

Bruna de Lucca Carbonesi

**Tomografia de Refração e sua Aplicação na  
Identificação dos Altos Estruturais do  
Gráben da Casa de Pedra, RJ**

Brasil  
2018



Bruna de Lucca Carbonesi

**Tomografia de Refração e sua Aplicação na  
Identificação dos Altos Estruturais do Gráben da  
Casa de Pedra, RJ**

Projeto Final II em Geofísica apresentado  
à Universidade Federal Fluminense como  
exigência para obtenção do título de Ba-  
charel em Geofísica

Universidade Federal Fluminense

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos

Brasil  
2018

Bruna de Lucca Carbonesi

**Tomografia de Refração e sua Aplicação na  
Identificação dos Altos Estruturais do Gráben da  
Casa de Pedra, RJ**

Projeto Final II em Geofísica apresentado  
à Universidade Federal Fluminense como  
exigência para obtenção do título de Ba-  
charel em Geofísica

Trabalho aprovado. Brasil, 20 de Dezembro de 2018:

---

**Prof. Dr. Marco Antonio Cetale  
Santos**  
Orientador (UFF)

---

**Prof. Dr. Luiz Alberto Santos**  
UFF/PETROBRAS

---

**Dr. Vinicius José Oliveira Werneck de  
Carvalho**  
UFF

Brasil  
2018

*Este trabalho é dedicado à minha família,  
meus pais, irmão, marido e meu Pudim,  
que sempre estiveram ao meu lado. <3*



# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, ao Professor e Orientador Marco Cetale, não só pela orientação acadêmica, mas por ser referência de competência, caráter, além de me conceder seu apoio e confiança. Foi fundamental contar com sua vontade de ensinar e desenvolver o conhecimento em conjunto com os alunos. Agradeço pela sua dedicação à Geofísica e à Universidade!

Meus sinceros agradecimentos ao Professor Dr. Luiz Alberto e ao Dr. Vinicius de Carvalho por estarem disponíveis a ler e fazer considerações para o meu trabalho de conclusão de curso. Muito obrigada por esta contribuição!

Um carinhoso obrigada à todos os professores, especialmente, aos que tive a oportunidade de encontrar semanalmente dentro de sala de aula e que certamente contribuíram com a minha formação. Guardarei todos na minha memória e no meu coração.

À todos do Instituto de Geociências e do Departamento de Geologia e Geofísica, meus sinceros agradecimentos pela sempre disponibilidade em colaborar e tornar a graduação mais simples dentro da possibilidade.

Também não posso deixar de citar todos que passaram pelo Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica (GISIS) e pelo Capítulo Estudantil GSS, onde encontrei pessoas incríveis dispostas a compartilhar conhecimento e fornecer bons conselhos. Vocês me acolheram e me fizeram sentir parte da Universidade! Isto foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Foi ali que entendi como sabemos tão pouco e que a troca é o melhor meio de todos aprendermos mais.

É imprescindível mencionar e agradecer o apoio da Rede Geotécnica da Petrobras sob gestão do senhor Marco Antonio Thoaldo Romeiro e à coordenadora técnica Aline Teophilo Silva. Esta dissertação é um dos trabalhos que só foram possíveis através da parceira da Petrobras no compartilhamento de conhecimento e no financiamento do projeto de pesquisa desenvolvido pelo GISIS-UFF. Obrigada pela confiança em nosso grupo!

À Total E&P do Brasil, especialmente, ao geofísico Fernando Koga e à equipe de geociências Matthieu Blanchet, Mikhail Shaldaev, Julien Couchard e Marianne

Jegonday, agradeço pela oportunidade de ter visto, na prática, como a geofísica pode colaborar com grandes projetos de geociências e pela disponibilidade e paciência em ensinar o que se aprendeu em anos de experiência (além, claro, de me estimular no hábito de tomar chá! rs)

Finalmente, gostaria de agradecer àquelas pessoas que estiveram todos os dias (mesmo!) ao meu lado durante esta fase. Luciana Rios e Mariana Lopes, sem vocês tudo seria mais difícil. Saber que vocês estariam sempre juntas comigo tornou a UFF muito mais acolhedora e não me deixaram desanimar. Patrícia Oliveira foi trilhar outros caminhos, mas estive lá em momentos que precisei de apoio e por isso, te agradeço muito.

Ao meu Alexandre, muito obrigada pelo amor, pela paciência e pela coragem de se unir a alguém que escolheu recomeçar e que passaria por momentos difíceis. Você optou por compartilhar os meus desafios e as conquistas (que espero que sejam muitas) e eu te agradeço por isso.

À família do Alexandre, que com certeza ouviu minhas lamentações sobre as dificuldades e sempre me apoiaram.

À minha família, que de longe me incentiva e sempre tem palavras de motivação.

Ao meu irmão, por dizer que eu sou a irmã mais inteligente rs. Uma mentira, mas que me fez acreditar que eu seria capaz.

E aos meus pais, pelo apoio incondicional, por me dar tranquilidade em investir em um passo para trás, mas que me tornaria alguém melhor. Hoje, só estou aqui cheia de felicidade por vocês!

Pudinzinho, te amo <3

*“Apenas um raio de Sol é suficiente para afastar várias sombras”.*

*São Francisco de Assis*



# Resumo

A Tomografia de Refração Sísmica é um método de inversão geofísica que utiliza as medições de tempo de trânsito de uma onda refratada em uma interface, viajando da fonte que a gerou até uma série de receptores, para entender a subsuperfície. Com os dados medidos, analisam-se as velocidades inferidas através da inversão e assim, há a interpretação do modelo geológico-estrutural mais adequado ao local de estudo.

Ao longo deste trabalho, notou-se que esta técnica de inversão tomográfica possui desafios a serem estudados e cada etapa do seu fluxo de trabalho merece uma cuidadosa atenção. Fazer um levantamento adequado de dados e processá-los corretamente pode colaborar com a simplificação de todo o processo de inversão. Construir um bom modelo inicial, considerando as restrições imputadas, e elaborar uma boa estratégia de traçado de raios sobre ele também se mostrou ser parte fundamental para a eficiência do método.

Dentro das limitações inerentes à Tomografia de Refração Sísmica, o método apresentou respostas satisfatórias aos modelos sintéticos propostos, gerando confiabilidade na aplicação ao dado real. Já os resultados para o modelo real se apresentaram como soluções interessantes. Seções invertidas representando as possíveis velocidades em subsuperfície indicaram a presença de falhas, corroborando com a definição da região como um ambiente regido por um sistema de falhas antitéticas e sintéticas. Além disso, os resultados obtidos podem auxiliar na discussão sobre a localização do depocentro do Gráben de Casa de Pedra, área alvo deste estudo, ao apresentar maiores espessuras em sua zona central, e os altos estruturais nas suas bordas.

**Palavras-chave:** Tomografia de Refração. Inversão tomográfica. Traçado de Raios.



# Abstract

Seismic Reflection Tomography is a geophysical inversion method that uses the traveltimes measurements of a refracted wave at an interface, traveling from the source that generated it to a series of receivers, to understand the subsurface. With the measured data, the velocities inferred through the inversion are analyzed and, thus, there is the interpretation of the geological-structural model more appropriate to the place of study.

Throughout this work, it was noted that this technique of tomographic inversion has challenges to be studied and each stage of its workflow deserves careful attention. Properly surveying data and processing them correctly can help simplify the entire inversion process. Constructing a good initial model, considering the imputed constraints, and developing a good ray tracing strategy on it also proved to be a fundamental part of the method's efficiency.

Within the limitations inherent to the tomography of seismic refraction, the method presented satisfactory answers to the proposed synthetic models, generating reliability in the application to the real data. Inverted sections representing the possible subsurface velocities indicated the presence of faults, corroborating with the definition of the region as an environment governed by a system of antithetic and synthetic faults. In addition, the results obtained may help in the discussion of the location of the depocenter of the *Graben de Casa de Pedra*, the target area of this study, when presenting greater thicknesses in its central zone, and the structural highs in its borders.

**Keywords:** Refraction Tomography. Tomography inversion. Ray tracing. Shortest Path Ray.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Fonte empregada no levantamento deste trabalho, que utiliza uma espécie de martelo acelerado por um gatilho e que impacta a placa metálica para gerar a onda mecânica. . . . .	30
Figura 2 – Sismoscópio de Zhang Heng: ao detectar movimentos terrestres liberava certo número de bolas na boca dos sapos, permitindo a interpretação do evento sísmológico. Fonte: Hsiao e Yan (2009)	31
Figura 3 – Geode: Sismógrafo da empresa <i>Geometrics Inc.</i> . À esquerda e ao centro, sua estrutura e à direita, imagem dos cabos que ligam os geofones ao sismógrafo. . . . .	32
Figura 4 – Geofone da empresa <i>Geometrics Inc.</i> À esquerda, já implantado ao solo para aquisição e à direita, apresentando a estrutura que o fixa e faz a captação do dado. (Fonte: <i>Kansas Geological Survey</i> )	32
Figura 5 – Tipo de geometria básica aplicada em um levantamento de sísmica de refração. Modificado de Azevedo e Rocha (2010). . .	33
Figura 6 – Uma possibilidade de geometria aplicada em um levantamento de sísmica de refração. Modificado de Azevedo e Rocha (2010).	34
Figura 7 – Exemplo de levantamento topográfico utilizando um dispositivo de GPS. . . . .	35
Figura 8 – Dado real que recebeu um filtro de ganho em suas amplitudes e um truncamento no número de amostras, destacando apenas o início do registro do levantamento. . . . .	36
Figura 9 – Resultado do controle de qualidade: tiro descartado, pois apresentou distorções em relação aos outros registros. . . . .	37
Figura 10 – Dado real com a definição automática das primeiras quebras no dado. Os traços vermelhos são as marcações realizadas pelo algoritmo e seriam o tempo no qual houve o primeiro registro de sinal no receptor. . . . .	38

Figura 11 – Gráfico Tempo <i>versus</i> Distância gerada após a etapa de <i>picking</i> , isto é, após a definição dos tempos da primeira chegada. Neste caso, o modelo sintético que gerou o dado é constituído por três camadas e o traçado de raios realizado com 200 receptores, espaçados de 5 m, e 20 tiros. . . . .	39
Figura 12 – Visualização da definição das camadas no módulo <i>Plotrefa</i> da Geometrics Inc. como etapa inicial da inversão <i>layer cake</i> , método inversão <i>Time-term</i> . A passagem da cor vermelha para a cor verde delimita uma mudança de velocidade, ou seja, representa a passagem de uma camada para outra. O dado analisado é um dado adquirido através de um levantamento de reflexão e utilizado para o estudo da refração. . . . .	43
Figura 13 – Modelo inicial gerado pelo módulo <i>Plotrefa</i> <sup>TM</sup> do SeisImager <sup>TM</sup> a partir de uma inversão <i>layer cake</i> . Nota-se que houve uma suavização do modelo gerado por esta inversão. . . . .	43
Figura 14 – Posições sucessivas das frentes de ondas diretas e refratadas em um modelo de duas camadas. As linhas sólidas correspondem às trajetórias dos raios individuais a partir da fonte A até o receptor D. . . . .	45
Figura 15 – Curvas tempo <i>versus</i> distância para a onda direta e a onda refratada em um modelo de duas camadas com interface horizontal e plana. . . . .	45
Figura 16 – Trajetória de um raio para uma onda refratada em um modelo com três camadas. . . . .	47
Figura 17 – Curva tempo <i>versus</i> distância para a onda direta e as ondas frontais de dois refratores horizontais. . . . .	47
Figura 18 – (A) Geometria da trajetória do raio e (B) curvas tempo <i>versus</i> distância para chegadas de ondas frontais a partir de um refrator inclinado nas direções direta e reversa. . . . .	49
Figura 19 – Refrator horizontal falhado. . . . .	50
Figura 20 – Segmento de afastamento da curva tempo <i>versus</i> distância para chegadas refratadas de lados opostos de uma falha. . . . .	51
Figura 21 – Interpretação do conceito de atraso em um refrator horizontal. . . . .	52

Figura 22 – Trajetória de raio associada a um refrator inclinado. . . . .	53
Figura 23 – (A) Trajetória de raio refratado a partir de cada extremidade até um detector em uma posição intermediária. (B) Curvas tempo <i>versus</i> distância nas direções direta e reversa. . . . .	53
Figura 24 – Caminhos possíveis para o raio sair da fonte e atingir o receptor. O caminho percorrido será o que leva menor tempo para ir de A até B, segundo o Princípio de Fermat. Em vermelho, está representado o percurso que poderia ser o de menor tempo, porém não o de menor distância. Isto ocorre quando o meio por onde o raio se propaga é heterogêneo. . . . .	57
Figura 25 – Exemplo da matriz de sensibilidade construída a partir de um modelo discretizado por células regulares com 3 colunas e 2 linhas. A matriz de sensibilidade terá 6 colunas. O número de linhas será o número de raios que percorreu o modelo discretizado.	58
Figura 26 – Exemplo da matriz de sensibilidade construída a partir de um modelo discretizado por células regulares com 3 colunas e 2 linhas. Os raios que atravessaram o modelo não percorreram todas as células de discretização. Assim, alguns elementos da matriz $l$ são iguais a zero. . . . .	59
Figura 27 – Exemplo de discretização realizada pelo software <i>SeisImager</i> <sup>TM</sup> da Geometrics Inc. sobre um modelo inicial de camada plano paralelas. . . . .	60
Figura 28 – Ajuste de uma spline 1D para percorrer os três nós definidos. . . . .	62
Figura 29 – Variáveis utilizadas para descrever a frente de onda e o raio. $T$ é o tempo de trânsito, $r$ é o vetor posição de um ponto na frente de onda, $l$ é o comprimento do raio e $s(x)$ é a vagarosidade. . . . .	65
Figura 30 – Princípio do método <i>Shooting</i> . Neste caso, uma trajetória inicial do raio é atualizada até convergir para um receptor. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008). . . . .	66

Figura 31 – Princípio do Método de <i>Pseudo-Bending</i> . Nesse exemplo esquemático, uma suposição inicial do raio é definida por três pontos. O ponto central é perturbado para satisfazer o Princípio de Fermat. Em seguida, o número de segmentos é dobrado e o processo repetido. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).	68
Figura 32 – O método do quadrado expansível para cálculo progressivo dos tempos de trânsito através de um campo de velocidade “gridado”. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).	71
Figura 33 – Rede do método <i>Shortest Path Ray</i> construída sobre um <i>grid</i> com células de velocidades constantes por Nakanishi e Yamaguchi (1986). (A) Todos os caminhos possíveis entre nós. A linha vermelha apresenta todas as conexões de apenas um nó. (B) Caminhos mais curtos entre a origem <i>O</i> e uma seleção de nós e um meio homogêneo. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).	72
Figura 34 – Rede do método de <i>Shortest Path</i> construída sobre um <i>grid</i> com nós de velocidade por Moser (1991). (A) Um <i>grid</i> com 25 nós com 8 conexões por nó. (B) Aumentando o número de conexões permite representar mais precisamente os menores desvios dos caminhos. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).	73
Figura 35 – Fluxo de inversão para um problema não linear.	76
Figura 36 – Fluxo da metodologia para resolução de um problema com um dado sintético.	77
Figura 37 – Fluxo de metodologia para resolução de um problema com um dado real.	78
Figura 38 – Modelo sintético simples com três camadas plano-paralelas gerado no módulo <i>Plotrefa<sup>TM</sup></i> do software <i>SeisImager/2D<sup>TM</sup></i> da Geometrics Inc.	81
Figura 39 – Modelo sintético discretizado por células irregulares que foi gerado no módulo <i>Plotrefa</i> do software <i>SeisImager/2D</i> da Geometrics Inc.	82

