



## MODO DE CONVERSÃO PS: PONTO DE CONVERSÃO EM MEIOS ANISOTRÓPICOS

Fredy A. V. Artola<sup>1</sup>, Sergio A. B. Fontoura<sup>1</sup>, Marcos Gallotti<sup>2</sup>, Paulo Johann<sup>2</sup>, Ricardo Leiderman<sup>1</sup>, Mércia B. C. Silva<sup>1</sup> & Israel R. Júnior<sup>1</sup>

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

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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.

### Resumo

A determinação ponto de conversão para a onda convertida PS é um tópico relevante na sísmica multicomponente. Frequentemente, o problema da localização do ponto de conversão é determinado assumindo-se um meio isotrópico. Constatou-se que, mesmo para o caso mais simples de anisotropia (VTI) as discrepâncias encontradas entre as coordenadas do ponto de conversão  $X_C$  com relação às determinadas sob suposição isotrópica  $X_{C_{ISO}}$  podem chegar a ser de algumas centenas de metros para uma relação de *distância/profundidade* ( $X/Z$ ) < 2. Por outro lado, em alguns casos especiais de simetria VTI, o ponto de conversão verdadeiro pode, praticamente, coincidir com o ponto de conversão isotrópico, mesmo quando os parâmetros  $\epsilon$  e  $\delta$  são não nulos. Isto significa que, além de ( $X/Z$ ) e da razão  $V_p/V_s$  vertical, a discrepância ou a concordância com relação ao caso isotrópico, depende dos valores assumidos por  $\epsilon$  e  $\delta$ . Em geral, para casos onde existe anisotropia azimutal, como é o caso de meios ortorrômbicos, o ponto de conversão verdadeiro é localizado fora do plano vertical. Isto é, a discrepância do ponto de conversão verdadeiro possui uma componente *inline* e outra *offline*. O grau de afastamento do ponto de conversão com relação ao plano vertical depende do grau e do tipo de anisotropia que é associado ao meio. Há casos onde as discrepâncias *inline* dos pontos de conversão ortorrômbico podem ser menores com relação ao caso isotrópico que com relação ao do caso VTI.

### Introdução

O estudo da onda convertida do modo PS tem se transformado, nos últimos anos em uma das principais áreas de pesquisa na indústria do petróleo. A tecnologia *Ocean-Bottom Systems* (OBS) tem motivado o desenvolvimento de diversas técnicas de aquisição e de processamento de dados sísmicos multicomponentes com o intuito de se obter informação elástica da sub-superfície através da onda convertida.

Embora os dados registrados pelos sensores 3C (terra) ou 4C (mar), em sua grande maioria, apresentem sinais da existência de efeitos anisotrópicos, projetos de aquisição e processamento ainda são executados usando-se conceitos isotrópicos, particularmente no que diz respeito à estimação do ponto de conversão (CCP).

Este tipo de simplificação poderia não ser um problema tão relevante se as discrepâncias encontradas entre as coordenadas do CCP ( $X_C$ ) isotrópico e anisotrópico fossem desprezíveis na escala de levantamentos sísmicos usuais. A verdade é que, mesmo considerando a forma mais simples de anisotropia, como é o caso VTI, as discrepâncias podem chegar a ser de algumas centenas de metros para uma relação  $X/Z < 2$ .

Yang & Lawton (2002) mostraram, a dependência do ponto de conversão com relação à variação do par ( $\epsilon$ ,  $\delta$ ) para o caso VTI usando as equações e os parâmetros de Thomsen (1986). Entretanto, só consideraram variações do  $X_C$  que ocorrem no plano vertical definido pela fonte-receptores.

Esta variação do  $X_C$  é mais complicada quando se considera a sub-superfície de uma maneira um pouco mais realística; por exemplo, quando se estudam meios afetados por fraturas. Neste caso, em geral,  $X_C$  fica localizado fora do plano vertical. Isto significa que, a discrepância entre  $X_C$  verdadeiro e  $X_C$  isotrópico possui componentes *inline* e *offline*. Além das características elásticas do meio,  $X_C$  depende da relação angular entre a

direção azimutal do arranjo fonte-receptores e uma das direções principais de anisotropia. Neste caso, o ponto de conversão resulta ser azimutalmente variante para um *offset* fixo.

