

# **Relatório de Atividades Pós Doutorado**

**Nome: Rodrigo Bloot**

**Supervisor: Martin Tygel**

**Local: Centro de Estudos do Petróleo – CEPETRO -UNICAMP**

## **Sumário**

- 1. Introdução**
- 2. Descrição das atividades realizadas**
- 3. Outras atividades realizadas**
- 4. Conclusão**
- 5. Referências Básicas**

**Anexo 1 – Plano de trabalho**

**Anexo 2 – Resumo expandido de conferência Internacional**

**Anexo 3- Paper submetido ao periódico Geophysics**

**Anexo 4- Paper submetido ao periódico Geophysics**

**Anexo 5- Carta do Supervisor**

## **1. Introdução**

O presente relatório é uma descrição das atividades por mim realizadas durante os 12 meses do meu afastamento para pós doutorado no Centro de Estudos do Petróleo na Universidade Estadual de Campinas. O Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO), possui 27 anos de existência e foi criado devido uma demanda crescente por pesquisas na área de petróleo e gás. Trata-se de um centro interdisciplinar com reconhecida excelência em pesquisa e ensino no setor de petróleo e gás e reconhecido internacionalmente.

O centro tem como principal objetivo promover a ligação entre a Universidade e a sociedade, oferecendo apoio na forma de cursos, projetos de pesquisa científica e tecnológica e de prestação de serviços na área de Ciências e Engenharia de Petróleo. As bases para o sucesso do centro encontram-se em sua natureza interdisciplinar conectando áreas como Física, Geofísica, Geologia, Matemática Aplicada, Engenharia de Computação entre outras. Além disso, a excelência do trabalho desenvolvido pelo CEPETRO é corroborada por diversos prêmios conquistados em pouco mais de duas décadas de existência.

As atividades do pós doutorado estão vinculadas ao projeto Desenvolvimento e aplicação prática de técnicas de processamento, regularização e imageamento baseadas na tecnologia 3D HPC CRS no domínio pré-empilhado sob a coordenação do professor doutor Martin Tygel.

**Descrição do projeto ao qual o pós-doutorado está vinculado:** O projeto tem como objetivo a generalização das técnicas de tipo Common Reflection Surface (CRS), algoritmos de processamento e imageamento sísmico no domínio pós-empilhado ou zero-offset (ZO), para o domínio pré-empilhado, bem como sua aplicação prática a diversos problemas importantes do imageamento sísmico. Tais problemas incluem a Regularização 5D, Migração CRP (Common Reflection Point) 3D, Tomografias NIP

(Normal Incidence Point), IIP (Image Incident Point) e estereotomografia, bem como estudos sobre anisotropia. Além disso, essas técnicas serão desenvolvidas utilizando uma plataforma computacional (SeisHPC). Essa plataforma garante a escalabilidade do desempenho dos programas que a utilizarão, potencializando o uso intensivo de computação juntamente com técnicas de tolerância a falhas que permitem o processamento de dados sísmicos reais de grande porte (ordem de Terabytes). A vigência do projeto é de 3 anos a partir do seu início, em fevereiro de 2016. Estas atividades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico estão vinculadas ao Grupo de Geofísica Aplicada (GGA), lideradas pelo Professor Martin Tygel. O GGA é um grupo multidisciplinar comprometido com o desenvolvimento e transferência de tecnologia em Geofísica Aplicada e Computação de Alto Desempenho. Todas as atividades de pesquisa dos projetos vinculados a este grupo de pesquisa são realizadas no Laboratório de Geofísica Aplicada (atualmente denominado HPG), localizado nas dependências do CEPETRO.

**Sobre do projeto de pós-doutorado:** Com o esgotamento das reservas de Petróleo localizadas em locais com litologia mais simples, as regiões na subsuperfície onde são procuradas as reservas de hidrocarbonetos estão cada vez mais complexas. Com o objetivo de explorar e identificar reservas de hidrocarbonetos são utilizadas ferramentas baseadas em sísmica, um dos motivos para isso é que pode-se obter uma grande amostragem de dados em profundidade que podem ser tratados com técnicas e interpretações da sísmica. Para isso são levados em consideração as relações que existem entre propriedades sísmicas, petrofísicas e condições do ambiente e isto torna estas técnicas bastante apropriadas para o bom desempenho da indústria de exploração e caracterização de reservatórios de petróleo. Nos métodos de reflexão sísmica são geradas ondas sísmicas artificiais, por meio de uma fonte (bombas, ar comprimido), cujas reflexões na subsuperfície são registradas em receptores (Geofones, Hidrofones). Os tempos de chegada de cada reflexão são então relacionados com as velocidades de propagação da onda nas camadas da subsuperfície. Com técnicas de processamento adequadas é possível fazer um completo tratamento nos dados coletados e construir modelos de velocidade que descrevem com certa fidelidade a geologia do meio.

Entre as técnicas usadas para tratamento de dados sísmicos, o empilhamento sísmico CMP (do Inglês “Common Midpoint”) vem sendo amplamente usado para o processamento de dados sísmicos e nas últimas décadas esta técnica vem obtendo bons resultados e consolidou sua posição na indústria, no entanto, recentemente uma alternativa a este método está ganhando espaço e obtendo boa performance. Trata-se do método CRS (do Inglês “Common Reflection Surface”) que consiste em uma generalização do método CMP e ao realizar o empilhamento dos dados sísmicos leva em consideração mais atributos geológicos do meio e empilha mais traços possibilitando a melhora a relação sinal ruído. A técnica também permite minimizar o estiramento do pulso, trata-se de uma ferramenta bastante versátil que possui outras aplicações incluindo a busca por difrações, tomografia e regularização de dados sísmicos. A busca por técnicas de empilhamento que consigam obter mais informações sobre meios com geologia complexa continua, alguns autores buscaram recentemente fórmulas de tempo de trânsito não hiperbólicas que podem ser usadas em regiões com anisotropia, os modelos matemáticos que foram desenvolvidos ajudam a descrever a realidade com uma certa fidelidade.

Entre os meios que possuem anisotropia são de particular interesse meios anisotrópicos que possuem simetria TI (do Inglês “Transversely Isotropic”) e particularmente muitos resultados e modelos foram recentemente feitos para meios VTI que são meios cujo eixo de simetria é na vertical. Técnicas de processamentos sísmicos

que levam em consideração anisotropias com simetria TI encontram-se em estágio de desenvolvimento bastante avançado uma vez que técnicas de processamento do tipo CMP adaptadas para estes tipos de anisotropia já estão consolidados na literatura. Em especial, Tsvankin (2001) faz um tratamento detalhado de técnicas de processamento sísmicos para meios VTI.

Nossa proposta é um método de empilhamento CRS para meios com anisotropia VTI. Como objetivo geral Desenvolvemos uma fórmula de tempo de trânsito que descreve reflexões simétricas para ondas não convertidas para meios fracamente anisotrópicos com simetria VTI. Realizamos testes numéricos com o objetivo de validar a fórmula obtida, estabelecemos uma relação entre os coeficientes da fórmula CRS e os atributos de ondas N e NIP que emergem no ponto de referência na superfície de medida.

## 2. Descrição das atividades realizadas

As atividades foram realizadas seguindo o plano de trabalho proposto (em anexo). O cronograma de atividades previstas e realizadas encontra-se no Quadro 1. Tal cronograma era composto em 4 etapas. Abaixo segue o fluxo de trabalho realizado descrevendo cada etapa.

**Quadro 1.** Cronograma de atividades previstas e realizadas. As atividades previstas encontram-se marcadas em preto e as realizadas marcadas em vermelho.

Etapa/ Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	X X											
2		X X	X X	X X	X X	X X						
3								X X	X X	X X		
4											X X	X X

**Etapa 1:** Revisão detalhada da literatura e avaliação do estado da arte a ser realizada em 1 mês.

**Descrição da atividade realizada:** Esta era a etapa mais simples das atividades a serem realizadas sendo, no entanto, a mais importante. Um levantamento detalhado dos principais trabalhos científicos realizados recentemente foi feito. Estimativa de parâmetros e imageamento sísmico continuam um tema atual pois tratam-se das primeiras informações cinemáticas que são extraídas dos dados sísmicos. Em relação aos meios com anisotropia, ferramentas e técnicas para a melhora da estimativa dos parâmetros continuam em alta (Xu e Stovas, 2015). Além disso, o processamento anisotrópico real esta longe de estar consolidado na indústria (Tsvankin, 2001) e pesquisas ainda estão sendo realizadas nesta direção (Fomel e Stovas, 2010). Portanto a extensão da

tecnologia CRS para meios com anisotropia efetiva ou simulada é de grande interesse do ponto de vista tecnológico.