Figura 40 – Modelo sintético gerado no módulo <i>Plotrefa<sup>TM</sup></i> do <i>software SeisImager/2D<sup>TM</sup></i> da Geometrics e os traçados dos raios que produziram os tempos de trânsito calculados. . . . .	82
Figura 41 – Gráfico Tempo de trânsito <i>versus</i> Distância, gerado após o traçado de raios sobre um modelo sintético de três camadas. É possível realizar uma interpretação inicial, demarcando as possíveis interfaces, onde há mudança de derivada na curva. Em um dado sintético, esta tarefa é bastante simples. . . . .	83
Figura 42 – Exemplo de modelo gerado pela inversão <i>Time-term</i> no módulo <i>Plotrefa</i> do <i>software SeisImager/2D</i> da Geometrics. . . . .	84
Figura 43 – Exemplo de modelo inicial gerado após a suavização do modelo resultado da inversão <i>Time-term</i> . . . . .	85
Figura 44 – Gráfico Tempo <i>versus</i> Distância: uma comparação entre o dado calculado e do observado. O dado em azul é o dado observado e o cinza é dado calculado. Neste caso, o RMS foi alto: 57,872509. Os dados observados e calculados são muito destoantes. . . . .	86
Figura 45 – Exemplo de <i>picking</i> no <i>software</i> da Geometrics Inc.: linha vermelha marcando as primeiras quebras no traço do dado. . . . .	87
Figura 46 – Exemplo de modelo inicial de camadas plano-paralelas desenhado com o módulo <i>Plotrefa<sup>TM</sup></i> da Geometrics Inc. . . . .	88
Figura 47 – Exemplo de um modelo invertido com o módulo <i>Plotrefa<sup>TM</sup></i> da Geometrics Inc. a partir do modelo inicial de camadas plano-paralelas. . . . .	88
Figura 48 – Modelo 1: modelo sintético de camadas plano-paralelas. . . . .	90
Figura 49 – À esquerda, tem-se o modelo sintético de camadas plano-paralelas e o traçado de raios que gerou o dado "observado" de tempo de trânsito; à direita, o gráfico com estes tempos de trânsito dispostos em famílias de tiros. . . . .	90
Figura 50 – Modelo inicial criado a partir da determinação de camadas plano paralelas e velocidades crescentes em relação à profundidade. . . . .	91
Figura 51 – Modelo 1 invertido. . . . .	93
Figura 52 – Traçado de raios que varreu o modelo e gerou o modelo invertido. À direita, o gráfico de Tempo de trânsito <i>versus</i> Distância. . . . .	93

Figura 53 – Modelo 2: modelo sintético de camadas plano-paralelas e uma interface inclinada. . . . .	94
Figura 54 – Modelo sintético 2 invertido. . . . .	95
Figura 55 – Modelo 3: modelo sintético de camadas plano-paralelas falhadas. . . . .	95
Figura 56 – Modelo 3 invertido. Embaixo, a marcação da posição da falha projetada no modelo sintético. . . . .	96
Figura 57 – Modelo 4: modelo sintético de camadas plano-paralelas e falhadas, gerando um gráben. . . . .	97
Figura 58 – Modelo 4 invertido. . . . .	98
Figura 59 – Mapa da região do Gráben de Casa de Padra e marcação da linha percorrida pelo levantamento de sísmica multicanal. . . . .	100
Figura 60 – Resultado do <i>Picking</i> é um gráfico relacionando Tempo <i>versus</i> Distância, onde já se observa a tendência da estrutura das camadas. Como o levantamento foi projetado para o estudo de sísmica de reflexão, há um considerável aumento no número de tiros, dificultando esta análise visual. . . . .	104
Figura 61 – Modelo inicial criado a partir da determinação de camadas plano paralelas e velocidades crescentes em relação à profundidade. . . . .	105
Figura 62 – Dado real invertido a partir de um modelo inicial com camadas plano-paralelas . . . . .	106
Figura 63 – Cobertura do traçado de raios sobre o modelo invertido a partir do dado real observado. . . . .	107
Figura 64 – Definição das camadas ao interpretar o gráfico Tempo <i>versus</i> Distância. . . . .	108
Figura 65 – Modelo criado a partir da inversão <i>Time-term</i> . . . . .	108
Figura 66 – Modelo inicial criado a partir da suavização do modelo gerado a partir da inversão <i>Time-term</i> . . . . .	108
Figura 67 – Dado real invertido a partir de um modelo inicial resultante da inversão <i>Time-term</i> . . . . .	109
Figura 68 – (A) Modelo <i>layer cake</i> criado a partir da inversão de número 2 e (B) o modelo inicial suavizado. . . . .	110
Figura 69 – Modelo gerado a partir da inversão 2.2. . . . .	111

Figura 70 – Dado real invertido a partir de um modelo inicial <i>layer cake</i> ; possíveis locações de falhas em subsuperfície; e posição aproximada do afloramento adjacente à linha de levantamento. . . . .	113
Figura 71 – Registros dos diferentes tipos de ondas em um sismograma e que ilustra a ordem de chegada no sismógrafo. Figura modificada de Eureka Brasil (2018). . . . .	124
Figura 72 – Esquema representando a propagação da ondas Rayleigh (em cima) e Love (embaixo) e deformação provocada no meio. Fonte: Instituto Nacional de Normalización (2010) . . . . .	125
Figura 73 – Esquema representando a propagação das ondas P (em cima) e S (embaixo) e deformação provocada no meio. Fonte: Instituto Nacional de Normalización (2010) . . . . .	126
Figura 74 – Desenho esquemático do raio refletido, transmitido e criticamente refratado. Observação da Lei de Snell. . . . .	128
Figura 75 – Gráfico representando o momento no qual a onda criticamente refratada chegará primeiro no receptor posicionado em um determinado <i>offset</i> ( $x$ crítico). . . . .	129
Figura 76 – Desenho esquemático do raio da onda viajando em subsuperfície e assumindo a velocidade da camada 2, ao longo da interface antes de retornar à superfície. . . . .	130
Figura 77 – Desenho esquemático do raio da onda viajando em subsuperfície e assumindo a velocidade da camada 2, ao longo da interface antes de retornar à superfície. . . . .	130
Figura 78 – A refração segundo o Princípio de Huygens. Os pontos amarelos representam as novas fontes pontuais de onda. Fonte: Arne Nordmann (2007) . . . . .	131
Figura 79 – Esquema ilustrando a ideia básica de um fluxo de inversão. . . . .	132

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo sintético 1. . . . .	90
Tabela 2 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para o modelo sintético 1. . . . .	91
Tabela 3 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do modelo sintético 1. . . . .	92
Tabela 4 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo sintético 2. . . . .	93
Tabela 5 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para o modelo sintético 2. . . . .	94
Tabela 6 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do modelo sintético 2. . . . .	94
Tabela 7 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para o modelo sintético 4. . . . .	97
Tabela 8 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do modelo sintético 4. . . . .	98
Tabela 9 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para a inversão do dado real. . . . .	105
Tabela 10 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do dado real. . .	106
Tabela 11 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial pela inversão <i>Time-term</i> para a inverter do dado real. . . . .	108
Tabela 12 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do dado real. . .	109
Tabela 13 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do dado real. . .	110
Tabela 14 – Tabela comparando os métodos de sísmica de reflexão e sísmica de refração. Fonte: Cavacundo (2015) . . . . .	128
Tabela 15 – Tabela comparando os métodos convencionais de sísmica de refração e a tomografia. Fonte: Cavacundo (2015) . . . . .	135

# Sumário

	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1</b>	<b>LEVANTAMENTO DE DADOS</b>	<b>29</b>
1.1	Equipamentos: fontes, sismógrafos e receptores	29
1.2	Geometria de Aquisição	32
1.3	Processamento dos Dados	36
<b>2</b>	<b>MODELO INICIAL</b>	<b>41</b>
2.1	Duas Camadas Plano-Paralelas	44
2.2	Três Camadas Plano-Paralelas ou Mais	46
2.3	Camadas Inclinadas com Interfaces Planas	48
2.4	Camadas com interfaces planas falhadas	50
2.5	Camadas com Interface Irregulares (não planas)	51
<b>3</b>	<b>INVERSÃO TOMOGRÁFICA</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>O Problema Direto</b>	<b>55</b>
3.1.1	$d=Lm$	55
3.1.1.1	Problema linear	56
3.1.1.2	Princípio de Fermat	56
3.1.1.3	Problema Não Linear	57
<b>3.2</b>	<b>Matriz de Sensibilidade</b>	<b>58</b>
3.2.1	Discretização do Modelo	59
3.2.1.1	Discretização por células regulares	59
3.2.1.2	Discretização por células irregulares	60
3.2.1.3	Discretização por malhas triangulares e tetraédricas	60
3.2.1.4	Discretização por polinômios	61
3.2.1.5	Discretização por camadas	61
3.2.1.6	Discretização por função harmônica (Série de Fourier)	61
3.2.1.7	Discretização por <i>Splines</i> cúbicas	62
<b>3.3</b>	<b>Traçado de Raios</b>	<b>63</b>

3.3.1	Equação Eikonal . . . . .	63
3.3.2	Equações Cinemáticas do Traçado de Raios . . . . .	64
3.3.3	Métodos Clássicos de <i>Ray Tracing</i> : Baseados no Raio . . . . .	64
3.3.3.1	Métodos <i>Shooting</i> . . . . .	65
3.3.3.1.1	PVI + Condições de Fronteira . . . . .	66
3.3.3.2	Método <i>Bending</i> . . . . .	67
3.3.3.3	Método <i>Pseudo Bending</i> . . . . .	67
3.3.4	Métodos Baseados no <i>Grid</i> . . . . .	68
3.3.4.1	Método de Solução de Equação Eikonal por Diferenças Finitas . . . . .	70
3.3.4.2	Método <i>Shortest Path Ray</i> . . . . .	71
<b>3.4</b>	<b>O Problema Inverso Não linear . . . . .</b>	<b>74</b>
3.4.1	Solução por Mínimos Quadrados: Norma $L_2$ . . . . .	74
<b>3.5</b>	<b>Fluxo de Inversão Tomográfica . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA: MÉTODOS E MATERIAIS . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Software de Aplicação Prática do Método Sísmico de Refração</b>	<b>79</b>
<b>4.2</b>	<b>Dado Sintético . . . . .</b>	<b>80</b>
4.2.1	Construção do Modelo Sintético . . . . .	80
4.2.2	Escolha do Método de Discretização . . . . .	80
4.2.3	Construção da Matriz de Sensibilidade e Cálculo do Tempo de Trânsito	81
4.2.4	Inversão Tomográfica . . . . .	84
<b>4.3</b>	<b>Dado Real . . . . .</b>	<b>86</b>
4.3.1	Carregamento dos Dados . . . . .	86
4.3.2	<i>Picking</i> : Tempo de Trânsito de Primeiras Chegadas . . . . .	87
4.3.3	Construção do Modelo Inicial . . . . .	88
4.3.4	Inversão Tomográfica . . . . .	88
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Dado Sintético . . . . .</b>	<b>89</b>
5.1.1	Modelo 1: Camadas Plano-Paralelas . . . . .	89
5.1.2	Modelo 2: Interface Inclinada com Camadas Plano-paralelas . . . . .	93
5.1.3	Modelo 3: Camadas Falhadas . . . . .	95
5.1.4	Modelo 4: Bacia Sedimentar em Forma de Gráben . . . . .	97

---

5.1.5	Conclusão: Dados Sintéticos . . . . .	98
<b>5.2</b>	<b>Dado Real . . . . .</b>	<b>99</b>
5.2.1	Área de Estudo . . . . .	99
5.2.1.1	Contexto Geológico Estrutural . . . . .	101
<b>5.3</b>	<b>Aquisição dos Dados . . . . .</b>	<b>103</b>
5.3.1	Processamento dos Dados . . . . .	104
<b>5.4</b>	<b>Inversão tomográfica . . . . .</b>	<b>105</b>
5.4.1	Inversão 1: Modelo Inicial com Camadas Plano-paralelas . . . . .	105
5.4.2	Inversão 2: Modelo Inicial com inversão <i>Time-term</i> . . . . .	107
5.4.3	Inversão 2.2: Modelo Inicial com o Resultado da Inversão 2 . . . . .	109
<b>5.5</b>	<b>Conclusão: Dado Real . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>115</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>117</b>
<b>1</b>	<b>ANEXO: DEFINIÇÕES E CONCEITOS . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>1.1</b>	<b>Método Sísmico . . . . .</b>	<b>121</b>
1.1.1	Velocidades Sísmicas . . . . .	122
1.1.2	Ondas Sísmicas . . . . .	123
1.1.2.1	Ondas de Superfície . . . . .	124
1.1.2.2	Ondas de Corpo . . . . .	125
<b>1.2</b>	<b>Sísmica de Reflexão <i>versus</i> Sísmica de Refração . . . . .</b>	<b>126</b>
1.2.1	Sísmica de Reflexão . . . . .	126
1.2.2	Sísmica de Refração . . . . .	127
<b>1.3</b>	<b>Refração Sísmica . . . . .</b>	<b>127</b>
<b>1.4</b>	<b>Conceito de Inversão . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>1.5</b>	<b>Tomografia Geofísica de Refração . . . . .</b>	<b>133</b>
1.5.1	Tomografia: inversão a partir de tempos de trânsito . . . . .	136



# Introdução

A geofísica é o estudo de técnicas indiretas de obtenção de informações sobre a subsuperfície. São métodos geofísicos que utilizam a eletricidade, nos métodos elétricos; as características gravitacionais e magnéticas da Terra, nos métodos gravimétrico e magnetométrico, também conhecidos como métodos potenciais; além do método sísmico, que se utiliza das propriedades elásticas das rochas para propagar uma onda mecânica até um ou mais receptores e assim, obter informações da subsuperfície. Cada método com sua complexidade e com uma aplicação mais adequada (TELFORD et al., 1990).

As técnicas que fazem uso da geofísica, hoje, com o avanço no desenvolvimento tecnológico-computacional, fornecem resultados cada vez mais contundentes e com custos relativamente mais baixos, quando comparados aos de técnicas diretas de levantamento. Portanto, aplicar os métodos geofísicos têm se tornado viável e economicamente vantajoso, daí a importância de estudos de aprimoramento e validação dos seus resultados.

Este trabalho versará sobre apenas um dos diversos métodos, a tomografia sísmica de raios criticamente refratados, que requer aprofundamento em conceitos específicos da técnica. Algumas destas definições podem apresentar certa complexidade no seu entendimento, porém, diferentemente da sísmica de reflexão, é uma técnica que possibilita a visualização das principais etapas, desde a aquisição até a inversão de forma relativamente rápida e economicamente viável. Na sísmica de reflexão, por exemplo, seu processamento e interpretação são tarefas com maior tempo de execução. Além disso, uma vantagem do método da refração sísmica é permitir a cobertura de uma grande região em um curto espaço de tempo, se comparada à reflexão sísmica e a um custo bem menor. Embora sem o nível de detalhe obtido no método de reflexão sísmica, os levantamentos da refração sísmica permitem a obtenção de um modelo representativo de velocidades em subsuperfície. (PEROSI, 2003)

A tomografia sísmica de raios criticamente refratados, que neste trabalho será mencionada apenas como tomografia de refração, é uma técnica de inversão

sísmica que fornece os valores de velocidade através dos tempos de trânsito de primeira chegada observados (MARTINS; KNAPP, 1993). Estes tempos também são mencionados como tempos de trânsito de primeira quebra ou ainda *first break traveltimes*. Ou seja, os dados medidos no levantamento serão os primeiros tempos que o sinal emitido pela fonte foi registrado por cada receptor espalhado ao longo da linha e o que se busca são as velocidades das estruturas em subsuperfície.

O método tomográfico de sísmica de refração aplicado neste estudo é embasado pelo efeito observado pela *Lei de Snell*, a refração. Portanto, devido às suas características, a técnica da tomografia de refração possui certas limitações. Uma delas é o alcance em profundidade. Por isso, é, em geral, indicada para a pesquisa de regiões mais rasas da subsuperfície.