### Ponto de conversão do modo PS em meios anisotrópicos

Em geral, a reflexão e a localização do ponto de conversão do modo PS é muito mais complicado do que intuitivamente possa se imaginar. Por exemplo, Psencik (1998); Jech & Psencik (1989) e Jíleck (2000) mostraram que os vetores de polarização das ondas de cisalhamento  $qs_1$  e  $qs_2$  refletidas após a conversão encontram-se rotacionados segundo um ângulo  $\theta$  com relação as polarizações das ondas SV e SH.

Por outro lado, é possível demonstrar-se que, em geral, a lei de Snell não é satisfeita no plano vertical. Isto implica que, o ponto de conversão geralmente não ocorre no plano vertical. Para satisfazer a lei de Snell, é preciso que o mencionado ponto ocorra fora do plano vertical (Fig.1).

O afastamento do ponto de conversão do plano vertical depende principalmente do meio elástico anisotrópico associado à sub-superfície, da relação X/Z (*offset*/profundidade) e da direção do plano fonte-receptores.

Neste trabalho analisa-se o efeito da anisotropia na localização do ponto de conversão. Para isto, a partir de um modelo inicial isotrópico construiu-se modelos anisotrópicos efetivos usando a parametrização de Thomsen (1986) para o caso VTI. A partir do modelo VTI construiu-se um modelo ortorrômbico equivalente mediante a introdução de fraturas verticais. Neste último caso, o cálculo do tensor de *compliance* é realizado utilizando a teoria conhecida como *linear slip* (Schoenberg & Sayers, 1995; Schoenberg & Helbig, 1997; Schoenberg & Douma, 1988).

### Modelo VTI

O modelo inicial consiste em uma camada isotrópica e homogênea de 1km de espessura com  $Vp = 3km/s$ ,  $Vs = 1.5km/s$ ,  $\rho = 2g/cm^3$ . Usando  $Vp$  e  $Vs$  e as considerando como  $Vp_0$  e  $Vs_0$  (velocidades verticais) de um modelo VTI, determina-se um conjunto de tensores *stiffness* para algumas combinações de  $\epsilon$ ,  $\delta$  e  $\gamma$  (parâmetros de Thomsen).

Os pontos de conversão são calculados mediante a teoria do raio, usando-se o programa ANRAY- 4.2. O traçamento dos raios é feito no domínio da fonte. Foram utilizados 40 receptores *inline* regularmente separados a cada 50 metros. O *offset* máximo foi de 2000m e o mínimo de 50m.

Para este caso especial de simetria, a onda convertida SV é polarizada no plano incidente. Isto significa que, a discrepância entre as coordenadas dos pontos  $Xc_{VTI}$  e  $Xc_{ISO}$  são registradas somente no plano vertical (*inline*). As mencionadas discrepâncias são calculadas mediante subtração do ponto de conversão verdadeiro  $Xc_{VTI}$  e do ponto de conversão isotrópico  $Xc_{ISO}$  ( $\Delta Xc = Xc_{VTI} - Xc_{ISO}$ ).

Na Figura 2 são plotados valores que indicam as discrepâncias acima mencionadas. Vê-se que o valor da discrepância depende dos valores associados aos parâmetros anisotrópicos de Thomsen ( $\epsilon$ ,  $\delta$ ) e da relação *offset*/profundidade. A direção e o valor do deslocamento do ponto de conversão verdadeiro com relação ao ponto de conversão isotrópico depende do tipo de relação utilizado entre  $\epsilon$  e  $\delta$ .