### **Etapa 2:** Derivar a formula de tempo de trânsito CRS para meios VTI.

**Descrição da atividade realizada:** Esta etapa corresponde ao núcleo principal da pesquisa uma vez que o tempo de trânsito é a base para a estimativa dos parâmetros que serão usados para se obter informações da estrutura geológica do meio. Existem duas abordagens que podem ser feitas quando se trata de descrever formulas de tempo de trânsito. A primeira consiste em descrever a equação em termos de parâmetros analíticos que representam das derivadas dos dados sísmicos levantados (tempo de trânsito da onda símica), esta formulação independe da estrutura geológica real.

Se uma correlação dos parâmetros analíticos, que são obtidos da resposta de tempo, com os parâmetros efetivos do meio é desejada é necessário formular a formula de tempo de trânsito utilizando conceitos físicos esta seria uma segunda forma de abordar a construção de curvas de tempo de trânsito. Em nossa abordagem para obtenção de tal fórmula foi utilizada teoria do raio paraxial, usando coordenadas centradas no raio, para a obtenção do tempo de trânsito para um meio com anisotropia VTI.

Além de desenvolver uma formulação para descrever o tempo de trânsito em termos dos parâmetros efetivos também desenvolvemos uma biblioteca de algoritmos e rotinas para futuras simulações numéricas. Nesta atividade, que foi realizada conjuntamente com as pesquisas em teoria do raio, foram desenvolvidos algoritmos e programas para a simulação e tratamento de dados sísmicos sintéticos. Usando a equação diferencial não linear para tempos de trânsito, que governa o traçamento de raios para meio VTI, proposta em (Bloot et al, 2013) foi programado uma rotina computacional que simula a propagação e aquisição de dados sísmicos para meios com anisotropia VTI efetiva.

Para o tratamento dos dados simulados obtidos do modelador de traçamento de raios foi desenvolvido uma rotina computacional que realiza otimização por meio do algoritmo (Barros et al, 2015) Differential Evolution (DE) para a estimativa dos parâmetros analíticos usando a equação de tempo de trânsito para meios VTI modelada. Estratégias e aprimoramentos foram introduzidas nos algoritmos para uma melhor precisão na estimativa dos parâmetros. Todas as ferramentas computacionais e algoritmos que foram desenvolvidas estão agora incorporadas ao repositório do laboratório.

### **Etapa 3:** Inversão de parâmetros e empilhamento.

**Descrição da atividade realizada:** Durante a fase de estudos e inicio da pesquisa acreditávamos ser possível usar o CRS para fazer uma estimativa de parâmetros do tipo Dix (Dix, 1955) no entanto os testes realizados em dados sintéticos mostraram que tal procedimento de conversão tempo-profundidade é difícil de ser alcançado por meio das ferramentas existentes na literatura assim como por nossa extensão do método CRS para operar em meios com anisotropia. No entanto, a boa performance da nossa técnica para a estimativa de parâmetros pode ser usada para aproximar uma média dos valores efetivos na superfície que por sua vez, são o dado de entrada em outras ferramentas como tomografia por exemplo.

### **Etapa 4:** Divulgação de resultados.

**Descrição da atividade realizada:** A primeira parte dos resultados iniciais foram submetidos na forma de abstract expandido (em anexo) para o 15th international congress of the Brazilian Geophysical Society and Expogef, o qual é relacionado a pesquisas aplicadas à industria do Petróleo. O abstract foi aceito para apresentação oral a qual foi realizada em Agosto, também o abstract será publicado nos anais do evento. O abstract encontra-se no anexo 2.

O produto final da pesquisa foi submetida ao periódico Geophysics e encontra-se em processo de revisão pelos pares. A revista Geophysics (qualis A1 em Geofísica, B2 em Matemática e JCR 2.3) é a principal literatura na área para desenvolvedores e empresas que trabalham com sismica e sismologia. O manuscrito submetido encontra-se no anexo 3.

**Quadro 2.** Tabela com informações da divulgação dos resultados.

Congresso Internacional	15th international congress of the Brazilian Geophysical Society and Expogef (aceito)
Periódico de circulação Internacional	Geophysics (submetido)

### 3. Outras atividades

Paralelamente ao projeto, realizei pesquisas referentes a tratamento de sinais em colaboração com os doutores Jorge Henrique Faccipieri (Pesquisador UNICAMP) e Tiago Antonio Coimbra (Pesquisador HPG) que são ligados ao HPG. A natureza desta pesquisa estava diretamente relacionada ao meu plano de trabalho principal. Novamente, o produto final da pesquisa foi submetida ao periódico Geophysics e encontra-se em processo de revisão pelos pares. A revista Geophysics (qualis A1 em Geofísica, B2 em Matemática e JCR 2.3) é a principal literatura na área para desenvolvedores e empresas que trabalham com sismica e sismologia. O manuscrito submetido encontra-se no anexo 4.

**Quadro 3.** Tabela com informações da divulgação dos resultados.

Periódico de circulação Internacional	Geophysics (submetido)
---------------------------------------	------------------------

### 4. Conclusão

Os resultados obtidos possibilitam o uso do CRS para imageamento sismico em meios VTI efetivos e meios isotrópicos com variação lateral de velocidade. Além disso, os testes mostraram que a introdução de pontos médios na formula de tempo de trânsito estabilizou o ajuste bem como ajudou no empilhamento atenuando dispersões e perdas de frequência no pulso empilhado.

### 5. Referências Básicas

Alkhalifah T., Tsvankin L., Velocity Analysis for Transversely Isotropic Media, Geophysics, 1995, 60, 1550-1566.

Barros, T., Ferrari, R., Krummenauer, R., and Lopes, R., Differential evolution-based optimization procedure for automatic estimation of common-reflection surface traveltimes parameters, *Geophysics*, 2015, 80, WD189-WD200.

Bloot, R., Schleicher, J., and Santos, L. T., On the elastic wave equation in weakly anisotropic VTI media, *Geophysical Journal International*, 2013, 192, 1144-1155

Dix C. H., Seismic Velocities From Surface Measurements, *Geophysics*, 1955, 20, 68-86.

Fomel S., On Anelliptic Approximation for qP Velocities in VTI media, *Geophysical Prospecting*, 2004, 52, 247-259.

Fomel S., Stovas A., Generalized Nonhyperbolic Moveout Approximation, *Geophysics*, 2010, 75, U9-U18.

Hertweck T., Schleicher, J., Mann J., Data Stacking Beyond CMP, *The Leading Edge*, 2007, 818-827.

Mann J., Rainer J., Muller T., German H., Hubral P., Common Reflection Surface – A Real Data Example, *Journal of Applied Geophysics*, 1999, 302-318.

Thomsen L., Weak Elastic Anisotropy, *Geophysics*, 1986, 51, 1984-1966.

Tsvanskin I., Thomsen L., Nonhyperbolic Reflection Moveout In Anisotropic Media, *Geophysics*, 1994, 59, 1290-1304.

Tsvankin I., Seismic Signatures and Analisys of Reflection Data in Anisotropic Media, Pergamon Press, 2001, Oxford.

Tygel M., Santos L.T., Quadratic Normal Moveouts Of Symmetric Reflections in Elastic Media: A Quick Tutorial, *Studia Geophysica et Geodesica*, 2007, 51, 185-206.

Xu S., Stovas A., Curvature and Anisotropy Estimation Through the CRS Approximation, *Journal of Geophysics and Engineering*, 2015, 12, 934.

## **ANEXO 1**

## **ANEXO 2**

## **ANEXO 3**

## **ANEXO 4**

# **Plano de Trabalho**

## **Dados de Identificação**

Nome: Rodrigo Bloot

IES de origem: Universidade Federal da Integração Latino-Americana -UNILA

IES de destino: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Período: 24 meses

Finalidade: Pesquisa

Linha de Pesquisa: Geofísica Aplicada

Local: Centro de Estudos do Petróleo – CEPETRO

## **Atividades a serem realizadas**

### **De Pesquisa**

Serão realizadas atividades de pesquisa em geofísica aplicada a problemas sísmica e imageamento sísmico seguindo visando os objetivos a seguir:

- **Objetivos Gerais:** Desenvolver uma fórmula de tempo de trânsito que descreva reflexões simétricas para ondas não convertidas para meios fracamente anisotrópicos com simetria VTI.
- **Objetivos Específicos:** Verificar a validade do teorema NIP para meios anisotrópicos, em especial para meios fracamente anisotrópicos VTI. Caracterizar a metodologia matemática que possibilita a demonstração da fórmula do tempo de trânsito não hiperbólica para meios isotrópicos com o objetivo de generalizar esta demonstração para meios VTI. Realizar testes numéricos com o objetivo de validar a fórmula obtida, para isso serão inicialmente usados modelos sintéticos e posteriormente testaremos a eficiência da fórmula para dados reais. Estabelecer uma relação entre os coeficientes da fórmula CRS e os parâmetros do meio bem como desenvolver técnicas que de maneira eficiente realizem a inversão dos parâmetros. Por fim, utilizar as fórmulas obtidas para realização de tomografia NIP para meios VTI.