No entanto, por ser um método viável para utilização em campo e, posteriormente, para interpretações relativamente rápidas e eficientes, a tomografia de refração tem sido muito estudada por ser considerada como uma ferramenta auxiliar para outras técnicas. Se o objetivo do levantamento for um alvo em maior profundidade, a tomografia de refração fornecerá dados para a obtenção de melhores resultados quando da aplicação de outros métodos. Por exemplo, pode ser utilizada em colaboração com um método sísmico de reflexão, ao calcular as velocidades das camadas mais rasas. Assim, obtêm-se a velocidade da zona intempérica, fornecendo informações para o processamento de correções estáticas do dado de sísmica de reflexão. Outro caso onde a tomografia de refração pode contribuir para o sucesso de um método é quando a utiliza-se para gerar um modelo inicial para outra técnica de tomografia, a inversão de forma da onda completa (*FWI - Full Waveform Inversion*).

Portanto, como tema deste trabalho, a tomografia de refração foi estudada para seu melhor entendimento, reforçando conceitos e definições, evidenciando limitações, além de demonstrar sua eficiência e viabilidade na aplicação da teoria aos dados reais. A partir dos dados reais levantados previamente, foi aplicado e avaliado um fluxo prático desde a inserção dos dados de entrada até a inversão para observação dos resultados. Especificamente, nesta dissertação, buscou-se observar se o método pode gerar bons resultados e interpretações razoáveis em relação à área pesquisada. E com esta análise da resposta do método, espera-se contribuir para as hipóteses e discussões apresentadas sobre a região do levantamento.

---

Este trabalho foi elaborado para apresentar a temática da tomografia sísmica de raios criticamente refratados da seguinte forma:

- *Capítulo 1: Serão comentados assuntos à respeito da primeira etapa de um estudo tomográfico de refração sísmica, o levantamento de dados. As definições pré-projeto como a definição dos equipamentos de campo e as geometrias mais convencionais de aquisição são encontradas neste capítulo. E, finalmente, apresenta-se o processamento dos dados, que é a última etapa antes de iniciar o fluxo de inversão tomográfica.*
- *Capítulo 2: Abordam-se tópicos relacionados à construção do Modelo Inicial, parte fundamental do processo de inversão. Neste capítulo são desenvolvidos cálculos para modelar a subsuperfície, considerando situações que se aproximam de casos encontrados na natureza e que podem ser representados através de modelos em camadas. Sejam camadas plano paralelas, camadas inclinadas, falhadas ou camadas com interfaces irregulares.*
- *Capítulo 3: Serão descritos conceitos ligados às etapas da inversão. A etapa de traçado de raios e exemplos de metodologias com este fim estão aqui expostas, indicando algumas diferentes abordagens na forma de calcular o percurso do raio pelo meio discretizado. Além disso, também encontra-se o desenvolvimento da solução por mínimos quadrados que busca minimizar uma função.*
- *Capítulo 4: Será definido o fluxo de realização da inversão tanto para um dado sintético quanto para um dado real. Cada etapa é descrita com o apoio de imagens de exemplo.*
- *Capítulo 5: Serão apresentados 4 modelos sintéticos e os seus resultados após a inversão. Além disso, também são expostos os resultados após a aplicação do fluxo da inversão tomográfica ao dado real levantado no Gráben de Casa de Pedra em Volta Redonda, RJ*
- *Capítulo 6: Após o estudo e visualização do comportamento do método, fez-se aqui a conclusão alcançada neste trabalho.*

- *Anexo: Definições e conceitos são apresentados como forma de melhor entender o tema deste trabalho, a tomografia de refração.*

# 1 Levantamento de Dados

A partir deste capítulo, serão descritas as etapas inerentes à aplicação de um método de sísmica de refração, desde a obtenção dos dados de entrada até a solução do problema em um modelo de velocidade, resultado da inversão tomográfica.

Portanto, o levantamento de campo é a fase de aquisição dos dados, que em seguida serão processados e posteriormente utilizados na inversão tomográfica. A seguir serão apresentados os equipamentos básicos e as geometrias mais convencionais para um levantamento de sísmica de refração com o foco na tomografia de refração.

## 1.1 Equipamentos: fontes, sismógrafos e receptores

**Fontes** Para uma aquisição sísmica, a fonte deve produzir um efeito mecânico que seja capaz de propagar energia pela subsuperfície através de uma onda sísmica (CAVACUNDO, 2015). Idealmente, a fonte sísmica teórica produz um sinal como a função *Delta de Dirac*, a chamada *wavelet* ou ondaleta, que, em tempo, é infinitesimalmente curta, tendo a largura de banda espectral máxima. Na prática, uma fonte considerada boa cria uma alta energia e um sinal temporário de curta duração com repetibilidade em termos de características da assinatura da ondaleta ou assinatura da fonte e à respeito do seu conteúdo de frequência (WIEDERHOLD et al., 2008).

Em terra, há algumas possibilidades de equipamentos geradores desta energia: explosivos, martelos e marretas, com sistema de aceleração ou não, além da utilização de, por exemplo, um equipamento como um *seisgun* em um poço. Em geral, o *seisgun* não costuma ser muito empregado, por não ser uma boa fonte para refração. Porém, há casos onde os outros equipamentos de fonte não são efetivos. No caso de terrenos com solo menos compactados, faz-se o uso do *seisgun* em poço. Já os explosivos são excelentes fontes quando se deseja alcançar maiores profundidades em relação aos martelos e marretas. Além disso, possuem a vantagem de serem bastante portátil, apesar de requerer um cuidado maior no transporte e

na alocação no campo (FEROCI et al., 2000).

No caso dos martelos e marretas, estes são ferramentas que permitem a realização de levantamentos com uma equipe reduzida. As marretas com cerca de 8 kg são consideradas excelentes fontes, no entanto, espera-se que sua profundidade de investigação máxima varie de 15 a 20 m (UNDERWOOD, 2009). Existe também o martelo que se utiliza de um sistema de gatilho para cair em aceleração maior que a gravidade (Figura 1) e pode alcançar camadas mais profundas. Isto depende diretamente da geologia, condições da superfície e ruídos externos. Entretanto, este equipamento possui a limitação de deslocamento, pois, para seu funcionamento, é necessário estar acoplado à um veículo. Porém, deve-se considerar sua vantagem em relação ao martelo manual por conseguir uma maior repetibilidade da onda gerada.

Outro ponto de atenção em relação à este tipo de instrumento é sobre a superfície onde será posicionada a chapa metálica que receberá o impacto do martelo. Se a superfície for constituída por materiais rígidos, como o asfalto de uma estrada, a fonte pode gerar um sinal prejudicado pela adição de ruído, já que o martelo, ao ser acionado, provoca uma trepidação na chapa metálica.



Figura 1 – Fonte empregada no levantamento deste trabalho, que utiliza uma espécie de martelo acelerado por um gatilho e que impacta a placa metálica para gerar a onda mecânica.

**Sismógrafos** É um instrumento para registrar o movimento da superfície como resultado da passagem de uma onda mecânica pela subsuperfície, seja essa onda produzida por um terremoto ou por um mecanismo fonte artificial. Este tipo de equipamento tem uma longa história e pode ser datado por volta do século II quando um astrônomo e matemático chinês Zhang Heng inventou um simples sismoscópio, que apenas detectava o movimento e não o registrava (Figura 2). No dispositivo de Zhang, um pêndulo de metal era suspenso dentro de uma jarra que continha bolas de metal. Quando detectava um movimento da superfície, o pêndulo balançava para frente e para trás, desvencilhando certa quantidade de bolas na boca dos sapos de bronze, posicionados na base do jarro. Com o número de bolas que foram liberadas e em qual sapo estas caíram, obtinha-se a informação da magnitude, da direção e localização do evento terrestre.

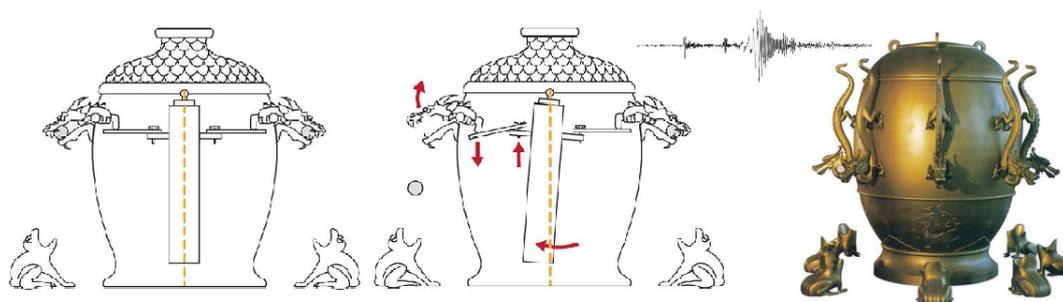


Figura 2 – Sismoscópio de Zhang Heng: ao detectar movimentos terrestres liberava certo número de bolas na boca dos sapos, permitindo a interpretação do evento sísmológico. Fonte: Hsiao e Yan (2009)

Com o desenvolvimento da ciência e tecnologia, foram projetados sismoscópios com a capacidade de gravar os eventos sísmológicos. Este sismoscópio moderno recebeu o nome de sismógrafo. Então, o sismógrafo é constituído basicamente por dois instrumentos: um componente que grava os tempos nos quais ocorreram os movimentos anômalos e outro que grava o movimento em si. Para detecção dos eventos, utilizam-se sismômetros ou também conhecidos como geofones.

**Geofones** São constituídos basicamente de uma bobina e um ímã, que registram as diferenças de potencial que foram induzidas pelo movimento do ímã em relação à bobina (Figura 4). Ao se deslocar, o solo também movimentava o geofone



Figura 3 – Geode: Sismógrafo da empresa *Geometrics Inc.*. À esquerda e ao centro, sua estrutura e à direita, imagem dos cabos que ligam os geofones ao sismógrafo.

que está enterrado e, assim, altera a posição relativa entre imã e bobina. As tensões geradas por esse fenômeno conhecido como indução eletromagnética descrito pela Lei da Indução de Faraday serão apresentadas como variações de amplitude no tempo. Quanto maior for a velocidade, maior o movimento relativo entre o imã e a bobina, conseqüentemente, maior a amplitude registrada (ELJABRI, 2017).



Figura 4 – Geofone da empresa *Geometrics Inc.*. À esquerda, já implantado ao solo para aquisição e à direita, apresentando a estrutura que o fixa e faz a captação do dado. (Fonte: *Kansas Geological Survey*)

## 1.2 Geometria de Aquisição

A cobertura de um região particular em subsuperfície é determinada pela geologia, mas também pela geometria planejada para a aquisição. Com o objetivo de amostrar um refrator, deve-se posicionar os tiros e os geofones adequadamente como será visto a seguir, em alguns exemplos de levantamentos mais simples.

A profundidade de investigação de um levantamento de sísmica de refração é de

cerca de  $1/5$  do comprimento do *spread*<sup>1</sup> de geofones, incluindo os *offsets*<sup>2</sup> de tiros. Por exemplo, para alcançar um alvo a 50 metros deve-se considerar uma linha de 250 metros. Outro fator que impacta o projeto do levantamento é o número de canais disponíveis. Se houver poucos canais para suprir um *offset* longo, a resolução horizontal será influenciada (UNDERWOOD, 2009).

Com a definição do objetivo da aquisição e, assim, a profundidade a partir da qual se espera obter resultados, os geofones são distribuídos em linha, ligados por um cabo de *spread* e que se conecta ao sismógrafo. Outro cabo ideal para o levantamento é o cabo de *trigger*. É a partir dele que o sismógrafo recebe a informação para o início do registro do sinal.

**Geofone e fonte no mesmo *offset*** Uma prática comum é localizar os *offsets* de tiro em uma linha paralela ao posicionamento dos geofones e garantir que a fonte seja disposta a uma distância aproximada de metade do intervalo entre os geofones. O objetivo é posicionar o tiro não muito perto do geofone, porém garantindo que não esteja situado fora do intervalo dos geofones. Uma outra boa prática é produzir um tiro central. Só após a distância de *crossover* —ou  $x_{crítico}$ — ser identificada, tiros fora do *offset* dos geofones são disparados para que todos os geofones recebam informação do refrator. Dependendo do objetivo do levantamento, outros tiros no interior do *spread* ou tiros mais distantes podem ser desejáveis (Figura 5).

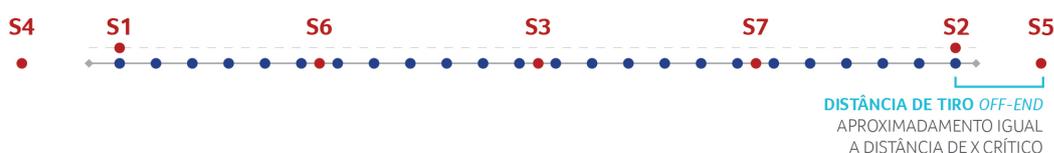


Figura 5 – Tipo de geometria básica aplicada em um levantamento de sísmica de refração. Modificado de Azevedo e Rocha (2010).

<sup>1</sup> Termo utilizado para denominar o trecho onde foram espalhados os geofones.

<sup>2</sup> Distâncias entre a fonte e os receptores

**Geofones e fonte alinhados** Outra possibilidade de posicionar os tiros nos extremos da linha é mover os geofones: o que inicia e o que fecha o *spread*. Ao realizar o primeiro tiro no início da linha, move-se o geofone para uma distância equivalente à metade do intervalo entre os receptores, porém ainda na mesma linha. Em seguida, reposiciona-se o primeiro geofone para as mesmas coordenadas da fonte do primeiro tiro, desloca-se o último geofone, também respeitando a distância de meio intervalo e efetua-se o tiro no final da linha. Este método permite uma análise mais precisa dos tempos recíprocos devido ao fato dos tiros estarem localizados exatamente nos extremos da linha. Utiliza-se do conceito de que os tempos de trânsito da energia que viaja da fonte  $S_1$  até o geofone  $G_{24}$  e da fonte  $S_2$  até o geofone  $G_1$  devem ser idênticos.

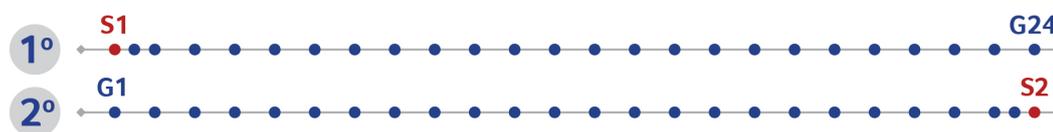


Figura 6 – Uma possibilidade de geometria aplicada em um levantamento de sísmica de refração. Modificado de Azevedo e Rocha (2010).

Portanto, uma geometria convencional de levantamento inclui dois tiros nas extremidades da linha e isto fornece o chamado *perfil reverso* que colabora na identificação de variações de velocidades e de mergulhos de camadas. Esta verificação do mergulho das camadas será comentada na seção 3.3.

**Múltiplos *spreads* para longos levantamentos** Para o caso de um trecho de levantamento extenso, deve-se realizar o procedimento conhecido como rolagem. Posicionam-se os geofones com intervalos pré-definidos e realizam-se tiros como se toda a linha estivesse coberta por geofones. Em seguida, os geofones ocupam as novas coordenadas no próximo *spread* e os tiros são novamente aplicados no mesmo local dos primeiros tiros no *spread* inicial. Ao final do processo e de ter coberto a linha inteira por *spreads*, agrupam-se os registros, utilizando o ponto de tiro comum como referência.

**Topografia** Discute-se bastante sobre a geometria de aquisição, no entanto, um fator com certa influência no resultados obtidos pela inversão tomográfica é a

elevação do terreno onde será feito o levantamento. Para efeitos da inversão do dado, é suficiente fornecer valores relativos de elevação. Para uma maior precisão, utilizam-se equipamentos como DGPS (Sistema de Posicionamento Global Diferencial) que proporciona uma alta precisão da localização e elevação. É um GPS diferencial que recebe informações a partir de uma estação de referência fixa. Esta estação contabiliza os erros provenientes do posicionamento e quantidade de satélites ao alcance do equipamento de medição durante o levantamento e transmite para o receptor no ponto a ser medido. O resultado é uma série de medidas com grande acurácia. Em alguns levantamentos, o uso do DGPS é substituído por equipamentos de GPS portáteis (Figura 7). Nestes casos, deve-se atentar ao conjunto de satélites que está fornecendo o posicionamento. Quanto maior o número de satélites, maior a precisão.