Dado um valor de  $\epsilon$  fixo, dependendo do valor associado a  $\delta$ ,  $\Delta Xc$  pode significar deslocamento em direção à fonte ou em direção ao receptor. Mesmo para valores de  $\epsilon$  e  $\delta$  não nulos, em alguns casos,  $Xc_{VTI}$  e  $Xc_{ISO}$  podem ser praticamente coincidentes, isto é,  $\Delta Xc$  pode ser muito pequeno. Nas Figuras 2(a) e 2(c) observa-se que, para os pares  $\epsilon$ ,  $\delta$  (0.1, 0.075) e (0.2, 0.15)  $Xc_{VTI}$  é praticamente coincidente com  $Xc_{ISO}$ . É possível que, em alguns casos, parte do sucesso do processamento de dados sísmicos do modo PS sob considerações isotrópicas possa dever-se a este fato.

### Modelo Ortorrômbico

Com o propósito de avaliar melhor o efeito da anisotropia na determinação do ponto de conversão, foi introduzido, no modelo VTI, um sistema de fraturas verticais com densidade de 0.1.

Por causa do efeito das fraturas, o meio equivalente pode ser considerado ortorrômbico. Neste caso, a presença das fraturas induz a quebra da invariância azimutal do modelo VTI. Devido a perturbação, exceto nas direções principais, a lei de Snell não é mais satisfeita no plano vertical. Razão pela qual o ponto de conversão ocorre, necessariamente, fora do plano vertical, de modo a satisfazer a mencionada lei. Desta forma, o ponto de conversão verdadeiro tem componentes de

deslocamento *inline* e *offline* com relação aos pontos de conversão isotrópico e VTI.

O deslocamento *offline* depende das características da perturbação introduzida nos modelos. A Figura 3 mostra a variação azimutal das coordenadas do ponto de conversão para o modelo ortorrômbico para um *offset* constante de 2000m (*offset/profundidade* = 2). Nesta Figura são plotados os pontos de conversão correspondentes às componentes  $qS_1$  e  $qS_2$ . Na mesma figura, são plotados os pontos de conversão P-SV calculados para os casos isotrópico e VTI. Para o modelo ortorrômbico, os pontos de conversão *multi-azimutais* associados as ondas refletidas  $qS_1$  e  $qS_2$  tem uma discrepância *inline* maior com relação aos pontos de conversão P-SV do modelo VTI do que com relação ao modelo isotrópico. Na Figura 4 são plotados os deslocamentos *inline* e *offline* de  $X_{CORTO}$  associados à componente  $qS_2$ . Nota-se que, o deslocamento *offline*, para alguns ângulos azimutais, pode chegar a ser de algumas centenas de metros.

## Conclusões

- Foi analisado o efeito da anisotropia na localização do ponto de conversão. Para isto, foram considerados modelos VTI e ortorrômbico;
- Em geral, para modelos cada vez mais realísticos, o ponto de conversão verdadeiro possui componentes de deslocamento *inline* e *offline* com relação ao caso isotrópico;
- No caso especial de anisotropia VTI, a discrepância do ponto de conversão verdadeiro com o isotrópico é restrita ao plano vertical e depende dos valores assumidos pelos parâmetros  $\epsilon$ ,  $\delta$ .
- Possivelmente há casos onde a combinação de valores para os parâmetros  $\epsilon$ ,  $\delta$ , para o caso VTI, possam definir coordenadas do ponto de conversão verdadeiro muito próximos aos do caso isotrópico.
- Para casos mais realísticos (e.g. caso ortorrômbico) a componente *offline* da discrepância do ponto de conversão com relação ao isotrópico e VTI depende do tipo e da intensidade da perturbação anisotrópica;

- O afastamento *offline* do ponto de conversão pode ser muito maior do que o visto aqui, caso fossem considerados modelos um pouco mais complicados.
- As fraturas naturais são geralmente oblíquas. Assim, espera-se fazer no futuro uma avaliação do efeito da inclinação destas discontinuidades geológicas indutoras de anisotropia sísmica, na determinação do ponto de conversão.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos coordenadores do setor Aquisição do Projeto de Recuperação Avançada de Petróleo PRAVAP 19 – PETROBRAS, pelo suporte financeiro e pelo interesse dispensado a este trabalho. A Ivan Psencik pela ajuda no uso do ANRAY e pelos comentários esclarecedores. Não podemos deixar de agradecer a Rodrigo Gomes dos Santos pelo apoio brindado no cálculo dos tensores de *compliance* e *stiffness*, assim como na geração do banco de dados mediante o programa ANRAY 4.2.

