

1 Introdução

Devido a mudanças na resposta sísmica em propagação de ondas, a anisotropia nas rochas é conhecida há várias décadas (McCollum & Snell, 1932; White & Sengbush, 1953; Postma, 1955; Uhrig & Van Melle, 1955; McDonal et al., 1958; Jones & Wang, 1981; Nayfeh, 1995; Schoenberg & Sayers, 1995; Wang, 2002). Como exemplos, erros em estimativa na profundidade (Jones & Wang, 1981; Wang, 2002) e estudos de medições de velocidades de propagação em amostras de folhelhos, que são intrinsecamente anisotrópicos.

Em processamento de dados sísmicos, a diferença na curva de tempo de trânsito em um evento devido à anisotropia é um problema também conhecido há muito tempo (Uhrig & Van Melle, 1955). Porém, por vários anos este problema tinha sido tratado como caráter acadêmico (ou teórico) pela existência de outras dificuldades na obtenção da imagem sísmica consideradas mais importantes que efeitos da anisotropia (De Bazelaire, 1988; Berkhout, 1997a; Berkhout, 1997b; Etris et al., 2001; Yilmaz, 2001; Kretz et al., 2002). No entanto, nos últimos 20 anos várias pesquisas em processamento e imageamento sísmico considerando anisotropia vem sendo identificados na literatura e utilizados em dados reais (Boechat, 1997; Kühnel, 1988; Tsvankin, 2001; Li, 2002; Thomsen, 2002; Elapavuliri, 2003; Cetale Santos, 2003), tornando a anisotropia um problema atual que se deve tentar entender e solucionar.

A importância da consideração da anisotropia em dados sísmicos pode ser verificada em vários trabalhos, como Banik (1984), Wright (1987), Carcione et al. (1998), Shen et al. (2002) e Jones et al. (2003), quando a interpretação dos dados e a conseqüente obtenção de informações geológicas podem ser modificadas pela simples consideração de que a rocha possui anisotropia. Em processamento, o primeiro procedimento no qual se pode considerar a anisotropia é a correção de sobretempo normal, ou correção de *normal moveout* (NMO). As primeiras aproximações das equações de NMO foram construídas para o modelo simples de camadas horizontais isotrópicas e homogêneas (Taner & Koehler, 1969; Yilmaz, 2001) embora uma teoria proposta por Backus (1962) prove que mesmo um modelo

com várias camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas, se comporta como anisotrópico quando a espessura destas camadas é muito menor que o comprimento de onda que propaga neste meio. A solução encontrada para resolver este problema é a suposição de que se utilizem dados onde as camadas sejam sempre espessas, o que nem sempre acontece na natureza.

Em Hake et al. (1984) ocorre uma das primeiras tentativas de aproximar a equação de NMO para os casos onde os dados são anisotrópicos propondo uma equação de três termos (também conhecidas como equações de quarta ordem) para corrigir o sobretempo normal de um meio com várias camadas com anisotropia TI (transversalmente isotrópica). Após este trabalho, várias equações de NMO de ordens superiores foram propostas para vários tipos de anisotropia e de modelos geológicos (Tsvankin & Thomsen, 1995; Alkhalifah, 1997; Grechka & Tsvankin, 1998b; Siliqi & Bousquié, 2000; Pech et al., 2003). Dependendo da anisotropia e do modelo geológico, estas equações podem ser complexas e exigir muitos parâmetros para serem resolvidos, sendo algumas delas difíceis de serem utilizadas em dados reais pelo trabalho exigido na busca dos parâmetros necessários e a baixa confiabilidade dos valores encontrados.

A partir do trabalho de Thomsen (1986), a utilização da anisotropia foi bastante simplificada na sísmica através da quantificação da anisotropia em função das velocidades de propagação de onda através de parâmetros que possuem sentido intuitivo. No caso das equações de NMO para meios transversalmente isotrópicos, as equações de Thomsen tornaram o problema muito mais simples a ponto da medição da anisotropia para VTI (transversalmente isotrópica com eixo vertical) poder ser realizada com apenas um parâmetro se o processamento for realizado no domínio do tempo (Tsvankin & Thomsen, 1995; Alkhalifah, 1997; Tsvankin & Grechka, 2005).

Entretanto, ainda existem algumas dificuldades na utilização de aproximações que consideram anisotropia no processamento sísmico, como 1) a escolha da aproximação mais indicada para o meio (Tsvankin & Grechka, 2005), pois várias equações propostas na literatura simulam uma mesma simetria anisotrópica (Fomel & Grechka, 2001), 2) a adaptação em dados reais de equações que foram desenvolvidas para modelos teóricos (Rasolofosaon, 2000), 3) os métodos de realização de análise de velocidade existentes se tornarem trabalhosos para algumas equações e modelos (Alkhalifah, 1997; Elapavuluri, 2003; Lines, 2005), e 4) em casos

em que o efeito da anisotropia pode ser mascarado ou confundido com outros problemas (Jones et al., 2003).