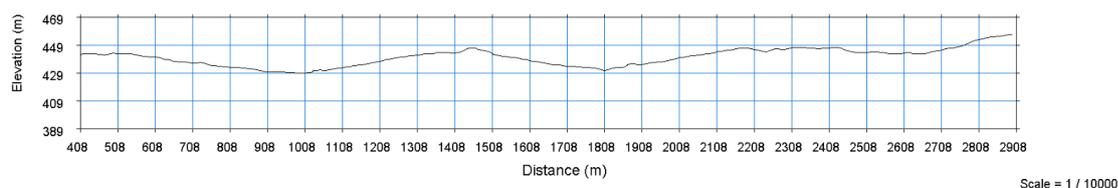


Figura 7 – Exemplo de levantamento topográfico utilizando um dispositivo de GPS.

Levantamentos de sísmica de refração, em geral, possuem custo de execução menores do que aquisições de sísmica de reflexão. Com um menor número de geofones, realiza-se um levantamento de sísmica de refração. Portanto, definir o objetivo da aquisição é interessante para que a geometria do levantamento seja bem dimensionada, evitando gastos desnecessários. Uma vantagem do método da sísmica de refração é que os levantamentos de sísmica de reflexão também registram as refrações. Ou seja, o levantamento de sísmica de reflexão também pode fornecer dados para análises de métodos que utilizam a sísmica de refração. No entanto, o contrário não é observado. Em um experimento projetado para a sísmica de refração, as reflexões são descartadas.

### 1.3 Processamento dos Dados

Após a aquisição dos dados no campo, a etapa a seguir é o processamento destes dados. Neste momento, são realizadas tarefas de adequação do dado ao formato desejado, aplicação de filtros *high cut* e *low cut* para aumentar a razão sinal/ruído e, como resultado, destacar as amplitudes dos primeiros eventos registrados no sismograma, e também ajustes na janela de visualização do dado. Com estes ajustes, busca-se concentrar as análises em um trecho do sismograma. No caso do estudo da refração, a janela de visualização deve contemplar os primeiros segundos do registro, já que o que se deseja analisar são apenas as primeiras ocorrências assinaladas no dado.

*Softwares* como o *SeisImager<sup>TM</sup>* da *Geometrics Inc.* possibilitam este processamento inicial simples e bastante válido especialmente para dados de refração. Além dos filtros e da janela de visualização do dado, é possível modificar a amplitude, alterar as escalas vertical e horizontal de visualização e também normalizar as formas das ondas para fornecer um equilíbrio visual do dado para, assim, melhorar a interpretação dos sismogramas. Este balanceamento do dado favorece os traços registrados nos geofones mais distantes da fonte, onde espera-se ter amplitudes menores devido à dispersão da energia.

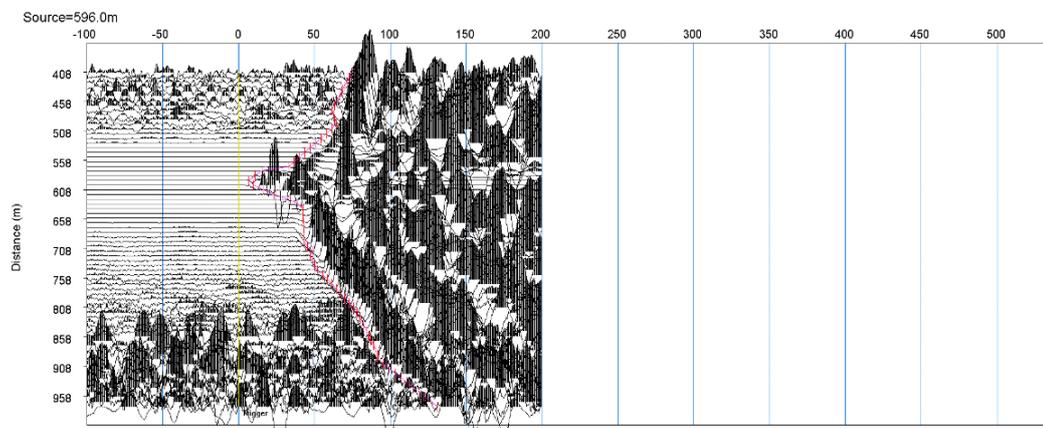


Figura 8 – Dado real que recebeu um filtro de ganho em suas amplitudes e um troncamento no número de amostras, destacando apenas o início do registro do levantamento.

Na Figura 8, observa-se um dado real com bastante ruído e que sofreu um

exagero em suas amplitudes, em uma janela de visualização reduzida para o trecho de interesse do dado. Nesta etapa do processamento, realiza-se um controle de qualidade, excluindo tiros onde foram registrados problemas na aquisição e também descartando geofones que, ou por mal funcionamento ou por mal acoplamento ao solo, não foram capazes de registrar o sinal adequadamente (Figura 9).

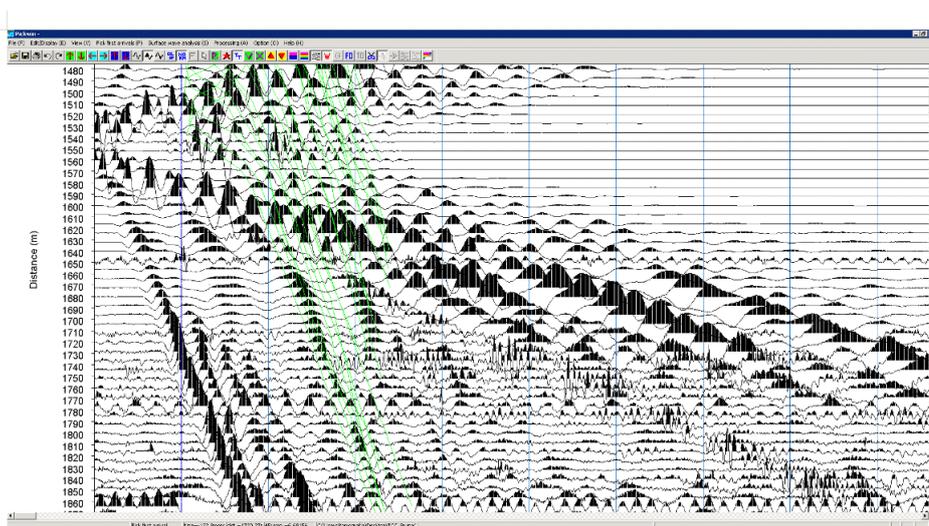


Figura 9 – Resultado do controle de qualidade: tiro descartado, pois apresentou distorções em relação aos outros registros.

A partir daí, inicia-se o processo de *picking* das primeiras quebras - ou *first breaks* - do dado. É um processo de interpretação, onde definem-se os tempos nos quais os geofones sofreram a primeira interferência no seu estado de inércia. Sinteticamente, o traço encontra-se retilíneo até receber o choque da onda sísmica, que produz a vibração registrada no sismograma como uma amplitude. Na prática, com a presença de ruídos externos, esta passagem do traço retilíneo para o traço com ondulações pode não ser tão trivial. Por isso, a importância do processamento dos dados.

Com o desenvolvimento de melhores formas de aquisição do dado e com o avanço nas possibilidades de processamento devido ao aumento da capacidade computacional, o *picking* automático destas primeiras quebras se tornou mais viável. Algoritmos foram desenvolvidos com o objetivo de tornar este processo de *picking* mais confiável, rápido e assim mais eficiente, e também eliminar a interpretação tendenciosa e subjetiva do operador. Trabalhos como de Peraldi e

Clement (1972) e de Spagnolini (1991) versam sobre este tema de automação do *picking* e são considerados métodos convencionais por trabalhar com correlações das propriedades dos traços adjacentes ou com análises dos aumentos repentinos de energia do sinal. Outras abordagens ditas não convencionais, como o trabalho de Murat e Rudman (1992), que utiliza redes neurais treinadas para interpretar as primeiras quebras e que poderia demandar uma quantidade significativa de tempo para sua captação, estão em constante desenvolvimento (SABBIONE; VELIS, 2010). No entanto, em cenários complexos em subsuperfície ou com razão sinal/ruído pequena, esta automação ainda sofre dificuldades. Ademais, se a ondaleta da fonte for de fase zero, produzirá lóbulos laterais no sinal registrado antes da primeira quebra, o que torna o *picking* ainda mais intrincado (Figura 10)(SABBIONE; VELIS, 2010). Portanto, a definição automática das primeiras quebras torna o estudo da sísmica de refração mais eficiente, mas requer um cuidadoso controle de qualidade.

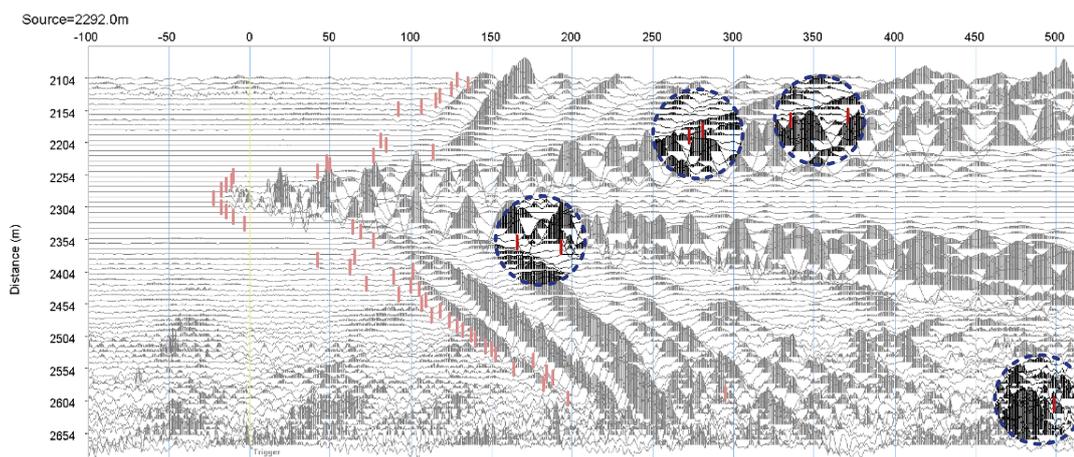


Figura 10 – Dado real com a definição automática das primeiras quebras no dado. Os traços vermelhos são as marcações realizadas pelo algoritmo e seriam o tempo no qual houve o primeiro registro de sinal no receptor.

Enfim, após as primeiras quebras serem bem demarcadas, obtém-se um gráfico relacionando tempo e distância (Figura 11), ou seja, tem-se os tempos de trânsito da onda criticamente refratada e que serão considerados como o dado de entrada para o processo da tomografia, cujo fluxo de processos será apresentado no capítulo 5. Neste fluxo de processos, a próxima etapa após o *picking* é a definição e construção do modelo inicial para a inversão.

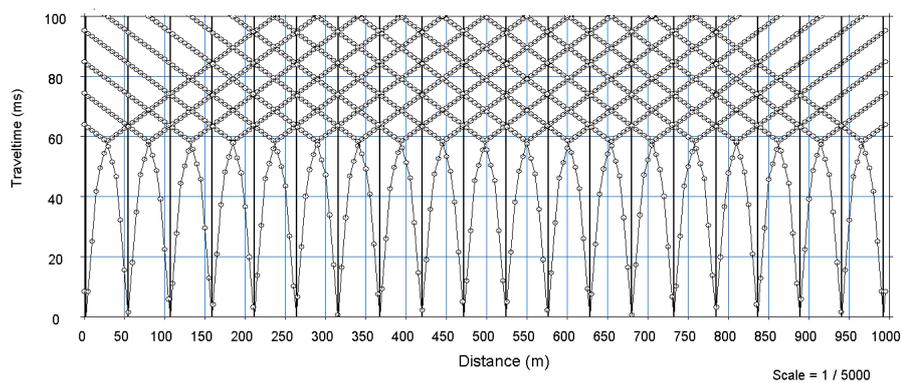


Figura 11 – Gráfico Tempo *versus* Distância gerada após a etapa de *picking*, isto é, após a definição dos tempos da primeira chegada. Neste caso, o modelo sintético que gerou o dado é constituído por três camadas e o traçado de raios realizado com 200 receptores, espaçados de 5 m, e 20 tiros.



## 2 Modelo Inicial

Como já visto, a tomografia sísmica é uma técnica de inversão de dado. Toda técnica de inversão seguindo uma metodologia clássica requer a suposição de valores da propriedade física que se deseja desvendar no meio em subsuperfície. Esta suposição é o que se denomina Modelo Inicial.

O Modelo Inicial, então, é uma matriz que contém informações hipotéticas e é construído após serem feitas considerações à respeito da estrutura que se espera encontrar na região estudada. Para a tomografia de refração, o modelo inicial é um modelo de velocidades. Velocidades estas que podem auxiliar na caracterização das estruturas geológicas em subsuperfície.

Assim, tendo os valores de velocidade dos meios por onde a onda se propaga e os tempos de trânsito observados em um levantamento ou calculados a partir de um modelo sintético, poderia-se calcular o problema direto, primeiro passo do fluxo de inversão, e que será melhor explicado na seção 4.1. No entanto, para definir um primeiro modelo, deve-se tomar algumas ponderações. Há que se garantir que o modelo fornecido para começar a inversão tomográfica seja suave. Com abruptos contrastes de velocidade, a tomografia tende a não resultar em uma solução única. Nota-se que descontinuidades no gradiente podem fazer com que os percursos de dois raios com trajetórias similares, ao incidirem em uma interface em ambos os lados, se direcionem para diferentes ângulos de propagação. Outro ponto a ser apreciado tem relação com os métodos de minimização de um problema. Em sua maioria, é demandado que o ponto de partida —no caso da tomografia, o modelo inicial de velocidades —seja próximo o suficiente para que o problema seja convergente para uma solução. Não respeitando este aspecto, há a possibilidade de se afastar da solução “real” do problema, encontrando um mínimo local da função. O processo irá se encerrar, porém ainda distante do modelo exato que se encontra em subsuperfície. Em outros casos, pode até ser interrompido forçadamente por não convergir para nenhum mínimo, nem local, muito menos global.

Há diversas abordagens para criar este modelo inicial. Neste trabalho, serão utilizadas duas destas formas. A primeira delas, e mais simplificada, é considerar

o modelo inicial como um modelo de camadas plano paralelas. Usualmente, por se tratar de um método de sísmica de refração, as velocidades das camadas são consideradas maiores quanto maior for a profundidade. A segunda maneira de calcular é utilizando uma técnica de inversão chamada *Time-term*. É uma inversão de tempo de trânsito simples e relativamente estável, desenvolvida por Scheidegger e Willmore (1957) e que foi amplamente utilizada nos anos 60 e 70 (IWASAKI, 2002). Tendo o dado observado, definem-se camadas, analisando o gráfico Tempo *versus* Distância e, após a inversão, seu resultado é um modelo discreto de velocidades. Este tipo de modelo discreto é também chamado de *layer cake*.

A ideia do *layer cake* é, exatamente, definir a subsuperfície em camadas com velocidades contrastantes. Porém, especialmente na parte rasa da subsuperfície, não é sempre o caso que as velocidades sísmicas são divididas por alto contrastes, como camadas "discretas", além de não ser incomum que ocorra variação lateral das velocidades. Técnicas convencionais de inversão *layer cake*, como o método do Tempo de Atraso ou método de *Time-term*, assumem que estas duas premissas - velocidades horizontalmente constantes e subsuperfície em camadas com alto contraste de velocidade - sejam verdadeiras e requerem que o geofísico faça suposições a respeito da definição de camadas antes da inversão do dado (Figura 12).