### **Cronograma:**

O projeto terá a duração de 12 meses com o cronograma detalhado abaixo:

- **Etapa 1-** Revisão detalhada da literatura e avaliação do estado da arte.  
• Duração: 1 mês.
- **Etapa 2 -** Derivar a fórmula de tempo de trânsito CRS para meios VTI.  
• Duração: 6 meses

- **Etapa 3** - Inversão de Parâmetros e Testes Numéricos
- Duração: 3 meses
- **Etapa 4** - Publicação e Divulgação dos resultados
- Duração: 2 meses

Abaixo segue a tabela com o cronograma:

Etapas/Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Etapa 1	X											
Etapa 2		X	X	X	X	X	X					
Etapa 3								X	X	X		
Etapa 4											X	X

## Bibliografia

Alkhalifah T., Tsvankin L., Velocity Analysis for Transversely Isotropic Media, Geophysics, 1995, 60, 1550-1566.

Dix C. H., Seismic Velocities From Surface Measurements, Geophysics, 1955, 20, 68-86.

Fomel S., On Anelliptic Approximation for qP Velocities in VTI media, Geophysical Prospecting, 2004, 52, 247-259.

Fomel S., Stovas A., Generalized Nonhyperbolic Moveout Approximation, Geophysics, 2010, 75, U9-U18.

Hertweck T., Schleicher, J., Mann J., Data Stacking Beyond CMP, The Leading Edge, 2007, 818-827.

Mann J., Rainer J., Müller T., German H., Hubral P., Common Reflection Surface – A Real Data Example, Journal of Applied Geophysics, 1999, 302-318.

Müller T., Common Reflection Surface Stack vs NMO/Stack and NMO/DMO/Stack, 60th Mtg. Eur. Assoc. Expl. Geophys., Extend Abstracts, 1998, Session 1-2.

Taner M. T., Koehler F., Velocity Spectra – Digital Computer Derivation and Applications of Velocity Functions, Geophysics, 1969, 34, 859-881.

Thomsen L., Weak Elastic Anisotropy, Geophysics, 1986, 51, 1984-1966.

Tsvanskin I., Thomsen L., Nonhyperbolic Reflection Moveout In Anisotropic Media, Geophysics, 1994, 59, 1290-1304.

Tsvankin L., Seismic Signatures and Analisys of Reflection Data in Anisotropic Media, Pergamon Press, 2001, Oxford.

Tygel M., Santos L.T., Quadratic Normal Moveouts Of Symmetric Reflections in Elastic Media: A Quick Tutorial, Studia Geophysica et Geodesica, 2007, 51, 185-206.

Xu S., Stovas A., Curvature and Anisotropy Estimation Through the CRS Approximation, Journal of Geophysics and Engineering, 2015, 12, 934.



## The CRS Method for Weakly Anisotropic VTI Media

Rodrigo Bloot \* (CEPETRO/UNILA), Tiago A. Coimbra (CEPETRO/UNICAMP), Jorge H. Faccipieri(CEPETRO/UNICAMP) and Martin Tygel (IMECC/UNICAMP).

Copyright 2017, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do 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.

### Abstract

We describe an extension of the Common-Reflection-Surface (CRS) method for vertical transversely isotropic (VTI) anisotropic media. The obtained second-order coefficients of the extended CRS traveltime explicitly depend on the Thomsen parameters that describe the VTI medium. Considering only the offset direction, the proposed CRS traveltime assumes a nonhyperbolic travelttime character which can be compared with VTI nonhyperbolic traveltimes that considers short-spread normal moveout velocities for plane horizontal reflectors. Numerical experiments showed that the proposed approach yields better travelttime approximations when an estimated stacking velocity is considered instead of short-spread normal moveout velocity.

### Introduction

Since the pioneering work of Mann (1962), traveltime expressions designed for stacking along events of interest have always been a topic of active research in seismic reflection. Generally referred to as moveouts, these traveltimes originally aimed at non-converted primary reflections in isotropic media under the restrictions of common-midpoint (CMP) configuration and small offsets (see, e.g., Tygel and Santos, 2007; Iversen, 2006). Under these considerations, the first moveout, still routinely applied in today's seismic processing, is the normal moveout (NMO) (Taner and Koehler, 1969; Neidell and Taner, 1971). NMO is the simplest example of a hyperbolic (second-order Taylor polynomial of squared travelttime) travelttime.

In the 1980s, technological advances in seismic acquisition (e.g., larger offsets, ocean-bottom cables) posed the demand for a better understanding of wave propagation in anisotropic media, in particular weak elastic anisotropy (such as transversely isotropy (TI)) that are relevant for seismic processing (Helbig, 1983; Hake et al., 1984; Thomsen, 1986; Cohen, 1996; Alkhalifah, 2000; Grechka et al., 2004; Tsvankin, 2012; Bloot et al., 2013).

The description of anisotropy parameters given by Thomsen (1986) for TI media opened the analytic interpretation of anisotropy and allowed the development of moveouts for large offsets in terms of non-hyperbolic

moveouts. Still within the the CMP configuration, a number of such anisotropic moveouts have been reported (Thomsen, 1993; Alkhalifah and Tsvankin, 1995; Tsvankin and Thomsen, 1994; Tsvankin, 1996; Fomel and Grechka, 2001).

By the end of 1990s, moveouts have been proposed free from the restriction of the CMP configuration. The two most prominent ones, all defined for isotropic media, are the Multifocus (MF) (Landa, 2007; Berkovitch et al., 2008; Landa et al., 2010) and the Common-Reflection-Surface (CRS) (Müller and Höcht, 1998; Perroud et al., 1999; Jäger et al., 2001; Hertweck et al., 2007; Fomel and Kazinnik, 2012) moveouts. The key motivation for those moveouts is to make full use of the multicoverage data (far greater than the CMP data), giving rise of much cleaner images. To achieve the extension to arbitrary configurations, the MF and CRS moveouts make use, besides the NMO velocity, of additional parameters. In 2D, the total number of parameters are three. In 3D, the CRS moveout depends on eight parameters. So far, there is no MF moveout available in 3D. The additional parameters have two impacts: The first and very positive one is that the new parameters provide useful kinematical information that can be applied to several purposes such as, e.g., migration (Coimbra et al., 2016), velocity building (Duvaneck, 2004; Iversen and Tygel, 2008; Iversen et al., 2012; Gelius and Tygel, 2015), diffraction imaging (Dell and Gajewski, 2011; Faccipieri et al., 2016) and data regularization (Höcht et al., 2009). The second impact, which can be seen as a drawback, is that a greater number of parameters, as directly estimated by coherency analysis applied to the data leads to an increase of computer costs. The search of computer algorithms to retrieve CRS parameters in an efficient and reliable way is a topic of current investigation in the literature (Bonomi et al., 2014; Barros et al., 2015).

In this paper we describe an extension of CRS moveout for VTI anisotropic media. We show that the obtained moveout has the same form of the isotropic CRS moveout, in which the parameters are explicitly given by means of a multiplying factor that depends on the Thomsen parameters (Thomsen, 1986) that characterize the VTI media. Also, strategies to obtain information about anisotropy for large offsets will be discussed.

### Formulation

We consider 2D seismic reflection data acquired along a single, horizontal line. On that line, source-receiver pairs are specified by midpoint and half-offset coordinates  $(m, h)$ . We consider a super gather of source-receiver pairs arbitrarily located with respect to a reference or central zero-offset pair  $(m_0, 0)$ . For a target (unknown) depth reflector and under the assumption of a vertical transversely isotropic (VTI) medium, our aim is to find an

approximation of the reflection traveltimes (moveout) on that super gather. For simplicity, we assume primary, non-converted reflections.

**Isotropic medium:** Our starting point is the conventional 2D CRS moveout in an isotropic medium, which is given by (Jäger et al., 2001)

$$t^2(m, h) = [t_0 + A\Delta m]^2 + B\Delta m^2 + Ch^2, \quad (1)$$

Here,  $\Delta m = m - m_0$  is the midpoint displacement relative to the central midpoint,  $m_0$ , and  $T_0$  is the traveltimes along the zero-offset ray (two-way traveltimes along the normal ray) from the central point to the target reflector. As seen below, the parameters  $A = A(m_0, T_0)$ ,  $B = B(m_0, T_0)$  and  $C = C(m_0, T_0)$  can be interpreted as kinematical attributes of the seismic propagation involved (see Equations 14–15). Moreover, reciprocity associated with symmetric reflections (see, e.g., Tygel and Santos, 2007) as in the case of primary non-converted reflections here considered, explains the absence (vanishing) of a linear coefficient in  $h$ .

**Remark:** Concerning the CRS moveout Equation 1, we make the following remarks:

- (i) In the case of a CMP gather, defined by setting  $m = m_0$  in Equation 1, the CRS traveltimes reduces to the familiar normal moveout (NMO) traveltimes, namely,

$$t_{\text{CMP}}^2(h) = t_{\text{CRS}}^2(m = m_0, h) = t_0^2 + Ch^2, \quad (2)$$

In particular, we see that

$$V_{\text{NMO}}^2 = 4/C, \quad (3)$$

where  $V_{\text{NMO}}$  is the NMO-velocity at  $(m_0, T_0)$ .