## Referências Bibliográficas

- Jech, J., & Psencik, I. 1989. First-order perturbation method for anisotropic media. *Geophys. J. Int.*, **99**, 369-376.
- Jílek, P. 2000. Converted PS-wave reflection coefficients in anisotropic media. *CWP Project Review*, CWP, Colorado School of Mines.
- Psencik, I., 1998. Green's function for inhomogeneous weakly anisotropic media. *Geophys. J. Int.*, **135**, 279-288.
- Schoenberg, M., & Douma, J., 1988. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks, *Geophys. Prosp.*, **36**, 571-589.
- Schoenberg, M. & Helbig, K., 1997. Orthorhombic media: Modeling elastic wave behavior in vertical fractured Earth: *Geophysics*, **62**, 1954-1974.
- Thomsen, L., 1986. Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, 1954-1966.
- Yang, J. & Lawton, D. 2002. Mapping the P-S conversion point in Vertical Transversely Isotropic (VTI) media. 72<sup>nd</sup> Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Expanded Abstracts, 1006-1009.

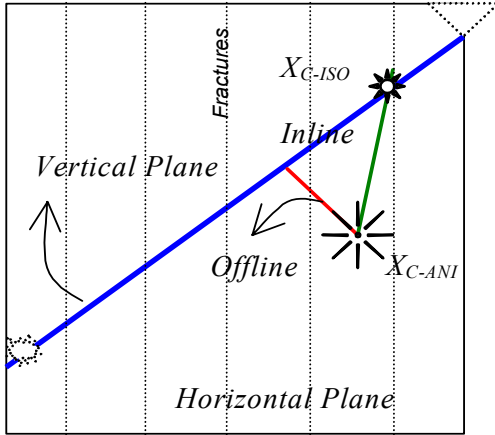


Figura 1. Ponto de Conversão em meios isotrópicos e anisotrópicos

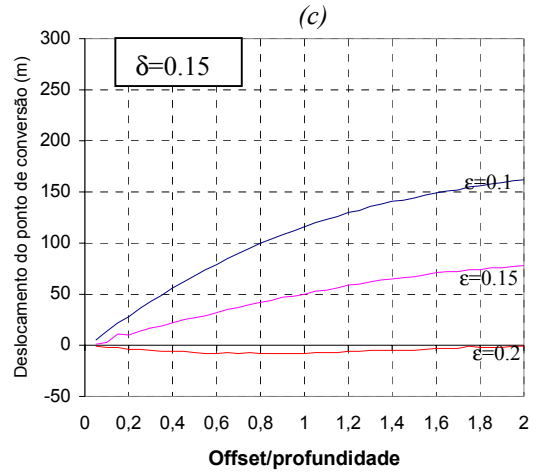


Figura 2. Modelo VTI. (a), (b) e (c) - Deslocamento do ponto de conversão para varias combinações dos parâmetros  $\epsilon$  e  $\delta$ .