Já a tomografia possui menos restrições em relação à estes dois pontos. Seu algoritmo não considera apenas camadas com alto contraste de velocidade. Pelo contrário, a técnica responde melhor ao aumento gradual da velocidade. Além de conseguir trabalhar mais adequadamente com variações horizontais de velocidade. Assim, se o modelo mais adequado à subsuperfície não for de camadas consideradas "discretas", ou seja, se a subsuperfície não puder ser representada de forma mais simplificada, a abordagem mais apropriada é a tomografia.

No entanto, mesmo nestes casos onde a subsuperfície tem uma modelagem mais complexa, um método de inversão com o conceito de *layer cake* pode fornecer um modelo inicial bastante conveniente para a inversão tomográfica. E, considerando que o modelo inicial para a tomografia deve ser um modelo suave, uma possibilidade é gerar um modelo inicial *layer cake* com a inversão *Time-Term* e, em seguida, suavizar seus contrastes.

Posteriormente, a partir deste modelo inicial, obtêm-se os dados calculados: dados de tempo de trânsito das ondas criticamente refratadas e que serão utilizados

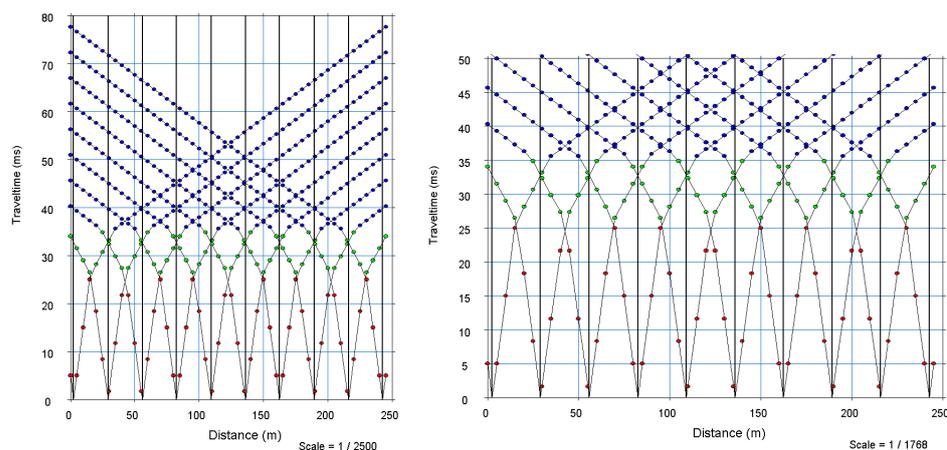


Figura 12 – Visualização da definição das camadas no módulo *Plotrefa* da Geometrics Inc. como etapa inicial da inversão *layer cake*, método inversão *Time-term*. A passagem da cor vermelha para a cor verde delimita uma mudança de velocidade, ou seja, representa a passagem de uma camada para outra. O dado analisado é um dado adquirido através de um levantamento de reflexão e utilizado para o estudo da refração.

no processo de inversão tomográfica. Mais uma vez, deve-se atentar que quanto melhor for o modelo inicial da inversão e mais aproximado do modelo real, mais rapidamente o processo de inversão irá convergir para uma solução. Assim, obter o modelo inicial pela técnica de *layer cake* se apresenta, em teoria, como uma boa estratégia.

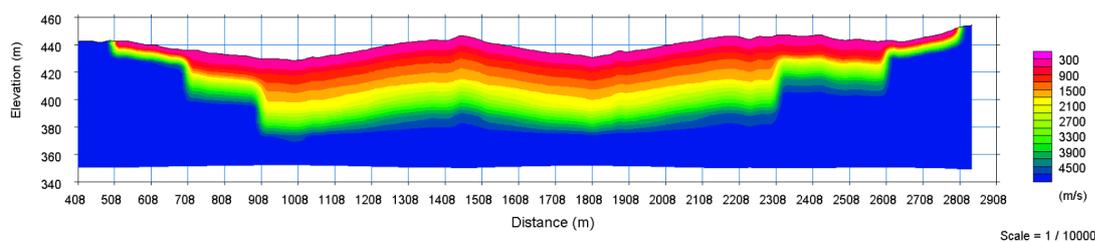


Figura 13 – Modelo inicial gerado pelo módulo *Plotrefa*<sup>TM</sup> do *SeisImager*<sup>TM</sup>a partir de uma inversão *layer cake*. Nota-se que houve uma suavização do modelo gerado por esta inversão.

A seguir, serão apresentadas formas de cálculo dos tempos de trânsito em modelos com diferentes geometrias estruturais, considerando os principais casos na natureza: camadas plano-paralelas - 2 e 3 camadas -, camadas inclinadas, camadas

falhadas e camadas com interfaces irregulares.

Estes cálculos são aplicados pelas técnicas, aqui mencionadas, convencionais como é o caso da inversão *layer cake*.

## 2.1 Duas Camadas Plano-Paralelas

A Figura 14 apresenta um esquema considerando um par de fonte e receptor e a propagação das ondas sísmicas através da subsuperfície representada por um modelo de duas camadas plano-paralelas. Após a emissão da energia pela fonte, observa-se o deslocamento da onda a partir de raios perpendiculares ao deslocamento. Tem-se, então, o raio direto e o raio criticamente refratado. Neste caso, optou-se por excluir da representação os raios refletidos.

Então, parte da onda irá se propagar com velocidade  $v_1$ , a velocidade da camada 1 mais rasa, e outra parte, ao incidir criticamente na interface entre os meios 1 e 2, é refratada e viaja com a velocidade do meio 2,  $v_2$ , até certo momento no qual retorna a superfície e é registrada pelo receptor.

Assim, o raio relacionado à onda direta viaja no topo da camada superior de A (fonte) para D (receptor) com velocidade  $v_1$  e tem seu tempo de percurso dado por

$$t_{dir} = \frac{x}{v_1}, \quad (2.1)$$

sendo que,  $x$  é a distância horizontal da fonte sísmica A até o receptor D. A equação acima pode ser apresentada em um gráfico tempo *versus* distância para um modelo com duas camadas, onde a curva será uma reta de inclinação  $1/v_1$ , passando pela origem (Figura 15).

No caso de 2 camadas plano paralelas, o cálculo do tempo que o raio criticamente refratado percorre a distância entre a fonte (A) e o receptor (D), passando pela interface entre o meio 1 e 2 (de B até C) (Figura 14) é dado por

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} = \frac{z}{v_1 \cos \theta} + \frac{(x - 2ztg\theta)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos \theta}, \quad (2.2)$$

onde  $z$  é a profundidade da interface refratora e  $\theta$ , o ângulo crítico do raio refratado.

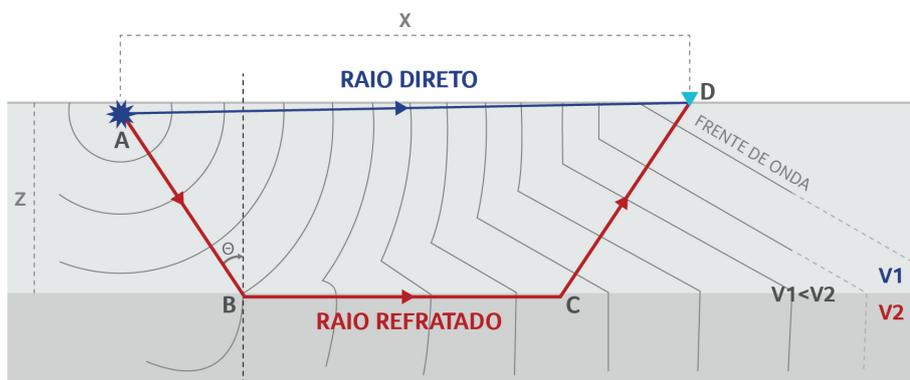


Figura 14 – Posições sucessivas das frentes de ondas diretas e refratadas em um modelo de duas camadas. As linhas sólidas correspondem às trajetórias dos raios individuais a partir da fonte A até o receptor D.

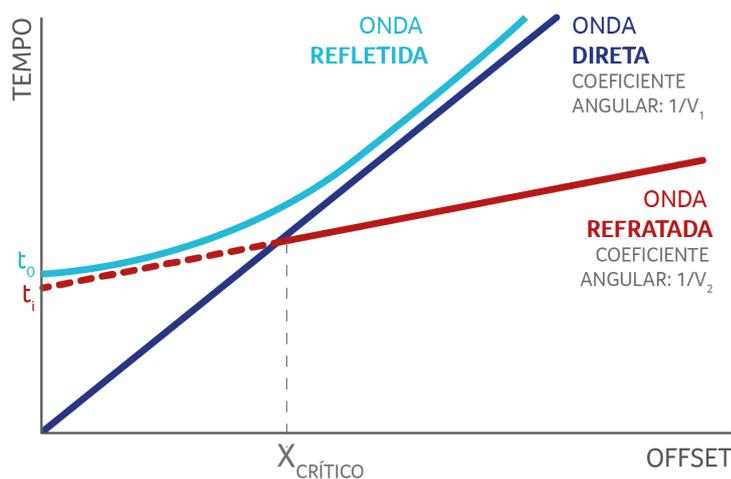


Figura 15 – Curvas tempo *versus* distância para a onda direta e a onda refratada em um modelo de duas camadas com interface horizontal e plana.

Tomando-se, a partir da Lei de Snell,  $\sin\theta = \frac{v_1}{v_2}$  e  $\cos\theta = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$ , a Equação 2.2 de tempo de trânsito pode ser reescrita como:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z\cos\theta}{v_1}, \quad (2.3)$$

ou ainda

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1v_2} \quad (2.4)$$

O termo  $\frac{2z\sqrt{v_2^2-v_1^2}}{v_1v_2}$  da Equação 2.4 é o chamado ponto de interceptação (do inglês, *intercept*) da reta que representa as refrações com o eixo dos tempos. Ao igualar  $x$  a zero, obtém-se o valor de  $t_i$  e, assim, calcula-se a profundidade  $z$  do refrator a partir da seguinte equação:

$$z = \frac{t_i v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (2.5)$$

A análise das curvas tempo *versus* distância de chegadas das ondas direta e refratada (Figura 15) permite determinar os valores de  $v_1$ ,  $v_2$  e  $t_i$ . Sabendo-se que na distância de cruzamento ( $x_{crítico}$ ) os tempos de percurso para os raios diretos e refratados são iguais, temos:

$$\frac{x_{crítico}}{v_1} = \frac{x_{crítico}}{v_2} + \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1v_2} \Rightarrow \quad (2.6)$$

$$x_{crítico} = 2z \frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1} \Rightarrow \quad (2.7)$$

## 2.2 Três Camadas Plano-Paralelas ou Mais

Para a situação mostrada na Figura 16, o raio refratado incide sobre a primeira interface com velocidade  $v_1$  e ângulo de incidência  $\theta_{12}$ ; em seguida sobre a segunda interface com velocidade  $v_2$  e com o ângulo crítico  $\theta_{23}$ , percorrendo um trecho sobre o topo da terceira camada com velocidade  $v_3$ , retornando em seguida para a superfície.

Sendo  $z_1$  e  $z_2$ , as espessuras das camadas 1 e 2 respectivamente, o tempo de percurso total ao longo do trecho ABCDEF para o raio refratado é:

$$t = \frac{x}{v_3} + \frac{2z_1 \cos \theta_{12}}{v_1} + \frac{2z_2 \cos \theta_{23}}{v_2}, \quad (2.8)$$

onde

$$\theta_{12} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{v_1}{v_3}\right) \quad (2.9)$$

e

$$\theta_{23} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{v_2}{v_3}\right) \quad (2.10)$$

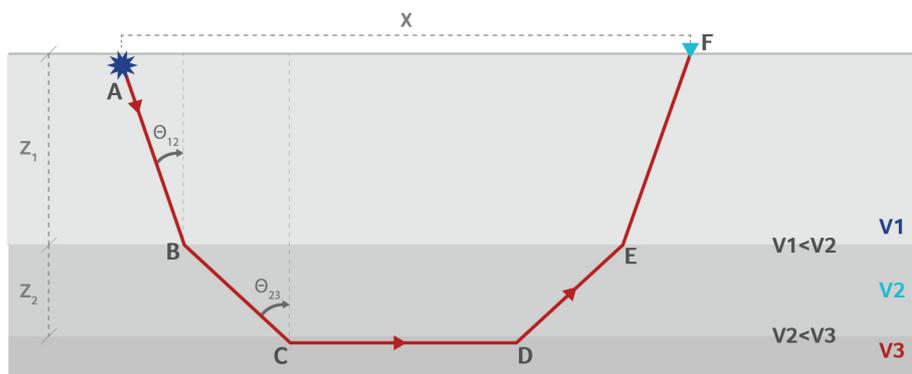


Figura 16 – Trajetória de um raio para uma onda refratada em um modelo com três camadas.

No gráfico tempo *versus* distância (Figura 17), inclui-se a reta de inclinação  $\frac{1}{v_3}$  menor que  $\frac{1}{v_2}$  devido à  $v_3$  ser maior que  $v_2$ .

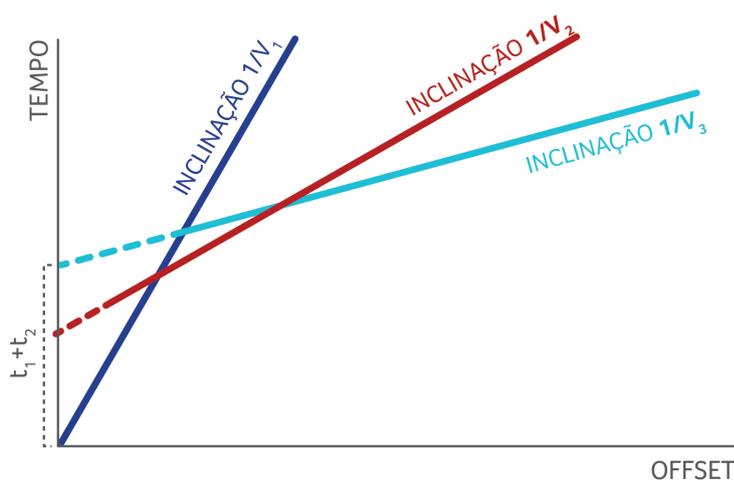


Figura 17 – Curva tempo *versus* distância para a onda direta e as ondas frontais de dois refratores horizontais.

As análises feitas no gráfico são tomadas por partes. Considerando a curva tempo *versus* distância para raios criticamente refratados na interface superior, determinam-se os valores de  $z_1$  e  $v_2$ , e em seguida com a curva tempo *versus* distância para os raios criticamente refratados na segunda interface é possível determinar  $z_2$  e  $v_3$ . Na figura 17,  $t_1$  e  $t_2$  são os tempos necessários para que o raio

atravesse as camadas 1 e 2 respectivamente e são obtidos através do somatório apresentado na parcela do lado direito da Equação 2.11, ou seja,  $t_1 + t_2$  é tempo de interceptação para a reta relacionada à segunda refração, que pode ser obtido pela análise do gráfico tempo *versus* distância.

Generalizando para casos com várias camadas com interfaces horizontais e planas, o tempo  $t_n$  de um raio criticamente refratado ao longo da superfície superior das  $n$  camadas é dado por

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i \cos \theta_{in}}{v_i}, \quad (2.11)$$

onde

$$\theta_{in} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{v_i}{v_n}\right) \quad (2.12)$$

## 2.3 Camadas Inclinadas com Interfaces Planas

A Figura 18A, ilustra o modelo de um refrator com interface plana, porém inclinada. Neste esquema,  $\varphi$  representa uma componente do mergulho da camada, que entra como uma incógnita a mais na equação do tempo de trânsito.

Para detectar a presença de um refrator inclinado, é comum reverter o experimento de refração, através de tiros diretos e reversos, ou seja, em ambas as extremidades da linha de perfil estudada são disparadas tiros a partir de uma fonte, como já visto anteriormente, na seção 2.2. Um gráfico de curvas tempo *versus* distância para um tiro direto e outro reverso é mostrado na Figura 18B. A inclinação  $\frac{1}{v}$  fornecerá apenas informações sobre a velocidade aparente do refrator, uma vez que as inclinações e os tempos de interceptação com o eixo dos tempos são diferentes.