- (ii) For a laterally invariant velocity distribution  $V = V(z)$  and a planar horizontal reflector, the reflection traveltimes is independent of midpoint  $m$ . As a consequence, the derivatives of traveltimes with respect to  $m$  vanish. In this way,  $A = B = 0$ , leading to an identical moveout as the CMP expression 2.

**VTI medium:** Inspired by the nonhyperbolic moveout presented by Tsvankin and Thomsen (1994); Alkhalifah and Tsvankin (1995), which is valid for vertical transversely isotropic (VTI) media, we propose an extension of the CRS traveltimes to those media in the form

$$t_a^2(m, h) = [t_0 + A_a\Delta m]^2 + B_a\Delta m^2 + C_a h^2 + f(h), \quad (4)$$

where

$$f(h) = \frac{D_a h^4}{1 + (D_a/E_a)h^2}, \quad (5)$$

and

$$E_a = 4 \left( \frac{1}{V_h^2} - \frac{1}{[V_{\text{NMO}}^{(a)}]^2} \right), \quad (6)$$

in which  $V_h$  is an effective horizontal velocity to be explained later and  $V_{\text{NMO}}^{(a)}$  is defined as (compare with equation 3)

$$[V_{\text{NMO}}^{(a)}]^2 = 4/C_a. \quad (7)$$

Concerning the proposed weak anisotropy VTI moveout 4, the following considerations can be made:

1. For small offsets:  $f(h) \approx D_a h^4$ ;

2. For large offsets:  $f(h) \approx \left( \frac{4}{v_h(0)^2} - C_a \right) h^2$ .

The first property indicates that the  $f(h)$  acts as a fourth-order term of a Taylor expansion in offset direction. The second property means that, for a horizontal reflector within a constant VTI medium, the moveout Equation 4 is asymptotically exact in the offset direction as seen in Tsvankin and Thomsen (1994).

**Remark:** For the proposed VTI moveout Equation 4, the same observations made for the isotropic (CRS) moveout Equation 4 apply. Namely, both for the CMP configuration ( $m = m_0$ ) as for a planar horizontal reflector, the VTI moveout Equation 4 reduces to

$$t_a^2(m, h) = t_0^2 + C_a h^2 + \frac{D_a h^4}{1 + (D_a/E_a)h^2}. \quad (8)$$

We see, thus, that under the the circumstances of CMP configuration or a planar horizontal reflector, the proposed VTI moveout has the same form as the one proposed by Tsvankin and Thomsen (1994); Alkhalifah and Tsvankin (1995). As shown below, however, our proposed moveout has different expressions for the parameters.

#### Weak anisotropic VTI moveout

Transverse isotropic (TI) media, and as a consequence its particular case of vertical transversely isotropic (VTI) media, can be described in terms of Thomsen parameters (Thomsen, 1986). As shown in Bloot et al. (2013), the eikonal equation, which govern ray tracing in VTI media, has the form

$$V^2 \left( \| \mathbf{p} \|^2 + 2\xi \|\hat{\mathbf{p}}\|^2 + 2\zeta V_p^2 p_3^2 \|\hat{\mathbf{p}}\|^2 \right) = 1, \quad (9)$$

where  $V$  is the vertical velocity of the  $q-P$ ,  $q-SV$  or  $q-SH$  waves. Moreover,  $\xi$  and  $\zeta$  are corresponding wavemode quantities that depend on the Thomsen parameters  $\varepsilon$ ,  $\delta$  and  $\gamma$ . More specifically, we have

$$\text{q-P: } V = V_p, \quad \xi = \varepsilon, \quad \zeta = \delta - \varepsilon, \quad (10)$$

$$\text{q-SV: } V = V_s, \quad \xi = 0, \quad \zeta = \varepsilon - \delta, \quad (11)$$

$$\text{q-SH: } V = V_s, \quad \xi = \gamma, \quad \zeta = 0. \quad (12)$$

As explained in (e.g., Červený, 2001), in an anisotropic media, the propagating direction of a ray is described by the group velocity vector. That vector points to the energy flux direction of the ray. In general, the group velocity vector differs in direction and amplitude from the phase velocity. The latter describes the propagation of wavefronts along the ray. Also relevant to the ray is the phase velocity vector which describes the propagation of the wavefront of the ray. The phase velocity vector is normal to the wavefront.

In the framework of weak anisotropic VTI medium, one can use paraxial ray approximations to find the following relations between the isotropic CRS parameters  $A$ ,  $B$  and  $C$  and their counterpart anisotropic ones  $A_a$ ,  $B_a$  and  $C_a$  given

by

$$A_a = A = \frac{2 \sin(\beta)}{V_0}, \quad (13)$$

$$B_a = H(\xi, \zeta)B = H(\xi, \zeta) \left[ \frac{2t_0 \cos^2(\beta)}{V_0} K_N \right], \quad (14)$$

$$C_a = H(\xi, \zeta)C = H(\xi, \zeta) \left[ \frac{2t_0 \cos^2(\beta)}{V_0} K_{NIP} \right]. \quad (15)$$

Here,  $\beta$  is the angle of the phase velocity (slowness vector) with respect to the vertical and  $V_0$  is the phase velocity at the measurement surface. The quantities  $K_N$  and  $K_{NIP}$  represent the wavefront curvatures of the normal (N)-and normal-incidence-point (NIP)-waves measured at surface point  $(m_0, 0)$ . Under the consideration of the point NIP where the reference normal ray hits the target reflector, the N- and NIP-waves are two conceptual (fictitious) waves defined as follows: (a) The N-wave starts as a wavefront with the shape of the target reflector in the vicinity of NIP and (b) The NIP-wave starts as point source at NIP and progress to the surface. More details can be found, e.g., in Hubral (1983). Finally,  $H(\xi, \zeta)$  denotes the anisotropy factor given by

$$H(\xi, \zeta) = \frac{1 + \xi \sin^2(\beta) - \zeta \sin^2(\beta) \cos^2(\beta)}{1 + 2\xi \sin^2(\beta) + 4\zeta(V_p/V_0)^2 \sin^2(\beta) \cos^2(\beta)}. \quad (16)$$

In the case of  $\xi = \zeta = 0$ , we have  $H(\xi, \zeta) = 1$ . As a consequence,  $A_a = A$ ,  $B_a = B$  and  $C_a = C$ .

**Remark:** The quantities  $\xi$ ,  $\zeta$ ,  $V_p$  and  $V_h$  refer to the reference point  $(m_0, t_0)$  upon which the Equation 4 is defined. As seen below, these quantities can be inverted from the parameters  $D_a$  and  $E_a$ .

#### Expression of parameters $D_a$ and $E_a$

Under the condition that  $K_N \approx 0$ , the parameter  $D_a$  admits an explicit expression in terms of  $\xi$  and  $\zeta$ . That assumption means that the obtained approximation is limited to small curvatures of shallow reflectors. As shown by Fomel and Grechka (2001), we have

$$D_a = \frac{4t_0(V_p/V_0)^2 \zeta [1 - L_1 \tan(\beta)] [\cos(\beta) + \sin(\beta)] K_{NIP}^3}{V_0 L_2}, \quad (17)$$

where

$$L_1 = \frac{\sin(\beta) [1 + 2\xi + 2\zeta(V_p/V_0)^2 \cos^2(\beta)]}{L_2}, \quad (18)$$

in which

$$\begin{aligned} L_2 &= (1 + 2\xi) \sin(\beta) \tan(\beta) + \cos(\beta) \\ &+ 2\zeta(V_p/V_0)^2 \cos^2(\beta) \sin(\beta) [\tan(\beta) + \sin(\beta)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Finally, considering the heuristic assumption

$$V_h^2 \approx [V_{NMO}^{(ss)}]^2 - \zeta V_p^2, \quad (20)$$

and substituting on Equation 6, we obtain

$$E_a = \frac{4}{[V_{NMO}^{(a)}]^2 - \zeta V_p^2} - \frac{4}{[V_{NMO}^{(ss)}]^2}. \quad (21)$$

#### Particular case: Horizontal plane wavefront emerging at the measurement surface

For comparison with the literature, it is interesting to investigate the situation when  $\beta = 0$ , which includes the case of reflection of a plane reflector in a VTI medium. As previously indicated, we have in this case  $H(\xi, \zeta) = 1$ . Setting  $\beta = 0$  in equations 15 and 17, we find

$$C_a = \frac{4}{[V_{NMO}^{(a)}]^2} = \frac{2t_0}{V_0} K_{NIP}, \quad (22)$$

and

$$D_a = 4t_0 \zeta \frac{V_p^2}{V_0^3} K_{NIP}^3 = \frac{32\zeta V_p^2}{t_0^2 [V_{NMO}^{(a)}]^6}. \quad (23)$$