É proposta neste trabalho uma nova metodologia para realizar análise de velocidade com qualquer aproximação de NMO, inclusive em dados anisotrópicos em geral (embora este trabalho só utilize as aproximações para VTI). A principal vantagem deste método é que todos os parâmetros não conhecidos das equações de entrada, ou equações de NMO, são obtidos ao mesmo tempo, sem a necessidade de se repetir a análise de velocidade para cada termo da equação, como realizado na análise de velocidade convencional (Taner & Koehler, 1969; Alkhalifah, 1997; Xiao et al., 2004; Lines, 2005).

Poucos trabalhos científicos, dentre os pesquisados nestes três anos de revisão bibliográfica, discutem a quantificação do erro obtido no processamento quando não se considera anisotropia, embora este mesmo erro tenha sugerido o desenvolvimento de equações de NMO de quarta ordem. Banik (1984) verificou, a partir de dados reais, uma diferença entre a profundidade de determinados refletores estimados pelo processamento e a profundidade real do refletor encontrado na perfuração, e atribuiu essa diferença à anisotropia. A partir desta conclusão, Banik (1984) realiza uma comparação entre velocidades obtidas no perfil sônico e no processamento sísmico na tentativa de fazer uma quantificação de anisotropia das rochas utilizadas no estudo.

Boechat (1997) estudou a diferença entre as velocidades intervalares calculadas a partir do processamento e as velocidades reais em alguns modelos sintéticos. Seu resultado quantifica a diferença de 10-13% em velocidades intervalares para os modelos estudados no trabalho. Já em Lines (2005), existe uma pequena discussão sobre o efeito de se encontrar uma velocidade maior que a velocidade correta quando o modelo é anisotrópico e o processamento é isotrópico; porém não se quantificou este efeito.

Um dos objetivos deste trabalho é uma quantificação do erro obtido no processamento sísmico quando uma abordagem isotrópica é escolhida para processar dados sintéticos originalmente anisotrópicos criados a partir de modelagem numérica aplicada em modelos geológicos simples baseados em campos produtores de hidrocarbonetos da Bacia de Campos. Esta quantificação da velocidade NMO quando não é utilizada uma aproximação apropriada para realizar análise de velocidade, ou seja, quando o meio é anisotrópico e o processamento não considera

anisotropia, é importante porque, entre outros efeitos, o erro é transferido para a profundidade de um evento quando convertido (de tempo para profundidade) a partir da velocidade NMO obtida pelo processamento.

Quando a anisotropia já é considerada na correção de NMO, pode-se estimar os parâmetros de anisotropia para auxiliar na obtenção de uma imagem em tempo ou em profundidade mais próxima da imagem real (Anderson, 1996; Li, 2002; Tsvankin & Grechka, 2005). A estimativa de parâmetros de anisotropia pode ser feita a partir dos parâmetros físicos obtidos na análise de velocidade que considera anisotropia juntamente (no caso VTI) com o conhecimento da velocidade vertical da onda P (Chaisri & Brown, 2003; Elapavuluri, 2003; Kozlov & Varivoda, 2003; Xiao et al., 2004). Os parâmetros são estimados neste trabalho aplicando a metodologia desenvolvida nesta tese para análise de velocidade: dados sísmicos são processados com abordagem anisotrópica e os parâmetros de anisotropia são estimados a partir dos resultados da análise de velocidades realizados a partir de equações de NMO encontradas na literatura, com a equação que obtiver os melhores resultados é sugerida para o processamento de dados VTI.

Esta tese é dividida em seis capítulos, sendo o primeiro esta introdução. O segundo trata de uma revisão dos vários aspectos teóricos necessários para a realização do trabalho, da teoria de propagação de ondas em meios anisotrópicos ao método de traçado de raio para modelagem sísmica numérica.

O terceiro capítulo do trabalho apresenta a quantificação do erro obtido na velocidade RMS (e na conversão em profundidade) em modelos geológicos quando a anisotropia não é considerada no processamento. Esta quantificação é feita utilizando dados sintéticos gerados por modelagem sísmica via traçado de raio variando-se o grau de anisotropia (valor dos parâmetros de anisotropia), espessura das camadas e adicionando-se uma pequena inclinação às camadas.

No Capítulo 4 é desenvolvida uma metodologia alternativa à análise de velocidade convencional com verificação de convergência e são apresentados alguns resultados preliminares de aplicação do método, para que as equações de NMO considerando anisotropia VTI sejam comparadas quando utilizadas em dados sísmicos. Esta comparação ocorre no Capítulo 5, onde é realizada uma estimativa de parâmetros de anisotropia a partir do resultado da análise de velocidade com equações que levam em conta a anisotropia. É demonstrado como o processamento para o meio anisotrópico corrige melhor o sobretempo normal do evento sísmico, e

também é mostrado um exemplo de migração em profundidade em um dado sintético gerado a partir de um modelo com grande variação lateral de velocidade, utilizando os parâmetros de anisotropia estimados do processamento. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.