A expressão para o tempo de percurso  $t_n$  de um raio criticamente refratado na interface inclinada é:

$$t_n = \frac{x \text{sen} \beta_1}{v_1} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i (\cos \alpha_i + \cos \beta_i)}{v_i}, \quad (2.13)$$

onde,  $h_i$  é a espessura vertical aparente numa camada  $i$ ;  $\alpha_i$  é o ângulo em relação à vertical na trajetória descendente do raio na camada  $i$ ;  $\beta_i$  é o ângulo

em relação à vertical na trajetória ascendente do raio na camada  $i$  e  $x$  é distância entre a fonte e o receptor. A componente de mergulho,  $\varphi$  na camada  $i$  aparece na equação de  $t_n$  ao se adotar  $\alpha_i = \theta_{in} - \varphi_i$  e  $\beta_i = \theta_{in} + \varphi_i$ .

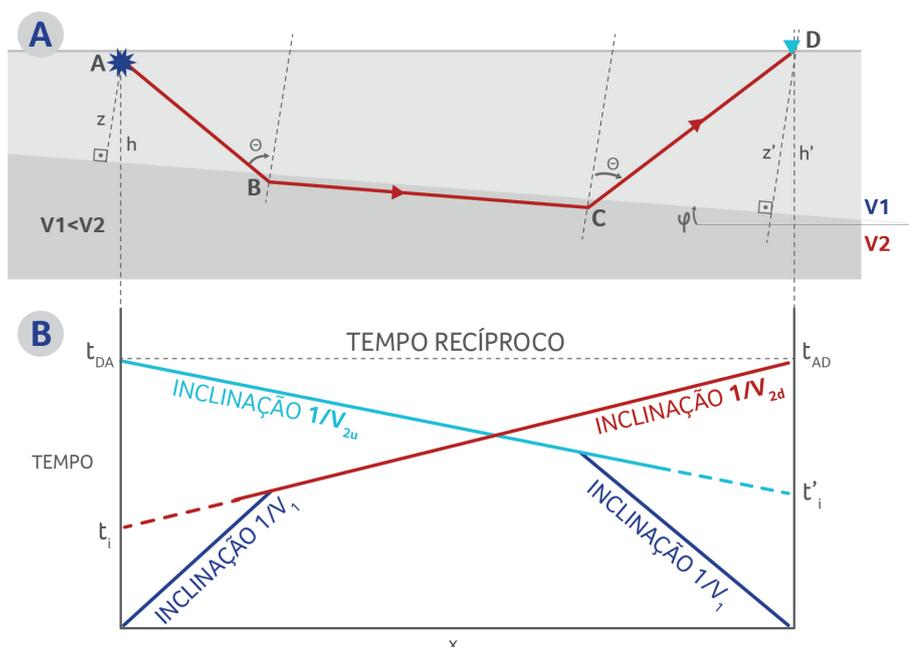


Figura 18 – (A) Geometria da trajetória do raio e (B) curvas tempo *versus* distância para chegadas de ondas frontais a partir de um refrator inclinado nas direções direta e reversa.

As espessuras aparentes  $h$  e  $h'$  na Figura 18A relacionam-se com as espessuras reais  $z$  e  $z'$  por

$$h = \frac{z}{\cos\varphi_1} \quad (2.14)$$

e

$$h' = \frac{z'}{\cos\varphi_1} \quad (2.15)$$

Através da curva tempo *versus* distância, é possível determinar o valor de  $v_1$ , e sendo conhecido o ângulo crítico  $\theta_{in}$ , a velocidade real do refrator pode ser obtida por

$$v_n = \frac{v_1}{\sin\theta_{in}} \quad (2.16)$$

O tempo recíproco na Figura 18B é estabelecido a partir do Princípio de Reciprocidade, que postula que o tempo de propagação da onda sísmica de um ponto

até outro, é o mesmo tempo caso ela se propague em sentido contrário, o que também está de acordo com o Princípio de Fermat que estabelece que "a trajetória entre dois pontos é única e corresponde ao tempo estacionário" (AZEVEDO; ROCHA, 2010). Com a identificação do tempo recíproco é possível observar se o evento esta corretamente posicionado.

## 2.4 Camadas com interfaces planas falhadas

Outro modelo que representa diversos ambientes na natureza é o modelo que considera camadas falhadas (Figura 19). A partir de esforços tectônicos compressivos e distensivos, a subsuperfície apresenta diferentes estruturas, especialmente, falhas, ou seja, são resultados de deformações rúpteis e que se apresentam como discontinuidades na superfície, podendo conter rejeitos da grandeza centimétrica até quilométrica.

No contexto da refração sísmica, estas falhas causam variações no tempo de percurso das ondas.

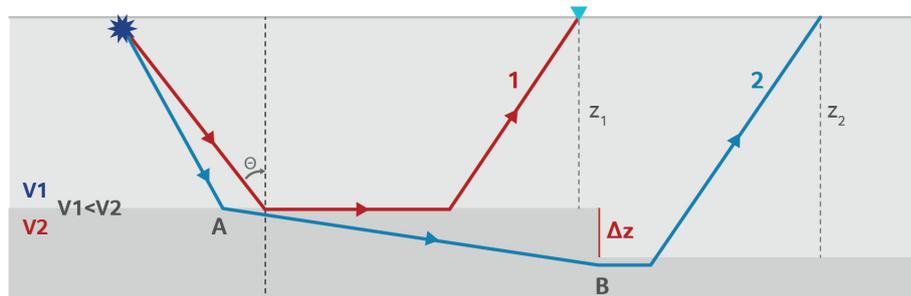


Figura 19 – Refrator horizontal falhado.

Na Figura 19, a existência de um deslocamento  $\Delta z$  relacionado a uma falha geológica, resulta na existência de dois tempos de interceptação  $t_{i1}$  e  $t_{i2}$  na curva Tempo *versus* Distância (Figura 20).

A diferença  $\Delta t$  entre esses tempos está relacionada com  $\Delta z$  por meio das equações

$$\Delta t \approx \frac{\Delta z \cos \theta}{v_1} \quad (2.17)$$

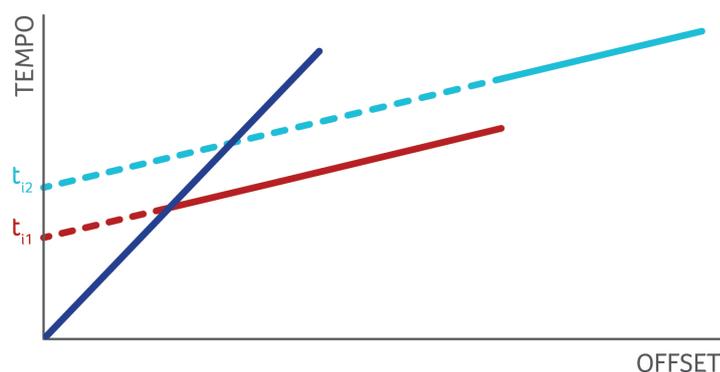


Figura 20 – Segmento de afastamento da curva tempo *versus* distância para chegadas refratadas de lados opostos de uma falha.

e

$$\Delta z \approx \frac{\Delta v_1}{\cos\theta} = \frac{\Delta t v_1 v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (2.18)$$

A aproximação usada se dá, porque o raio que se desloca diretamente de A para B, não é um raio criticamente refratado.

## 2.5 Camadas com Interface Irregulares (não planas)

Para este modelo mais complexo, nenhum dos métodos apresentados até aqui fornece um bom resultado. Ao simplificar um modelo conhecidamente mais intrincado, insere-se uma considerável probabilidade de erros e imprecisões. A identificação de interfaces não planas pode ser feita observando os gráficos de tempo *versus* distância, percebendo que as curvas associadas não são regulares como as relacionadas a interfaces planas. Para análise desses gráficos, uma abordagem bastante aplicada é o incremento de uma incógnita, chamada tempo de atraso  $\delta$  e a utilização do método de interpretação mais-menos.

**Tempo de atraso** Para entender o conceito de tempo de atraso, considere a Figura 14. O tempo de percurso de uma onda refratada em um modelo de duas camadas plano paralelas é dado pela equação

$$t = \frac{x}{v_2} + t_i, \quad (2.19)$$

onde  $t_i$  é o ponto de interceptação e a fração  $x/v_2$  corresponde ao tempo de trânsito da onda na interface entre o meio 1 e 2.

O tempo de interceptação  $t_i$  é composto por dois tempos de atrasos,  $\delta_{td}$  e  $\delta_{ts}$ , que são respectivamente os tempos de atrasos da onda ao se deslocar para baixo, em direção ao refrator e para cima em direção à superfície.

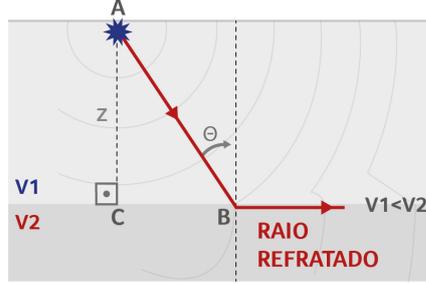


Figura 21 – Interpretação do conceito de atraso em um refrator horizontal.

No triângulo ABC da Figura 21, observa-se um esquema do início do caminho do raio, partindo da fonte, até ser criticamente refratado. O tempo de atraso é dado, então, por  $\delta_{td} = t_{AB} - t_{BC}$ , chegando-se a equação

$$\delta_{td} = \frac{z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (2.20)$$

Para a profundidade do refrator  $z$ , tem-se:

$$z = \frac{\delta_{td} v_1 v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (2.21)$$

Do outro lado, no receptor, o tempo de atraso é obtido da mesma maneira que a anterior. Sendo  $t_i = \delta_{td} + \delta_{ts}$ , a Equação 2.19 pode ser escrita como:

$$t = \frac{x}{v_2} + \delta_{td} + \delta_{ts} \quad (2.22)$$

No caso de um refrator inclinado (Figura 22), o tempo de percurso é dado por

$$t = \frac{x'}{v_2} + \delta_{td} + \delta_{ts}, \quad (2.23)$$

sendo  $\delta_{td} = t_{AB} - t_{BC}$  e  $\delta_{ts} = t_{DE} - t_{DF}$ .

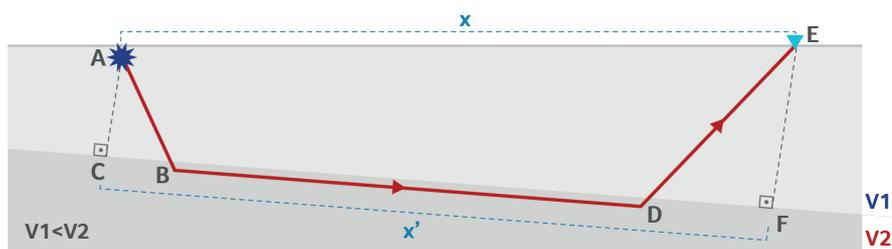


Figura 22 – Trajetória de raio associada a um refrator inclinado.

**Método de Interpretação Mais-Menos** O método Mais-Menos é utilizado para determinar valores de atrasos individuais para o cálculo das profundidades locais de um refrator irregular, com mergulhos menores que 10 graus. A Figura 23A representa um modelo de duas camadas com interface irregular e as trajetórias de raios em uma linha com tiro direto e reverso dados em  $S_1$  e  $S_2$ , respectivamente, em direção a um detector em D.

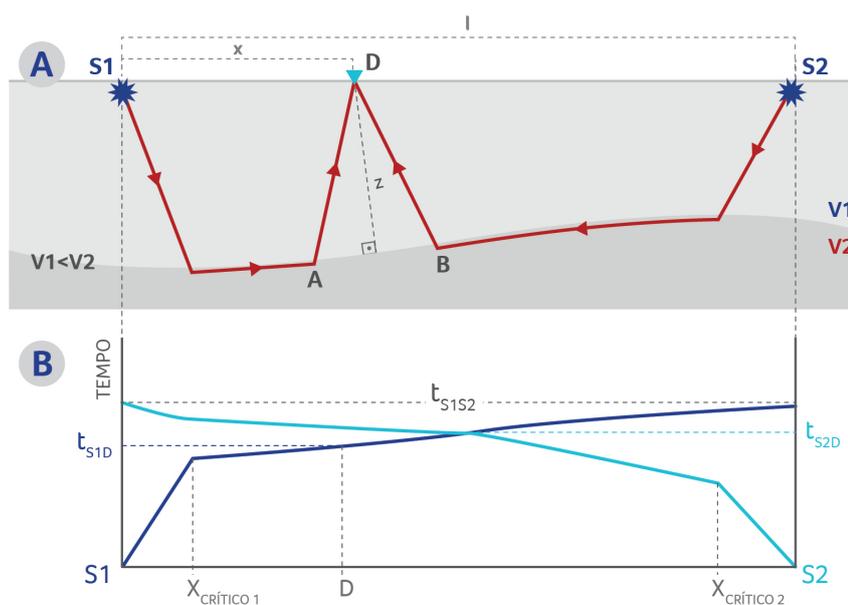


Figura 23 – (A) Trajetória de raio refratado a partir de cada extremidade até um detector em uma posição intermediária. (B) Curvas tempo *versus* distância nas direções direta e reversa.

O tempo de percurso total de um ponto de tiro até o outro é:

$$t_{S_1S_2} = \frac{l}{v_2} + \delta_{tS_1} + \delta_{tS_2}, \quad (2.24)$$

onde  $\delta_{tS_1}$  e  $\delta_{tS_2}$  são os tempos de atraso nos pontos de tiro. O tempo de percurso para os raios direto e reverso são respectivamente:

$$t_{S_1D} = \frac{x}{v_2} + \delta_{tS_1} + \delta_{tD} \quad (2.25)$$

e

$$t_{S_2D} = \frac{l-x}{v_2} + \delta_{tS_2} + \delta_{tD} \quad (2.26)$$

onde  $\delta_{tD}$  é o tempo de atraso no receptor.

O termo menos, no método de interpretação Mais-Menos, se refere à diferença entre os tempos das Equações 2.25 e 2.26, de onde se chega à equação

$$t_{S_1D} - t_{S_2D} = \frac{(2x-l)}{v_2} + \delta_{tS_1} - \delta_{tS_2} \quad (2.27)$$

A partir do resultado obtido na Equação 2.27, a inclinação  $\frac{1}{v_2}$  pode ser obtida através do gráfico Termo Menos ( $\delta_{tS_1} - \delta_{tS_2}$ ) *versus* Distância ( $2x-l$ ), uma vez que os termos  $\delta_{tS_1}$  e  $\delta_{tS_2}$  são constantes e  $v_2$  não pode ser obtida diretamente da curva irregular de tempo *versus* distância (Figura 23B). Assim, chega-se ao valor da velocidade na camada dois.

## 3 Inversão Tomográfica

Tendo os dados de entrada que são, no caso da sísmica de refração, os tempos de trânsito da onda criticamente refratada, que retorna à superfície como uma *head wave*, e após a definição do modelo inicial e o cálculo dos tempos de trânsito neste modelo inicial, dá-se início à inversão do dado.

No entanto, para o seu melhor entendimento, faz-se necessário rever a ideia do Problema Direto

### 3.1 O Problema Direto

Em geral, para muitas finalidades na geofísica, a modelagem das ondas sísmicas é feita através de uma equação diferencial parcial onde a sua solução será a intensidade da onda em determinado tempo e posição.

O problema direto é exatamente o cálculo para obter este resultado.

#### 3.1.1 $d=Lm$

Na tomografia de refração, o problema direto é o cálculo do tempo de trânsito das primeiras chegadas. Ao calcular os tempos do tempo de trânsito a partir de um modelo inicial, se está solucionando o problema direto.