Substitution of equations 22, 23 and 6 into equation 4 produces the proposed moveout  $t_a$  for the case  $\beta = 0$ .

$$\begin{aligned} t_a^2 &= t_0^2 + \frac{4}{[V_{NMO}^{(a)}]^2} h^2 + \frac{32\zeta V_p^2}{t_0^2 [V_{NMO}^{(a)}]^6} \times \\ &\times \left[ 1 + \frac{8([V_{NMO}^{(a)}]^2 - \zeta V_p^2)}{t_0^2 [V_{NMO}^{(a)}]^4} h^2 \right]^{-1} h^4. \end{aligned} \quad (24)$$

We now have the proper conditions to compare the proposed moveout (equation 24) with the one of (Alkhalifah and Tsvankin, 1995), here referred to as AT-moveout and denoted  $t_{AT}$ , for P-wave propagation, the latter being given by

$$t_{AT}^2 = t_0^2 + \frac{4}{[V_{NMO}^{(ss)}]^2} h^2 - \frac{32\eta h^4}{[V_{NMO}^{(ss)}]^2 [t_0^2 [V_{NMO}^{(ss)}]^2 + 4(1 + 2\eta)h^2]}. \quad (25)$$

Here,  $V_{NMO}^{(ss)}$  and  $\eta$  are, respectively, the short-spread normal moveout velocity (Thomsen, 1986) and the anisotropy parameter

$$V_{NMO}^{(ss)} = V_p \sqrt{1 + 2\delta} \quad \text{and} \quad \eta = \frac{\epsilon - \delta}{1 + 2\delta}. \quad (26)$$

Note that the velocities  $V_{NMO}^{(a)}$  and  $V_{NMO}^{(ss)}$  have very distinct expressions. The short-spread normal moveout,  $V_{NMO}^{(ss)}$ , was defined in Thomsen (1986) for a horizontal plane reflector and  $V_{NMO}^{(a)}$  is related to the NIP-wave curvature  $K_{NIP}$ . In the homogeneous isotropic case both collapse to the same velocity. However, in the VTI media, the lateral velocity variation makes the NIP-wavefront change its format even in homogeneous case.

**Analysis of moveout errors:** It is now instructive to investigate the sensitivity of the non-hyperbolic terms in the above moveouts for a change in NMO velocities only. For that matter, we analyze the traveltimes errors on three materials described on Table 1, whose experimental values are reported in Thomsen (1986). For each material, we consider a synthetic model with a single plane horizontal reflector, at 2 km depth, for which the seismic data were simulated by anisotropic ray tracing for 12 km maximum offset. Only P-waves were considered. Conventional velocity analysis, using a hyperbolic travelttime, was performed on the modeled CMP gather and the stacking

velocity,  $V_{STK}$ , was estimated using the heuristic algorithm Differential Evolution (Barros et al., 2015) considering all traces.

The theoretical values of  $V_{NMO}^{(a)}$  were computed from the second-derivative (parameter  $C_a$ ) of the exact reflected traveltime for each material. Also, the values for  $V_{NMO}^{(ss)}$  were computed by equation 26 upon considering the given values in Table 1.

Table 1: Anisotropic materials considered in the numerical experiments.

Material	$v$ (m/s)	$\varepsilon$	$\delta$
Taylor sandstone	3368	0.110	-0.035
Dry Green River Shale	3292	0.195	-0.220
Mesaverde sandstone	2998	0.010	0.012

For the case of Taylor sandstone, Figure 1 shows the relative error in offset direction of the proposed (black curve) and AT (red curve) moveouts with respect to the exact (modeled) moveout, both with their respective theoretical velocities and with the given modeled anisotropic parameters. The AT moveout outperforms the proposed moveout, achieving maximum relative error of 1% and good asymptotic approximation. The proposed traveltime presents less accuracy. In both cases, the maximum relative error does not exceed 2.5%, even considering an aperture of 12 km. However, when the estimated stacking velocity,  $V_{STK}$ , is considered, Figure 2 shows that the proposed moveout achieves better accuracy (less than 4%) than the AT moveout (less than 10%).

It's worth mentioning that the sensitivity of both moveouts differs when theoretical or estimated velocities are considered. Note that the proposed moveout shows smaller discrepancies between the theoretical and estimated velocities. The comparison of all velocities can be found in Table 2.

Table 2: Theoretical and estimated velocities obtained for each material.

Material	$V_{NMO}^{(ss)}$	$V_{NMO}^{(a)}$	$V_{STK}$
Taylor sandstone	3248	3377	3657
Dry Green River Shale	2463	2940	3715
Mesaverde sandstone	3033	3037	3029

Figure 3 shows the error considering the theoretical velocities with their respective traveltimes for Dry Green River Shale model. Again, the AT traveltime, using  $V_{NMO}^{(ss)}$ , showed a maximum relative error of 1% yielding a good asymptotic behavior on larger offsets. The proposed traveltime, using  $V_{NMO}^{(a)}$ , loses accuracy, presenting a maximum error of 5%. In the case of using the estimated velocity,  $V_{STK}$ , the pattern observed on the previous example is present, as shown in Figure 4. Now, the proposed approach achieved a maximum error of 10%

and AT obtained a maximum error of 30%. Once more, the comparison of the obtained velocities can be found in Table 2.

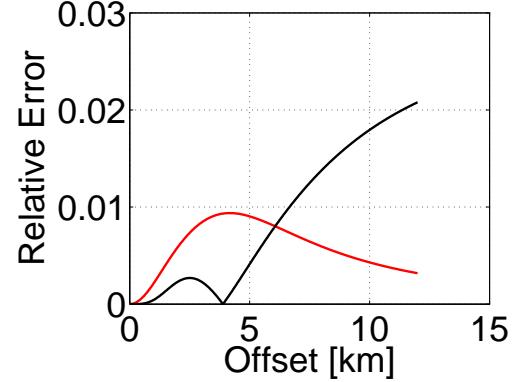


Figure 1: Taylor sand model: Relative error of the proposed (black solid line) and AT (red solid line) moveouts with respect to the exact (modeled) moveout. Theoretical velocities,  $V_{NMO}^{(a)}$  and  $V_{NMO}^{(ss)}$ , respectively, have been taken.

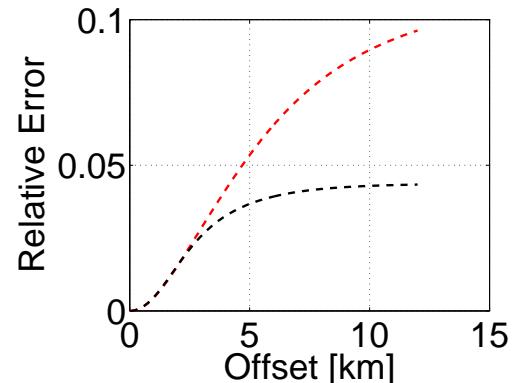


Figure 2: Taylor sand model: Relative error of the proposed (black dashed line) and AT (red dashed line) moveouts with respect to hyperbolic moveout with velocity,  $V_{STK}$ .

**Elliptic anisotropy:** When  $\varepsilon = \delta$ , which implies  $\eta = \zeta = 0$ , on Equations 24 and 25, both fourth-order terms vanishes and as a consequence, we have that  $V_{NMO}^{(a)} = V_{NMO}^{(ss)}$ . Despite the fact that this condition does not exists in practice, it is interesting due to its algebraic simplicity. This way, we can conclude that  $V_{NMO}^{(a)}$  and  $V_{NMO}^{(ss)}$  will be exactly the same only for isotropic media where we have  $\zeta = \eta = 0$ .

Even knowing that the elliptic case does not occur in reality it is interesting to observe the condition  $\varepsilon \approx \delta$ . Mesaverde immature sandstone described in Table 1 can be seen as a good example. In this case we have  $V_{NMO}^{(a)} \approx V_{NMO}^{(ss)}$  so that the term  $D_a$  takes the form

$$D_a = 4t_0\zeta \frac{V_p^2}{V_0^3} K_{NIP}^3 \approx \frac{-32(\varepsilon - \delta)}{V_p^4(1+2\delta)^3 t_0^2} = \frac{-32\eta}{T_0^2 [V_{NMO}^{(ss)}]^4}. \quad (27)$$

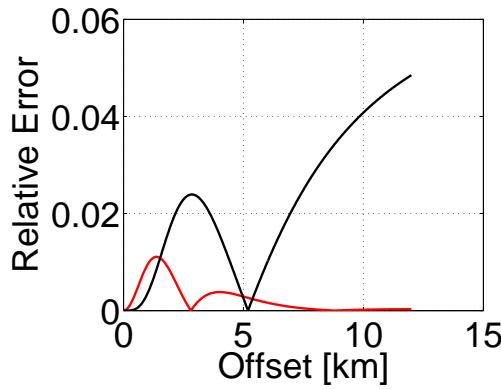


Figure 3: Dry Green River shale model: Relative error of the proposed (black solid line) and AT (red solid line) moveouts with respect to the exact (modeled) moveout. Theoretical velocities,  $V_{NMO}^{(a)}$  and  $V_{NMO}^{(ss)}$ , respectively, have been taken.