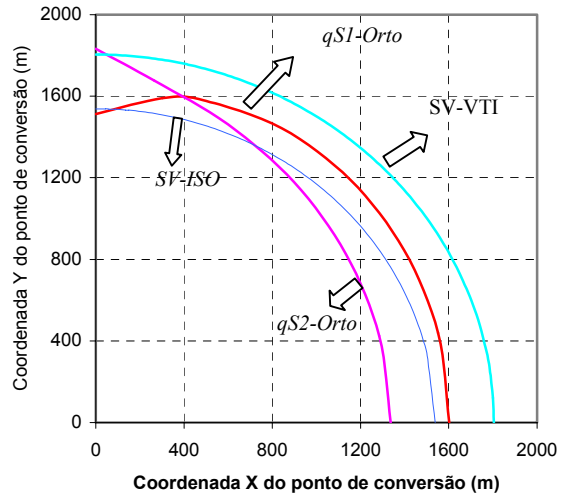
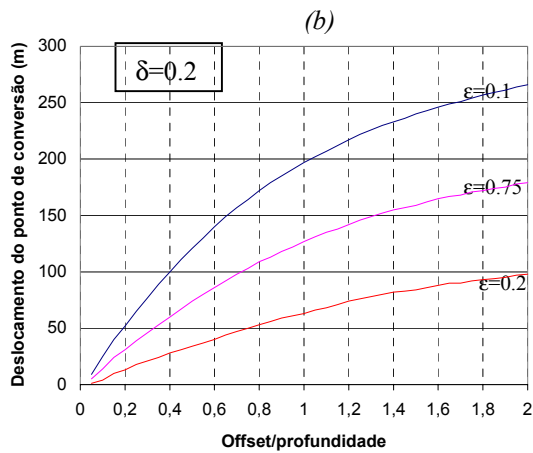
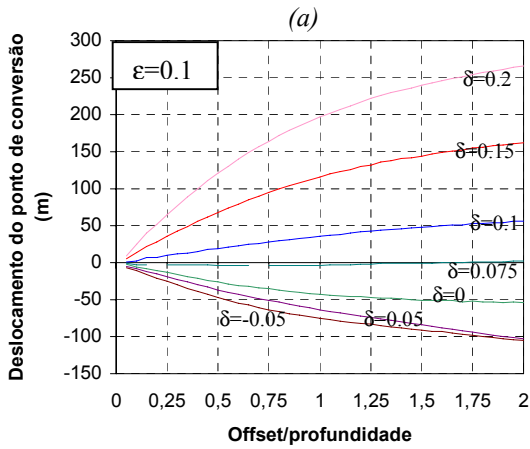


Figura 3. Pontos de conversão multi-azimutais em modelos ortorrômbico, VTI e isotrópico.

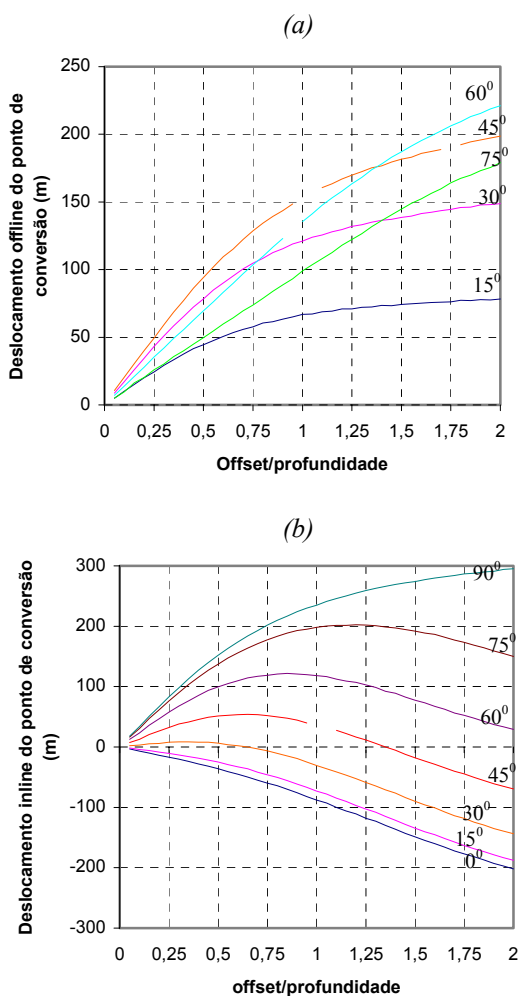


Figura 4. Modelo Ortorrômbico. Deslocamento *offline* e *inline* do ponto de conversão para uma das componentes das componente  $P$ - $qS$ , calculados em a várias direções (azimute).