Usualmente, o problema direto é representado pela relação

$$d = L.m, \tag{3.1}$$

onde  $d$  é o dado calculado (tempo de trânsito),  $L$  é a matriz tomográfica, cujos elementos  $l_{ij}$  são informações a respeito do traçado dos raios, e  $m$  é o modelo da subsuperfície em si, representado por uma matriz de parâmetros. Para a tomografia,  $m$  é o modelo de velocidades, ou seja, é uma matriz que contém os valores de velocidade. Velocidades estas que caracterizam a subsuperfície.

Uma outra forma de enxergar a relação  $d = L.m$  é da forma matricial

$$\begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{K1} & l_{K2} & \cdots & l_{KN} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_K \end{pmatrix} = T$$

Nota-se um vetor com os tempos de trânsito (os dados calculados  $t_i$ ); um vetor com a propriedade física (os parâmetros  $m_i$ ); e a matriz tomográfica  $L_{ij}$  que os relaciona, também conhecida como matriz de sensibilidade.

Estudando o problema direto, pode-se observar os efeitos que mudanças na matriz construída a partir do traçado de raios ou alterações no modelo de velocidade provocam nos tempos de trânsito. Isto auxilia no processo de inversão, já que estes dados calculados diretamente serão utilizadas na busca para identificar os parâmetros do modelo que descrevem os dados observados.

### 3.1.1.1 Problema linear

Anteriormente, o problema direto foi apresentado como um problema linear. O dado  $d$  é obtido a partir da relação independente de cada termo da multiplicação (matriz  $L$  e matriz  $m$ ). Ou seja, a matriz  $L$  foi gerada sem influência dos valores de  $m$ . Para a tomografia, isto significaria que o raio não sofreria mudança em sua direção de deslocamento mesmo que atravessasse células do modelo com velocidades diferentes. No entanto, esta situação não se aplicaria já que consideramos o Princípio de Fermat para o traçado de raios (SERRETTI; MORELLI, 2011).

### 3.1.1.2 Princípio de Fermat

O *Princípio de Fermat* enuncia que um raio percorre o trajeto entre dois pontos levando o menor tempo possível. É também chamado de *Princípio do Tempo Mínimo* (Figura 24). (FERNANDES, 2008)

Se o meio a ser estudado fosse um meio homogêneo, o caminho mais rápido seria uma linha reta e que coincidentemente seria o caminho com menor distância, caso do problema linear.

Porém, a subsuperfície é reconhecida como um meio heterogêneo. Neste caso, o caminho mais rápido não será uma linha reta e sim, sofrerá alterações no seu curso. Portanto, a tomografia de refração é definida como um problema não linear.

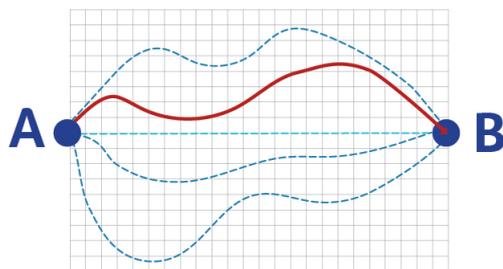


Figura 24 – Caminhos possíveis para o raio sair da fonte e atingir o receptor. O caminho percorrido será o que leva menor tempo para ir de A até B, segundo o Princípio de Fermat. Em vermelho, está representado o percurso que poderia ser o de menor tempo, porém não o de menor distância. Isto ocorre quando o meio por onde o raio se propaga é heterogêneo.

### 3.1.1.3 Problema Não Linear

Uma característica do problema a ser investigado pela tomografia de refração e que influenciará na definição do fluxo de resolução é a sua não linearidade. A matriz de sensibilidade  $L$  é dependente do parâmetro que se deseja obter. Em outras palavras, o raio tem seu percurso desviado quando há mudança de velocidade e como a matriz de sensibilidade é uma representação do caminho do raio de acordo com as velocidades em cada célula parametrizada do modelo da subsuperfície, tem-se uma aparente contradição. Busca-se definir uma matriz que depende de parâmetros que são exatamente os parâmetros que se deseja obter ao final do método. É a partir desta contradição que se considera o problema, um problema não linear.

A relação entre os dados, a matriz de sensibilidade e os parâmetros agora é representada por

$$d = L(m) \quad (3.2)$$

## 3.2 Matriz de Sensibilidade

A matriz de sensibilidade ou matriz tomográfica é a matriz que armazena informações sobre o caminho percorrido pelo raio ao longo do modelo. Cada linha da matriz representa um raio, ou seja, se o modelo for atravessado por 10 raios, a matriz de sensibilidade será constituída por 10 linhas. Já o número de colunas é o número de parâmetros do problema. Exemplificando, isto quer dizer que, se um modelo for discretizado por células regulares, sendo, na direção  $x$ , 3 células e, na direção  $z$ , 2 células, o modelo será representado por 6 células (6 parâmetros). Assim, a matriz tomográfica terá 6 colunas, neste caso. Se o modelo for varrido por 3 raios, a matriz de sensibilidade será uma matriz 3 x 6. Então, dependendo da discretização performada a matriz de sensibilidade pode se tornar um tanto extensa.

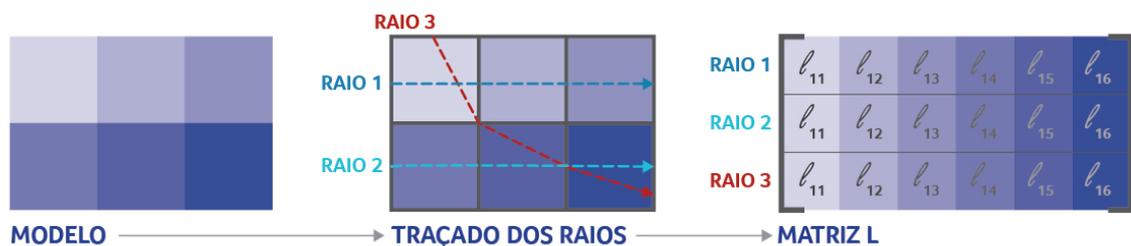


Figura 25 – Exemplo da matriz de sensibilidade construída a partir de um modelo discretizado por células regulares com 3 colunas e 2 linhas. A matriz de sensibilidade terá 6 colunas. O número de linhas será o número de raios que percorreu o modelo discretizado.

Cada elemento da matriz, portanto, irá relacionar o raio com a célula do modelo. Se o raio não contemplar uma determinada célula, o elemento na matriz terá o valor 0 na linha representativa do raio e na coluna referente ao parâmetro. Ou seja, o parâmetro que não for contemplado pelo raio terá valor 0 no elemento da matriz (Figura 26). Isto poderá acarretar questões quanto à inversibilidade da matriz, necessitando de artifícios matemáticos como por exemplo a soma de algum argumento. Esta operação é conhecida como técnica de regularização e que é comentada no anexo 1 deste trabalho.

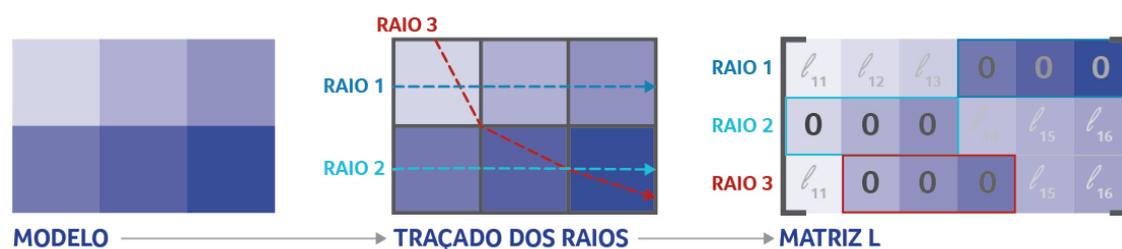


Figura 26 – Exemplo da matriz de sensibilidade construída a partir de um modelo discretizado por células regulares com 3 colunas e 2 linhas. Os raios que atravessaram o modelo não percorreram todas as células de discretização. Assim, alguns elementos da matriz  $l$  são iguais a zero.

### 3.2.1 Discretização do Modelo

A matriz de sensibilidade requer que o meio seja discretizado. O ato de discretização significa tornar uma propriedade contínua, neste caso, uma propriedade física, em uma propriedade com valores finitos.

Há diversas formas de discretizar um meio e é interessante que esta discretização utilizada seja adequada ao problema e à região a ser estudada. Por exemplo, em seu estudo, Santos e Figueiró (2006) diminuíram o número de parâmetros e, conseqüentemente reduziram a complexidade do problema, em 6 vezes aplicando a discretização através de polinômios trigonométricos em relação à discretização mais comumente utilizada, por células regulares. Células regulares com velocidades constantes são conceitualmente mais simples, mas requerem uma discretização detalhada o que pode aumentar muito o custo computacional da próxima etapa, o traçado de raios (MARTINS; KNAPP, 1993).

Daí a importância de uma boa escolha da malha para discretizar o modelo.

#### 3.2.1.1 Discretização por células regulares

A discretização por células regulares é talvez a mais direta das formas de se descrever um modelo. Se houver um paralelo com a construção de uma imagem computacional, onde cada pixel tem uma série de informações sobre aquela determinada região da tela, a célula regular pode ser imaginada como um pixel da subsuperfície que carrega uma certa informação.

Segundo Santos e Figueiró (2006), é um tipo de discretização adequado para

cenários complexos, porém levando em conta que as células devem ser menores que o menor detalhe. Isto poderia aumentar consideravelmente o custo computacional.

### 3.2.1.2 Discretização por células irregulares

Bastante parecida com a discretização anterior, a discretização por células ou malhas irregulares é como um artifício para descrever regiões que tenha pouca complexidade em certas áreas e já em outras, alta complexidade (SANTOS; FIGUEIRÓ, 2006). Ou seja, em regiões mais simples, os algoritmos definirão células maiores e, para as mais complexas, estabelecerão células menores.

O *software* utilizado para aplicar a tomografia de refração neste trabalho não permite a escolha deste parâmetro. A opção do algoritmo é de discretizar o meio por células irregulares (Figura 27).

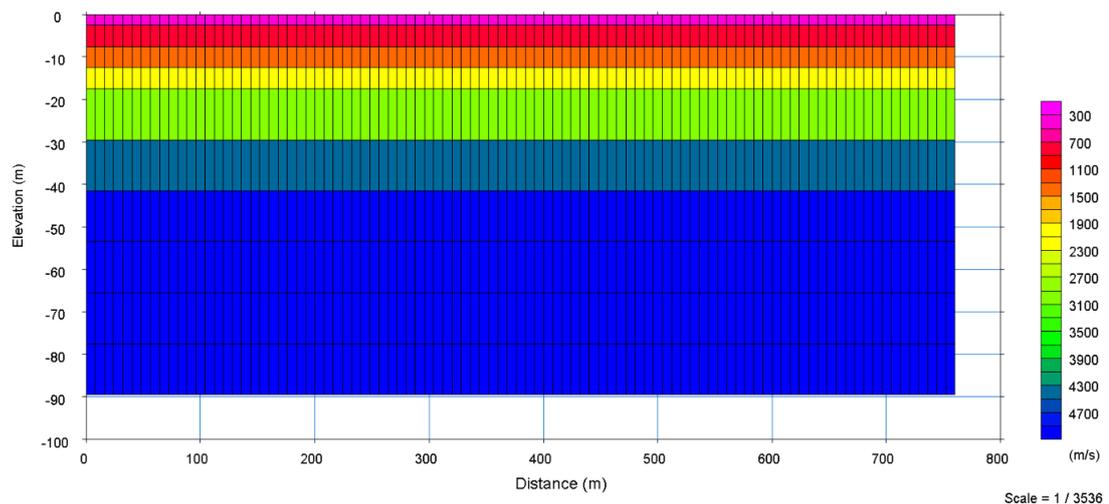


Figura 27 – Exemplo de discretização realizada pelo software *SeisImager*<sup>TM</sup> da Geometrics Inc. sobre um modelo inicial de camada plano paralelas.

Deve-se atentar que células não necessariamente são quadradas. Podem assumir outros formatos geométricos de acordo com o objetivo estabelecido.

### 3.2.1.3 Discretização por malhas triangulares e tetraédricas

Malhas triangulares e tetraédricas são flexíveis e permitem um traçado de raios analítico quando a velocidade é constante ou constante no gradiente dentro

de uma célula (RAWLINSON; HAUSER; SAMBRIDGE, 2008). No entanto, como a discretização por blocos, elas geralmente requerem uma discretização detalhada e podem desestabilizar o problema do traçado de raios.

#### 3.2.1.4 Discretização por polinômios

Neste tipo de discretização por polinômios, aplica-se o uso de funções polinomiais para descrever o meio. Por exemplo, é esperado que ao se aprofundar na subsuperfície, as rochas encontradas possuam maior grau de compactação, isto é, menor valor de porosidade (RAWLINSON; HAUSER; SAMBRIDGE, 2008). Esta redução na porosidade, em teoria, aumenta a velocidade da rocha. Assim, seria adequado escrever uma equação de primeiro grau para formalizar matematicamente qual o comportamento da velocidade nesta subsuperfície.

#### 3.2.1.5 Discretização por camadas

A discretização camada a camada, muitas vezes chamada de discretização *layer cake*, possibilita discretizar o meio indicando as camadas e suas espessuras aproximadas. Pode também ser aplicada junto com outras técnicas de discretização para compor o modelo de velocidade de uma camada (SANTOS; FIGUEIRÓ, 2006). Este tipo de discretização *layer cake* não é usualmente utilizada na inversão tomográfica, já que pode ser bastante restritiva, especialmente, quando da necessidade de representar estruturas como falhas, que possuem certa complexidade em uma profundidade mais rasa. Uma opção de aplicação deste tipo de parametrização, como visto no capítulo 2, é servir como modelo inicial —após uma rotina de suavização —para a inversão, como será visto mais a frente.

#### 3.2.1.6 Discretização por função harmônica (Série de Fourier)

Com uma aplicação mais complexa, porém bastante eficiente, como apresentado por Santos e Figueiró (2006), a discretização por função harmônica utiliza a soma de senos e cossenos e seus coeficientes. Assim, o modelo pode ser descrito com uma equação semelhante à Série de Fourier, já que esta busca exatamente representar funções através da soma de senos e cossenos de acordo com coeficientes que equilibram seus termos.

Este tipo de discretização, diferentemente de outros que utilizam *grids* de velocidade em um domínio espacial para descrever um meio suavizado, explora o domínio do número de onda ao empregar uma parametrização espectral. São especialmente aplicadas em problemas que requerem os tempos de trânsito como solução.

### 3.2.1.7 Discretização por *Splines* cúbicas

Há muitos tipos de funções *spline* que podem ser usadas para interpolação, incluindo *Bezier* e *splines* sob tensão. As *splines* cúbicas são particularmente úteis, já que oferecem continuidade de classe  $C^2$ , ou seja, descrevem um meio de forma suave e a possibilidade de uma distribuição de nós irregular.

Por exemplo, para a discretização por *splines* em 1D, deve-se definir uma série de nós e uma função de interpolação se adaptará com o comportamento conhecido de uma *spline* (Figura 28). Extendendo para o caso 2D, deve-se pensar no comportamento da *spline* agora em uma superfície, gerada pelo produto de duas funções 1D concorrentes.



Figura 28 – Ajuste de uma spline 1D para percorrer os três nós definidos.

Enfim, na tomografia sísmica, há uma tendência ao uso de discretizações irregulares por ser um problema com pacotes de dados muito extensos e muitas vezes heterogêneos. A possibilidade de adaptar uma malha de acordo com as variações no meio pode fornecer um aumento da eficiência computacional, melhorar a estabilidade do problema inverso e melhorar a identificação de informações estruturais.

Estas parametrizações irregulares vem sendo utilizadas tanto para técnicas de traçado de raios baseados no raio tanto para traçado de raios baseados no *grid*, como será apresentado na próxima seção.

Por exemplo, no método que soluciona a equação Eikonal por diferenças finitas, *grids* irregulares podem melhorar a eficiência computacional apenas ao variar a resolução do *grid* em resposta à curvatura da frente de onda.