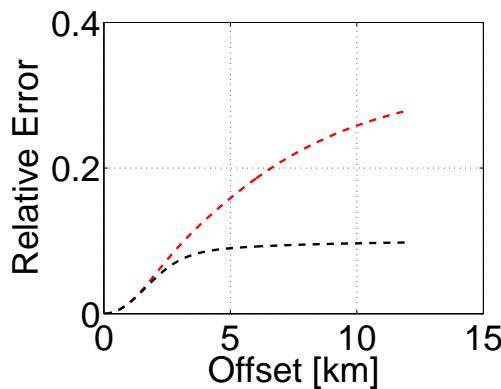


Figure 4: Dry Green River shale model: Relative error of the proposed (black dashed line) and AT (red dashed line) moveouts with respect to hyperbolic moveout with velocity,  $V_{STK}$ .

This means that the our approach coincides with the AT moveout in the case of small offsets. Figure 5 and 6, and also Table 2, shows numerical experiments that confirms this hypothesis. Moreover, in this cases, the stacking velocity,  $V_{STK}$ , does not differs from the theoretical velocities.

### Discussion and Conclusions

In this work we proposed a CRS traveltimes for weakly anisotropic VTI media. In the 2D situation considered here, the proposed moveout consists of the addition of two terms: the first one is a three-parameter CRS-type hyperbolic term which depends on midpoint and half-offset; the second one is a two-term non-hyperbolic term that depends on half-offset only. The new moveout has the same form of the well-established Alkalifah-Tsvankin moveout, however with a different definition of the parameters.

In order to compare the new moveout with the literature, we consider the particular case where the normal ray (around which the moveout is defined) emerges at the

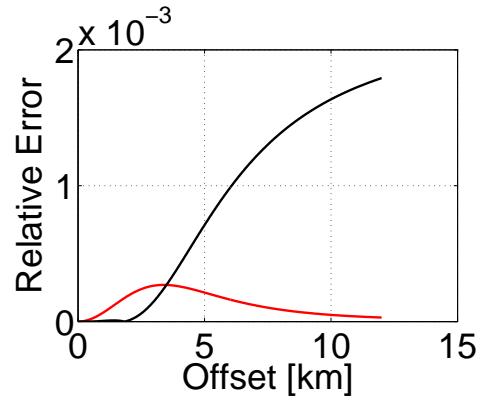


Figure 5: Mesaverde immature sandstone model: Relative error of the proposed (black solid line) and AT (red solid line) moveouts with respect to the exact (modeled) moveout. Theoretical velocities,  $V_{NMO}^{(a)}$  and  $V_{NMO}^{(ss)}$ , respectively, have been taken.

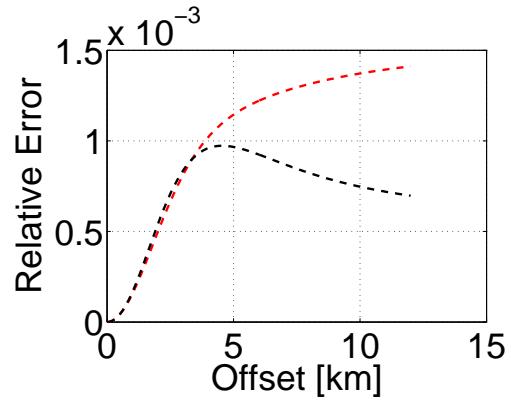


Figure 6: Mesaverde immature sandstone model: Relative error of the proposed (black dashed line) and AT (red dashed line) moveouts with respect to hyperbolic moveout with velocity,  $V_{STK}$ .

surface. This includes the case of a single plane horizontal reflector within a VTI medium and, in this way, it allows for a comparison with the well-established established Alkalifah-Tsvankin (TA) traveltimes. Our numerical experiments considered two cases for the computation of the TA moveout: the first one used the exact short-spread normal moveout velocity of the model, the second one used the more practical situation of approximating that velocity by the stacking velocity estimated from the data. That estimation used the conventional velocity analysis with the hyperbolic moveout. Our results showed that the Alkalifah-Tsvankin moveout outperforms our proposed moveout when the exact short-spread normal moveout is taken. However, the use of the stacking velocity instead leads to better approximation of the proposed moveout. In addition, the results also suggest that the larger the difference between the Thomsen parameters  $\epsilon$  and  $\delta$ , the lower the accuracy is observed in the Alkalifah-Tsvankin moveout. Our analysis suggests that this happens because, in this case, the short-spread normal moveout velocity differs more substantially from the estimated stacking velocity.

This conclusion is in accordance with the reported results in the literature.

### Acknowledgments

We acknowledge support from the Center for Petroleum Studies (CEPETRO), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq-Brazil), the National Institute of Science and Technology of Petroleum Geophysics (ICTP-GP-Brazil) and the Center for Computational Engineering and Sciences (Fapesp/Cepid 2013/08293-7-Brazil). We also acknowledge support from the sponsors of the Wave Inversion Technology (WIT) Consortium and Petrobras.

### References

- Alkhalifah, T., 2000, An acoustic wave equation for anisotropic media: *Geophysics*, **65**, 1239–1250.
- Alkhalifah, T., and L. Tsvankin, 1995, Velocity analysis for transversely isotropic media: *Geophysics*, **60**, 1550–1566.
- Barros, T., R. Ferrari, R. Krummenauer, and R. Lopes, 2015, Differential evolution-based optimization procedure for automatic estimation of common-reflection surface traveltime parameters: *Geophysics*, **80**, WD189–WD200.
- Berkovitch, A., I. Belfer, and E. Landa, 2008, Multifocusing as a method of improving subsurface imaging: *The Leading Edge*, **27**, 250–256.
- Bloot, R., J. Schleicher, and L. T. Santos, 2013, On the elastic wave equation in weakly anisotropic VTI media: *Geophysical Journal International*, **192**, 1144–1155.
- Bonomi, E., C. Tomas, P. Marchetti, and G. Caddeo, 2014, Velocity-independent and data-driven prestack time imaging: It is possible: *The Leading Edge*, **33**, 1008–1010.
- Cervený, V., 2001, Seismic ray theory: Cambridge University Press.
- Cohen, J., 1996, Analytic study of the effective parameters for determination of the NMO velocity function in transversely isotropic media: Technical Report CWP, Colorado School of Mines, **CWP-191**.
- Coimbra, T. A., D. S. R. J. H. Faccioli, and M. Tygel, 2016, Common-reflection-point time migration: *Studia Geophysica et Geodaetica*, **60**, 500–530.
- Dell, S., and D. Gajewski, 2011, Common-reflection-surface-based workflow for diffraction imaging: *Geophysics*, **76**, S187–S195.
- Duvaneck, E., 2004, 3d tomographic velocity model estimation with kinematic wavefield attributes: *Geophysical Prospecting*, **52**, 535–545.
- Faccioli, J. H., T. A. Coimbra, L.-J. Gelius, and M. Tygel, 2016, Stacking apertures and estimation strategies for reflection and diffraction enhancement: *Geophysics*, **81**, V271–V282.
- Fomel, S., and V. Grechka, 2001, Nonhyperbolic reflection moveout of p-waves: An overview and comparison of reasons: **CWP**, **372**.
- Fomel, S., and R. Kazinnik, 2012, Non-hyperbolic common reflection surface: *Geophysical Prospecting*, **61**, 21–27.
- Gelius, L.-J., and M. Tygel, 2015, Migration-velocity building in time and depth from 3D (2D) Common-Reflection-Surface (CRS) stacking - theoretical framework: *Studia Geophysica et Geodaetica*, **59**, 253–282.
- Grechka, V., L. Zhang, and J. W. Rector III, 2004, Shear waves in acoustic anisotropic media: *Geophysics*, **69**, 576–582.
- Hake, H., K. Helbig, and C. Mesdag, 1984, Three term taylor series for  $t^2 \times t^2$  curves of p and s waves over layered transversely isotropic ground: *Geophysical Prospecting*, **32**, 828–850.
- Helbig, K., 1983, Elliptical anisotropy—its significance and meaning: *Geophysics*, **48**, 825–832.
- Hertweck, T., J. Schleicher, and J. Mann, 2007, Data stacking beyond CMP: *The Leading Edge*, **26**, 818–827.
- Höcht, G., P. Ricarte, S. Bergler, and E. Landa, 2009, Operator-orientated CRS interpolation: *Geophysical Prospecting*, **57**, 957–979.
- Hubral, P., 1983, Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth: *Geophysics*, **48**, 1051–1062.
- Iversen, E., 2006, Tutorial: Amplitude, fresnel zone, and nmo velocity for pp and ss normal incidente reflections: *Geophysics*, **71**, W1–W14.
- Iversen, E., and M. Tygel, 2008, Image-ray tracing for joint 3D seismic velocity estimation and time-to-depth conversion: *Geophysics*, **73**, S99–S114.
- Iversen, E., M. Tygel, B. Ursin, and M. V. Hoop, 2012, Kinematic time migration and demigration of reflections in pre-stack seismic data: *Geophysical Journal International*, **189**, 1635–1666.
- Jäger, R., J. Mann, G. Höcht, and P. Hubral, 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes: *Geophysics*, **66**, 97–109.
- Landa, E., 2007, Beyond conventional seismic imaging: EAGE.
- Landa, E., S. Keydar, and T. J. Moser, 2010, Multifocusing revisited - inhomogeneous media and curved interfaces: *Geophysical Prospecting*, **58**, 925–938..
- Mann, H., 1962, Common relection point horizontal data stacking techniques: *Geophysics*, **27**, 927–938.
- Müller, T., and G. Höcht, 1998, Common reflection surface staking method- imaging with an unknown velocity model: *SEG Expanded Abstracts*, **17**, 1764–1767.
- Neidell, N., and M. Taner, 1971, Semblance and other coherency measures for multichannel data: *Geophysics*, **36**, 482–497.
- Perroud, M., P. Hubral, and G. Höcht, 1999, Common-reflection-point stacking in laterally inhomogeneous media: *Geophysical Prospecting*, **47**, 1–24.
- Taner, M. T., and F. Koehler, 1969, Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions: *Geophysics*, **34**, 859–881.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, 1954–1966.
- , 1993, Weak anisotropic reflections, in Offset dependent reflectivity: *SEG*, 103–114.
- Tsvankin, I., 1996, P-wave signatures and notation for transverseley isotropic media: An overview: *Geophysics*, **61**, 467–483.
- , 2012, Seismic signatures and analysis of reflection data in anisotropic media: Pergamon Press.
- Tsvankin, I., and L. Thomsen, 1994, Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media: *Geophysics*, **59**, 1290–1304.
- Tygel, M., and L. T. Santos, 2007, Quadratic normal moveout of symmetric reflections in elastic media: A quick tutorial: *Studia Geophysica et Geodetica*, **2**, 533–540.

