a um

modelo que consiste em um meio incidente isotrópico sobre um semi-espaco com simetria elástica monoclinica. Em ambos casos é avaliado o efeito da reflexão nas componentes radial, transversal e vertical, para uma incidência vertical P.

SISMOGRAMAS SINTÉTICOS GERADOS MEDIANTE O PROGRAMA ANRAY 4.2

As Figuras 3a-3i mostram sismogramas sintéticos gerados mediante o programa ANRAY 4.2, para nove modelos (Tabela 1). Neles são mostrados casos onde a refletividade, para a onda convertida, é nula e não nula para zero-offset

Figura	Meio 1	Meio 2	Refletividade zero-offset
(a)	ISO	ORTO	nula
(b)	ISO	HTI	nula
(c)	HTI	ORTO	nula
(d)	ISO	ITI	não nula
(e)	HTI	ITI	não nula
(f)	ORTO	ITI	não nula
(g)	ISO	MONO	não nula
(h)	HTI	MONO	não nula
(i)	ORTO	MONO	não nula

Tabela 1. Configuração dos modelos

CONCLUSÕES

Mostrou-se, a partir de considerações anisotrópicas que, é possível prever R_{p-s_i} não nulo. A partir de uma formulação aproximada foi possível estabelecer relações que permitem entender o tipo de “envolvimento” de alguns parâmetros elásticos na ocorrência do fenômeno: “ R_{p-s_i} não nulo” para zero-offset. Os parâmetros A_{34} e A_{35} exercem uma função muito importante na refletividade PS zero-offset. Sempre que existam A_{34} , e/ou A_{35} , é possível registrar energia refletida associada ao modo PS para uma incidência vertical. Arranjos elásticos dos tipos ITI e MONO são alguns exemplos. Por outro lado, quando A_{34} , e A_{35} são nulos R_{p-s_i} é também nulo. Ocorrências como estas podem ser relacionadas com as simetrias VTI, HTI, ORTO e ISO.

As deduções e observações feitas acima são confirmadas mediante experimentos numéricos realizados com a formulação exata assim como a través de sismogramas sintéticos. As Figuras 2 e 3 corroboram as conclusões deste artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos coordenadores do Setor de Aquisição do Programa de Recuperação

Avançada de Petróleo PRAVAP 19 – PETROBRAS, pelo estímulo à pesquisa e pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Garotta, R. & Granger P. 2001. Some requirements of PS mode acquisition. SEG Expanded Abstract.

Jech, J. & Psencik, I. 1989. First-order perturbation method for anisotropic media, Geophys. J. Int., 99, 369-376.

Jílek, P. 2001. Modeling and Inversion of Converted-wave Reflection Coefficients in Anisotropic Media: A Tool for Quantitative AVO Analysis, Ph.D. Thesis, CWP, Colorado School of mines.

Lawton, D.; Stewart, R.; Cordsen, A. & Hrycak, S. 1995. Advances in 3C-3D design for converted waves. CREWES Research Report, V. 7.

Mueller, M.C., 1991. Prediction of lateral variability in fracture intensity using multicomponent shear-wave seismic as a precursor to horizontal drilling, Geoph. J. Intl., 107, 409-415.

Thomsen, L. 2002. Understanding Seismic Anisotropy in Exploration and Exploitation. Distinguished Instructor Series, No. 5. SEG, EAGE.

Vavrycuk, V. 1999. Weak-contrast reflection/transmission coefficients in weakly anisotropic elastic media: P-wave incidence. Geophys. J. Int., 138, 553-562.

Zillmer, M.; Gajewski, D. & Kashtan, B. 1997. Reflection coefficients for weak anisotropic media, Geophys. J. Int., 129, 389-398.

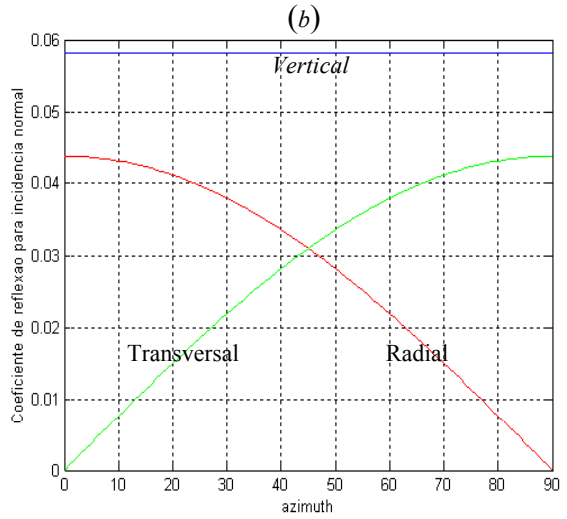
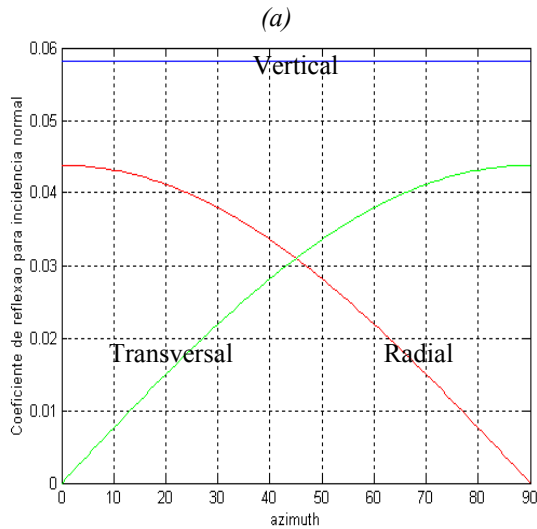
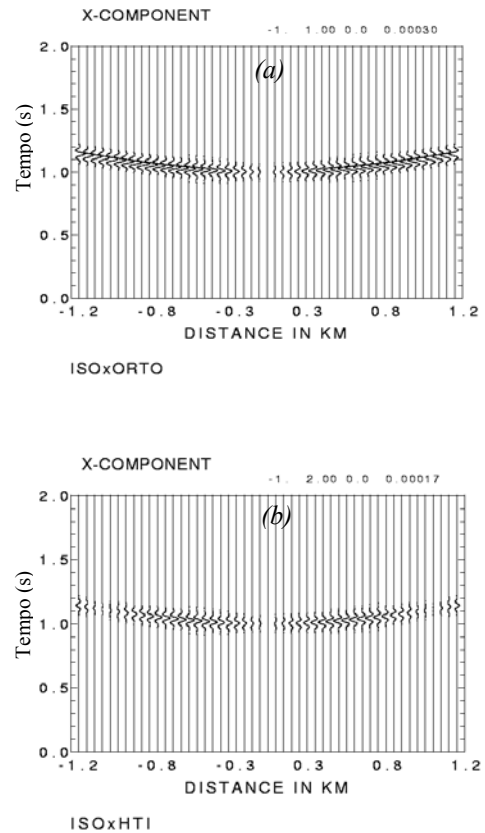


Figura 2. Efeito da reflexão nas componentes radial, transversal e vertical. (a) modelo ISO/ITI (b) modelo ISO/MONO



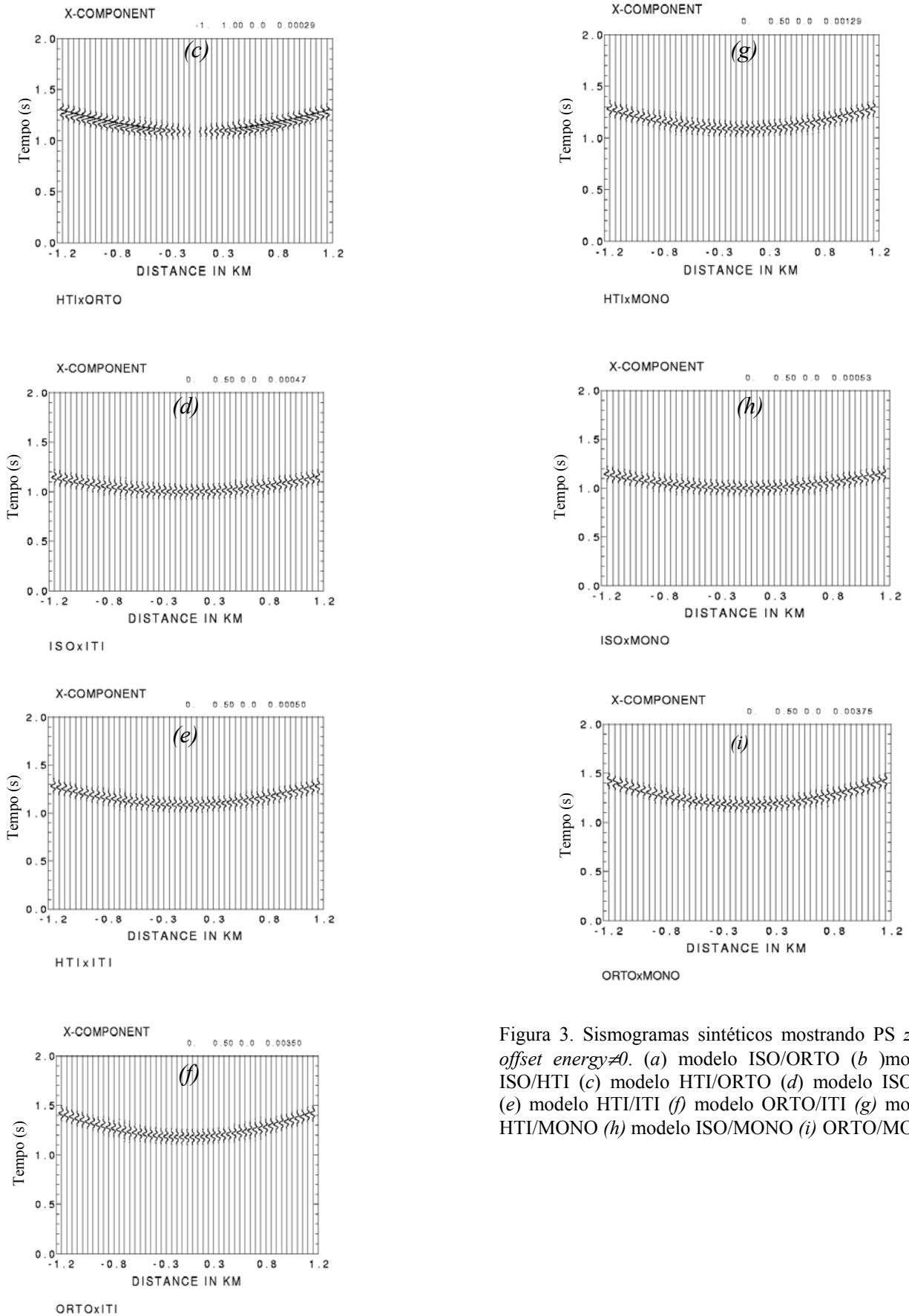


Figura 3. Sismogramas sintéticos mostrando PS *zero-offset energy* $\neq 0$. (a) modelo ISO/ORTO (b) modelo ISO/HTI (c) modelo HTI/ORTO (d) modelo ISO/ITI (e) modelo HTI/ITI (f) modelo ORTO/ITI (g) modelo HTI/MONO (h) modelo ISO/MONO (i) ORTO/MONO