## GEOPHYSICS®

**Common Reflection Surface method in weakly anisotropic  
VTI media**

Journal:	<i>Geophysics</i>
Manuscript ID	GEO-2017-0368.R1
Manuscript Type:	Technical Paper
Date Submitted by the Author:	04-Oct-2017
Complete List of Authors:	Bloot, Rodrigo; UNILA, Math Coimbra, Tiago; University of Campinas / UNICAMP, CEPETRO Faccipieri Jr., Jorge; University of Campinas, Center for Petroleum Studies Tygel, Martin; State University of Campinas, Applied Mathematics
Keywords:	anisotropy, traveltime, stacking
Area of Expertise:	Anisotropy

SCHOLARONE™  
Manuscripts

# Common Reflection Surface method in weakly anisotropic VTI media

Rodrigo Bloot\*,†, Tiago A. Coimbra\*, Jorge H. Faccipieri\* and Martin Tygel\*,‡

\* University of Campinas, Center for Petroleum Studies and National Institute of  
Petroleum Geophysics

Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária

13089-970, Campinas, SP, Brazil

† Federal University of Latin America Integration

Avenida Silvio Americo Sasdelli, 1842, Vila A

85866-000, Foz do Iguaçu, PR, Brazil

‡ University of Campinas, Department of Applied Mathematics

Rua Sérgio Buarque de Holanda, 651, Cidade Universitária

13083-859 Campinas, SP, Brazil

(October 4, 2017)

CRS stacking method in weakly anisotropic VTI media

Running head: CRS method in VTI media

## ABSTRACT

The extraction of kinematic parameters from wave propagation through traveltimes is one of the great challenges in seismic data processing. In this context, we modify the common-reflection-surface (CRS) traveltime to improve its accuracy and also interpret its parameters via paraxial ray theory in an anisotropic medium obtaining information about the wavefront curvatures measured at surface. The proposed method consists of searching for the best

## GEOPHYSICS®

## Stretch-free generalized normal moveout correction

Journal:	<i>Geophysics</i>
Manuscript ID	GEO-2017-0692
Manuscript Type:	Technical Paper
Date Submitted by the Author:	19-Oct-2017
Complete List of Authors:	Faccipieri Jr., Jorge; University of Campinas, Center for Petroleum Studies Coimbra, Tiago; University of Campinas / UNICAMP, CEPETRO Blook, Rodrigo; UNILA, CICN
Keywords:	multiparameter, NMO, stacking, travelttime
Area of Expertise:	Signal Processing

SCHOLARONE™  
Manuscripts

## Stretch-free generalized normal moveout correction

Jorge H. Faccipieri<sup>\*†</sup>, Tiago A. Coimbra<sup>\*‡</sup>, Rodrigo Bloot<sup>†‡</sup>

<sup>\*</sup>*University of Campinas, Center for Petroleum Studies*

*Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária*

*13089-970, Campinas, SP, Brazil*

<sup>†</sup>*Federal University of Latin America Integration*

*Avenida Silvio Americo Sasdelli, 1842, Vila A*

*85866-000, Foz do Iguaçu, PR, Brazil*

<sup>‡</sup>*Brazil and National Institute of Petroleum Geophysics (INCT-GP)*

*Salvador, BA, Brazil*

(October 19, 2017)

Running head: Stretch-free GNMO correction

### ABSTRACT

For data processing and stacking purposes, a normal moveout (NMO) correction of seismic reflection data may have its amplitudes and frequency content compromised by stretching when considering shallow or large offset events. Moreover, such NMO corrections depends on the considered traveltimes approximations. In this context, a quantitative analysis on the stretch effect is conducted on a general traveltime expression depending on half-offset and midpoint coordinates. Through this analysis, a procedure to eliminate stretch is proposed, which can be applied to several traveltime approximations. The pro-



Ilmo. Sr.  
Prof. Dr. Luciano Calheiros Lapas  
Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
Foz do Iguaçu, PR  
Brasil

Campinas, 20 de Outubro de 2017

Prezado Prof. Dr. Luciano Calheiros Lapas

Venho por meio desta declarar que o professor Rodrigo Bloot realizou as atividades de Pós-doutorado em nossa instituição sobre a minha supervisão. O professor concluiu as pesquisas relacionadas a tecnologia CRS para meios com anisotropia VTI. Esperamos que esta parceria continue em outros trabalhos que estamos desenvolvendo em nosso laboratório.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Martin Tygel  
Coordenador HPG

Centro de Estudos de Petróleo - CEPETRO  
CP 6052, Cidade Universidade “Zeferino Vaz”, 13083-970 Campinas-SP, Brasil  
Tel: +55 (19) 3521 4664 Fax: + 55 (19) 3289-4916  
E-mail: online@cepetro.unicamp.br



Ministério da Educação  
Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
Instituto Latino-Americanano de Ciências da Vida e da Natureza  
Centro Interdisciplinar de Ciências da Natureza – CICN

**Para:** Colegiado do Centro Interdisciplinar de Ciências da Vida e da Natureza

**Assunto:** Apreciação do Relatório Final de Afastamento para Pós-Doutorado do professor Rodrigo Bloot.

**Relator:** Victor Arturo Martinez Leon

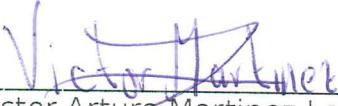
O professor Rodrigo Bloot solicitou seu afastamento para o Pós-doutoramento, com ônus limitado, por um período de 12 meses a partir de 20/10/2016.

A resolução número 008/2014 de 30 de Abril de 2014 - CONSUN - UNILA - que normatiza este procedimento exige um relatório semestral de atividades a ser apresentado pelo professor(a) afastado.

No relatório enviado o professor detalha as atividades realizadas durante os doze meses do afastamento. No referido relatório consta que o professor obteve três resultados. O primeiro resultado, realizado em colaboração com Tiago Coimbra, Jorge Faccipieri e Martin Tygel, intitulado **The CRS Method for Weakly Anisotropic VTI Media**, foi apresentado num **congresso internacional** organizado pela **Sociedade Brasileira de Geofísica-SBGF** nos dias do **31 de julho a 3 de agosto com sede em Rio de Janeiro**. O Abstract deste trabalho foi **aceito** e será publicado nos anais desse congresso. Os outros dois resultados, também realizados em colaboração com Tiago Coimbra, Jorge Faccipieri e Martin Tygel, intitulados **Common Reflection Surface method in weakly anisotropic** e **Stretch-free generalized moveout correction**, foram submetidos no **Journal Geophysics**.

O relator entende que o professor desempenhou as atividades de forma satisfatória e recomenda a **Aprovação do Relatório**.

Foz do Iguaçu, 29 de Novembro de 2017.

  
\_\_\_\_\_  
Victor Arturo Martinez Leon  
Relator

Victor Arturo Martinez Leon  
Docente UNILA  
SIAPE 1152921



Ministério da Educação  
Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza  
Centro Interdisciplinar de Ciências da Natureza

**Despacho**

Foz do Iguaçu, 02 de março de 2018.

Ao Prof. Luciano C. Lapas  
Presidente do CONSUNI/ILACVN

Assunto: Relatório Final de afastamento para Pós-doutoramento do Prof. Rodrigo Bloot.

Encaminha-se o presente relatório do Prof. Rodrigo Bloot, com a devida apreciação da área da Matemática.

Essa coordenação reitera que o Prof. Bloot desempenhou seu papel de maneira muito satisfatória, tendo sua recomendação para APROVAÇÃO pelo CONSUNI/ILACVN.

A reunião será instalada com maioria simples.

Atenciosamente,

Marcio de Sousa Góes  
Marcio de Sousa Góes  
Docente UNILA  
SIAPE 1999746  
Márcio de Sousa Góes  
Coordenador Centro de Ciências da Natureza

1  
2  
3  
4  
5  
6

**EXTRATO DA ATA DA QUINQUAGÉSIMA  
TERCEIRA REUNIÃO DO CENTRO  
INTERDISCIPLINAR DE CIÊNCIAS DA  
NATUREZA, REALIZADA EM OITO DE  
MARÇO DE DOIS MIL E DEZOITO.....**

7 Aos oito dias do mês de março de dois mil e dezoito, os professores do Centro Interdisciplinar de  
8 Ciências da Natureza, conforme lista de presença anexa, reuniram-se no PTI, Bloco 3, Espaço 4,  
9 Sala 4, na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná. O Coordenador do CICN, Prof. Márcio de Sousa Góes,  
10 deu início a reunião às 14:05h. Estiveram presentes os seguintes professores: Abraão Jesse  
11 Capistrano de Souza, Aline Theodoro Toci, Álvaro Barcellos Onofrio, Caroline da Costa Silva  
12 Gonçalves, Dafni Fernanda Zenedin Marchioro, Daniel Luiz Nedel, Elmha Coelho Martins Moura,  
13 Eralcilene Moreira Terezio, Fábio Silva Melo, Gustavo de Jesus Lopez Nunez, Henrique César  
14 Almeida, Janine Padilha Botton, José Ricardo Cezar Salgado, Kelly Daiane Sossmeier, Marcela  
15 Boroski, Marcelo Gonçalves Hönnicke, Marciana Pierina Uliana Machado, Márcio de Sousa Góes,  
16 Maria das Graças Cleophas Porto, Mariana Ramos Reis Gaete, Paula Andrea Jaramillo Araújo,  
17 Priscila Gleden Novaes da Silva, Rafael Otoniel Ribeiro Rodrigues da Cunha, Raphael Fortes  
18 Infante Gomes, Rodrigo Bloot, Rodrigo Leonardo de Oliveira Basso, Rodrigo Santos da Lapa,  
19 Wellington Francisco, Yunier Garcia Basabe (29). Justificativas de Ausência (5): Cleilton Aparecido  
20 Canal, Davi da Silva Monteiro, Eduardo do Carmo, Guilherme Vasconcelos da Silva Mauro e Victor  
21 Arturo Martinez Leon (Colegiado da Matemática). Com quórum legal, o Coordenador conduziu a  
22 sessão tratando entre outras da seguinte pauta: **2. Aprovar o relatório de pós-doutorado do Prof.<sup>º</sup>**  
23 **Rodrigo Bloot**, da área de Matemática – relator Prof.<sup>º</sup> Victor Arturo Martinez Leon – apresentada  
24 relatoria favorável à homologação, por considerar satisfatório o seu desempenho nas atividades do  
25 programa, desenvolvidas no Centro de Estudos do Petróleo (CEPETRO), da UNICAMP, desde  
26 20/10/2016, e durante os 12 (doze) meses subsequentes. Colocado em votação – **aprovado por**  
27 **unanimidade e considerado HOMOLOGADO o seu relatório de afastamento para pós-**  
28 **doutorado.** E nada mais havendo a tratar, deu-se por encerrada a reunião às 15h55, da qual eu  
29 Patrícia Borim da Silva Pereira, lavrei a presente ata, que uma vez aprovada, será assinada por mim  
30 e pelo Coordenador do Centro Interdisciplinar de Ciências da Natureza. Integra a presente Ata, a  
31 lista de presença dos participantes da referida reunião.

32  
33  
34



35 Patrícia Borim da Silva Pereira  
36 Assistente em Administração  
37

Márcio de Sousa Góes

Coordenador do Centro Interdisciplinar de  
Ciências da Natureza / CICN

*Márcio de Sousa Góes*  
Márcio de Sousa Góes  
Docente UNILA  
SIAPE 1999746



Ministério da Educação  
Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza  
Centro Interdisciplinar de Ciências da Natureza

**LISTA DE PRESENÇA**

53.<sup>a</sup> Reunião Ordinária

08/03/18

1	ABRAAO JESSE CAPISTRANO DE SOUZA	<i>Abraao J. de Souza</i>
2	ALINE THEODORO TOCI	<i>Aline Toci</i>
3	ÁLVARO BARCELLOS ONOFRIO	<i>Alvaro Barcellos Onofrio</i>
4	CAROLINE DA COSTA SILVA GONÇALVES	<i>Caroline Gonalves</i>
5	CATARINA COSTA FERNANDES	
6	CLEILTON APARECIDO CANAL	
7	DAFNI FERNANDA ZENEDIN MARCHIORO	<i>Dafni Fernanda Z. Marchioro</i>
8	DANIEL LUIZ NEDEL	<i>Daniel Nedel</i>
9	DAVI DA SILVA MONTEIRO	
10	DINEIA GHIZZO NETO FELLINI	
11	EDUARDO DO CARMO	
12	ELMHA COELHO MARTINS MOURA	<i>Eelmha Coelho</i>
13	FÁBIO SILVA MELO	<i>Fábio Silva Melo</i>
14	GILCELIA APARECIDA CORDEIRO	
15	GUILHERME VASCONCELOS DA SILVA MAURO	
16	GUSTAVO DE JESUS LOPEZ NUNEZ	<i>Gustavo Lopez Nunez</i>
17	HENRIQUE CESAR ALMEIDA	<i>Henriques Almeida</i>
18	JANINE PADILHA BOTTON	<i>Janine Padilha Botton</i>
19	JOSÉ RICARDO CEZAR SALGADO	<i>José Ricardo Cesar Salgado</i>
20	JUAN DE DIÓS GARRIDO ARRATE	
21	KELLY DAIANE SOSSMEIER	<i>Kelly Sossmeier</i>
22	LUCIANO CALHEIROS LAPAS	

23	MARCELA BOROSKI	<i>Marcela Boroski</i>
24	MARCELO GONÇALVES HÖNNICKE	<i>Marcelo G. Hönnicke</i>
25	MÁRCIA REGINA BECKER	
26	MARCIANA PIERINA ULIANA MACHADO	<i>Marciana Pierina Machado</i>
27	MÁRCIO DE SOUSA GÓES	<i>Márcio Góes</i>
28	MARIA DAS GRAÇAS CLEOPHAS PORTO	<i>Lúcia S. Porto</i>
29	MARIANA RAMOS REIS GAETE	<i>Mariana Ramos</i>
30	NEWTON MAYER SOLORIZANO CHAVEZ	
31	PATRÍCIA COUTO GONÇALVES MAURO	
32	PAULA ANDREA JARAMILLO ARAÚJO	<i>Paula Jaramillo</i>
33	PRISCILA GLEDEN NOVAES DA SILVA	<i>Priscila Gleden N. da Silva</i>
34	RAFAEL OTONIEL RIBEIRO RODRIGUES DA CUNHA	<i>Rafael Otoniel Ribeiro Rodrigues da Cunha</i>
35	RAPHAEL FORTES INFANTE GOMES	<i>Raphael Fortes FG</i>
36	ROBSON APARECIDO FIGUEIREDO	
37	RODRIGO BLOOT	<i>Rodrigo Bloot</i>
38	RODRIGO LEONARDO DE OLIVEIRA BASSO	<i>Rodrigo Leonardo de Oliveira Basso</i>
39	RODRIGO SANTOS DA LAPA	<i>Rodrigo Santos da Lapa</i>
40	SHAHRAM JALALZADEH	
41	VICTOR ARTURO MARTINEZ LEON	
42	WELINGTON FRANCISCO	<i>Wellington Francisco</i>
43	YUNIER GARCIA BASABE	<i>Yunier García Basabe</i>
44	E RALCILENE	<i>Eralcilene</i>
45		
46		
47		
48		
49		
50		