## 3.3 Traçado de Raios

Para se obter os dados dos tempos de trânsito necessários para realizar a inversão tomográfica, é essencial definir o percurso do raio que saiu da fonte e foi registrado pelo receptor. Como visto, este caminho percorrido pelo raio deve ser antes de mais nada regido pelo Princípio de Fermat. O raio não percorrerá simplesmente o caminho de menor distância, mas sim o que fornecer o menor tempo entre o ponto de saída e o ponto de chegada. Isto se dá pela característica não-linear da relação entre a velocidade e a geometria do caminho.

Por ser um assunto com muitas nuances e a depender de muitos fatores, inclusive tem relação com a discretização escolhida para o modelo a ser percorrido pelo raio, uma variedade de técnicas vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas. Estudam diferentes formas, por exemplo, de como melhor descrever a propagação da onda através de uma subsuperfície heterogênea e o seu comportamento ao se deparar com uma interface separando dois meios com propriedades contrastantes.

Os métodos que, a seguir, serão apresentados foram analisados e descritos no trabalho de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008), onde também apresenta as formulações matemáticas para cada técnica.

Como a maioria dos métodos que são aplicados na prática podem ser classificados ou como baseados no raio ou como baseados em um *grid*, as subseções a seguir serão também divididas assim.

### 3.3.1 Equação Eikonal

Os métodos que serão apresentados nas próximas seções, tanto os baseados no raio como os baseados no *grid*, estão relacionados à aproximações de alta frequência da onda. Sendo assim, o comprimento de onda da onda que se propaga pela subsuperfície é substancialmente mais curto que as heterogeneidades sísmicas que caracterizam o meio. Esta hipótese permite simplificar a equação completa da onda elástica e, conseqüentemente, o cálculo da propagação da onda sísmica.

Resultado desta simplificação, tem-se a função *Eikonal*.

$$(\nabla T)^2 = s^2, \quad (3.3)$$

onde  $s = 1/\alpha(x)$  é a vagarosidade.  $T(x)$  é uma função do tempo (a eikonal) que descreve as superfícies com fase constante (as frentes de onda) quando  $T$  é constante.

Em outras palavras, o *Eikonal* (ou visto também como iconal) é uma função posição, tal que as superfícies com mesmo nível são ortogonais ao caminho percorrido pelo raio em meios isotrópicos. Logo, os raios estão ao longo do gradiente desta função, vetor que indica a direção de aumento do nível da função *Eikonal* (FERNANDES, 2008). O plano perpendicular ao raio é nada mais do que a frente de onda.

Portanto, como o raio é uma representação da onda, as trajetórias dos raios são caracterizadas pelas superfícies às quais eles são perpendiculares. Ou seja, as superfícies podem ser visualizadas como curvas de nível e os raios serão sempre perpendiculares a uma mesma curva.

### 3.3.2 Equações Cinemáticas do Traçado de Raios

Ao invés de resolver diretamente a equação *Eikonal*, pode-se, alternativamente, considerar sua característica de possuir trajetórias ortogonais (em um meio isotrópico) com a frente de onda. O entendimento das equações pode ser encontrado no trabalho de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008), onde se desenvolve a equação cinemática do raio, que descreve a trajetória dos raios em um meio isotrópico, como apresentado a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial l} \left( s \frac{\partial r}{\partial l} \right) = \nabla s, \quad (3.4)$$

onde  $s$  é a vagarosidade,  $r$  o vetor posição e  $l$  o caminho do raio.

Agora já definidos os conceitos de equação *Eikonal* e das equações cinemáticas dos raios, pode-se observar os diferentes métodos de traçado de raios.

### 3.3.3 Métodos Clássicos de *Ray Tracing*: Baseados no Raio

Segundo Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008), o *Ray Tracing* de Cerveny (1987) tem sido tradicionalmente o método de escolha para muitas aplicações sísmicas devido à sua alta precisão e seu potencial computacional eficiente. No entanto, sua robustez é questionada, pois em muitos casos falha em convergir para

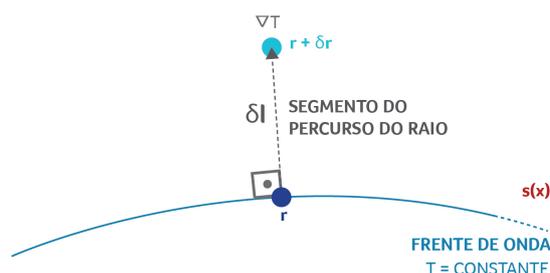


Figura 29 – Variáveis utilizadas para descrever a frente de onda e o raio.  $T$  é o tempo de trânsito,  $r$  é o vetor posição de um ponto na frente de onda,  $l$  é o comprimento do raio e  $s(x)$  é a vagarosidade.

o caminho com menor tempo de percurso entre dois pontos, mesmo em um meio não tão heterogêneo.

Dentro dos métodos clássicos de traçado de raios, ou seja, dentro dos métodos chamados *Ray Tracing*, há duas categorias principais:

1. Método *Shooting*
2. Método *Bending*

Estes dois métodos possuem formulações diferentes para as equações de traçado de raios e para cada um há diversos algoritmos, buscando melhorar a eficiência de seus conceitos.

### 3.3.3.1 Métodos *Shooting*

Os métodos de *Shooting* são conceitualmente simples. Formulam a equação cinemática do raio como um problema de valor inicial (PVI), o que permite traçar o caminho completo do raio ao fornecer a trajetória inicial do percurso. Posteriormente, traçar o raio se torna um problema inverso no qual o que não se conhece é exatamente o vetor de direção inicial do raio, e a função a ser minimizada é a medida da distância entre o ponto final do raio e o receptor. O principal desafio que este tipo de método encara é a não linearidade do problema inverso, o qual tende a aumentar dramaticamente com a complexidade do meio.

### 3.3.3.1.1 PVI + Condições de Fronteira

Os métodos *Shooting* de traçado de raios geralmente solucionam os problemas de condições de fronteira, sondando o meio com caminhos de raio de valor inicial e, em seguida, extraindo informações a partir dos percursos computados para melhor direcionar ao receptor (RAWLINSON; HAUSER; SAMBRIDGE, 2008).

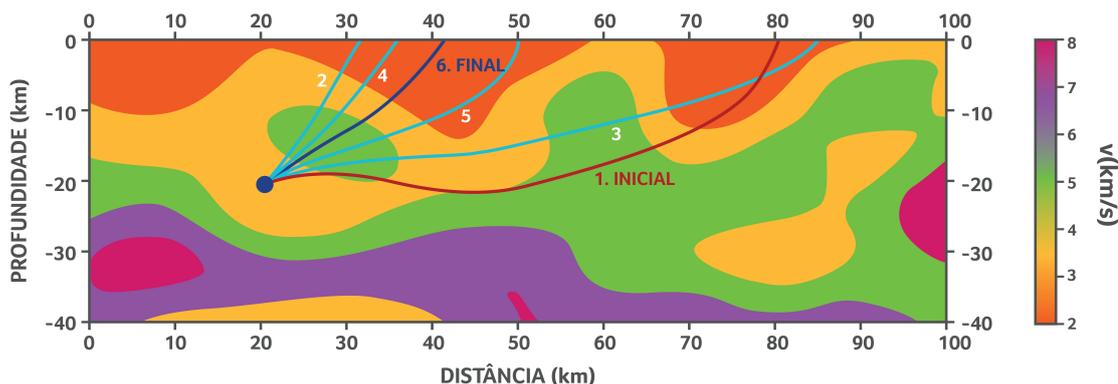


Figura 30 – Princípio do método *Shooting*. Neste caso, uma trajetória inicial do raio é atualizada até convergir para um receptor. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).

Para isso, pode-se aplicar uma técnica iterativa para solucionar problemas não lineares. Uma delas é o método de Newton que equivale a uma linearização simples. Assim, ao dar alguma trajetória inicial, a solução das equações linearizadas fornecem uma atualização da trajetória e o processo é repetido até alcançar um critério de tolerância apropriado. O sucesso desse método depende amplamente do que se fornece como suposição inicial para um raio que irá convergir para o mínimo correto sob a hipótese de uma linearidade local (JONES, 2010). Esta suposição inicial suficientemente precisa pode ser obtida de várias formas, incluindo atirar um grande leque de raios na direção do arranjo de receptores e depois (se necessário) disparar grupos de raios cada vez mais direcionados às zonas contendo receptores até que um raio inicial, apropriadamente preciso, seja obtido.

Enfim, métodos de traçado de raios *Shooting*, devido ao seu conceito simples, são amplamente utilizados na sismologia e frequentemente aplicados na tomografia sísmica, onde se combina dados observados com dados calculados através de técnicas de inversão.

### 3.3.3.2 Método *Bending*

O princípio do método de traçado de raios *Bending* é ajustar iterativamente a geometria do caminho inicial definido arbitrariamente e que liga a fonte ao receptor até se tornar o caminho verdadeiro do raio, isto é, que satisfaça o Princípio de Fermat de tempo estacionário. Uma abordagem comum para implementar o método de *Bending* é derivar a formulação da condição de fronteira da equação cinemática do traçado de raio, que pode assim ser resolvida iterativamente.

O processo iterativo pode ser repetido até se adequar a algum critério de convergência.

### 3.3.3.3 Método *Pseudo Bending*

Métodos de *Pseudo-Bending* são similares ao princípio do método *Bending*, mas evitam solucionar diretamente as equações do raio. É baseado no caminho do raio sendo representado por um conjunto de pontos linearmente interpolados.

Dado algum caminho inicial aleatório, o objetivo é ajustar sequencialmente a posição de cada ponto para que o caminho melhor satisfaça as equações do raio. Isto pode ser alcançado bem eficientemente ao posicionar a direção normal do percurso do raio e depois diretamente aplicar o Princípio de Fermat (RAWLINSON; HAUSER; SAMBRIDGE, 2008).

Um caminho inicial arbitrário pode ser definido de várias formas, mas uma opção simples é começar com um raio com três pontos ligando a fonte e o receptor. Uma vez que o ponto central foi perturbado, dois novos pontos são introduzidos, dividindo cada segmento de linha. Este processo continua até obter um caminho preciso adequado.

O procedimento de atualização para um método de *Pseudo-Bending* é muito simples e computacionalmente eficiente, já que apenas requer solucionar duas equações relativamente simples.

Há também trabalhos baseados nesta técnica de perturbação de três pontos, que propõem uma modificação a fim de permitir a presença de interfaces (RAWLINSON; HAUSER; SAMBRIDGE, 2008). Neste caso, a sequência de pontos que discretamente define o caminho inclui pontos que estão posicionados em cada interface que é

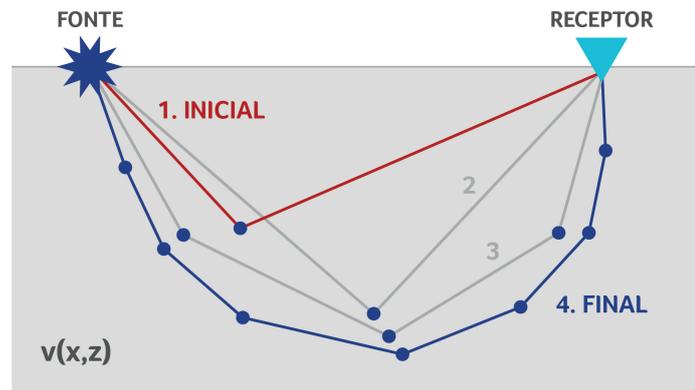


Figura 31 – Princípio do Método de *Pseudo-Bending*. Nesse exemplo esquemático, uma suposição inicial do raio é definida por três pontos. O ponto central é perturbado para satisfazer o Princípio de Fermat. Em seguida, o número de segmentos é dobrado e o processo repetido. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).

atravessada pelo raio. Quando o esquema de atualização atinge os pontos, eles são perturbados ao longo da interface até que a Lei de Snell seja satisfeita.

Enfim, duas classes de métodos de *Bending* foram apresentadas. Na primeira, a equação do raio é linearizada e iterativamente solucionada como um problema de valor inicial com condição de fronteira. A segunda abordagem - *Pseudo-Bending* - utiliza uma técnica de perturbação simples baseado na aplicação direta do Princípio de Fermat para um percurso do raio descrito por uma sequência de pontos. Embora esses sejam os principais métodos, muitas outras técnicas têm sido desenvolvidas (RAWLINSON; HAUSER; SAMBRIDGE, 2008).

Portanto, a maioria das técnicas para solucionar o problema de valor inicial com condição de fronteira do traçamento de raio pode ser caracterizada ou como método de *Bending* ou como método de *Shooting*.

### 3.3.4 Métodos Baseados no *Grid*

Uma nova forma de abordar o traçado de raios é desenvolver algoritmos baseados em um *grid*. Recentemente, houve uma proliferação deste tipo de método que trabalha com diferentes formas de se imaginar e construir a frente de onda. Ou seja, os métodos tem por objetivo calcular o tempo de trânsito ao longo da propagação

da frente de onda para todos os pontos do *grid* que recobre o meio. São técnicas quase sempre relacionadas à solução da equação *Eikonal* por diferenças finitas (VIDALE, 1988) ou pelo conceito de *Shortest Path Ray* (MOSER, 1991).

O campo completo de traçado de raios implicitamente contém a localização da frente de onda como uma função do tempo (isto é, isócronas de  $T(x)$  ou curvas de nível de  $T(x)$ ) e todas as possibilidades de trajetória do percurso do raio (especificado por  $\nabla T$ ). Na comparação realizada por Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008) entre os métodos convencionais de *Shooting* e *Bending* de traçado de raios, métodos de tempo de trânsito baseados em *grids* tem algumas vantagens como:

1. A maioria é capaz de calcular os tempos de trânsito para todos os pontos do meio, e irão posicionar difrações em zonas de sombra do raio.
2. A não linearidade dos métodos de *Shooting* e *Bending* significa que eles poderão falhar para convergir para um caminho verdadeiro entre dois pontos, enquanto a maioria das técnicas baseadas em *grids* são altamente estáveis e irão achar a solução correta mesmo em meios complexamente heterogêneos.
3. Técnicas baseadas em *grids* são bastante eficientes em calcular o tempo de trânsito e o caminho do raio em uma precisão necessária para problemas práticos.
4. A maioria das técnicas baseadas em *grids* acham consistentemente as primeiras chegadas em meios contínuos. É quase sempre difícil assegurar com o *Ray Tracing* se o percurso demarcado é de uma primeira chegada ou de uma chegada mais tardia.

No entanto, métodos baseados em *grids* tem certas limitações. Por exemplo,

1. Precisão está ligada com o espaçamento do grid, o que pode aumentar significativamente o custo computacional.
2. A maioria das técnicas apenas calculam a primeira chegada.

Métodos baseados em *grids* incluem aqueles que resolvem a equação *Eikonal* por diferenças finitas em um *grid* de pontos e os que traçam os raios por *Shortest*

*Path Ray (SPR)*, que buscam os tempos de trânsito e caminhos dos raios através de uma rede de nós com conectividade pré-determinada. Ambas as técnicas são capazes de calcular os tempos de trânsito para todos os pontos em um meio de uma maneira estável e computacionalmente eficiente, os que as tornam alternativas viáveis ao *Ray Tracing* convencional.

Segundo Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008) as soluções da equação Eikonal compartilham muitas similaridades com a técnica *Shortest Path Ray* como será visto a seguir.

### 3.3.4.1 Método de Solução de Equação Eikonal por Diferenças Finitas

Soluções da *Eikonal* têm sido utilizadas em uma variedade de aplicações sísmicas, e são particularmente úteis para problemas que necessitam supor um extenso conjunto de dados de tempo de trânsito. Por isso, é frequentemente utilizado pela tomografia de refração.

Um dos primeiros métodos baseados na solução da equação *Eikonal* por diferenças finitas foi proposto por (VIDALE, 1988). A partir da fonte, tempos de trânsito são progressivamente calculados até um quadrado delineado no seu entorno. Assim, os tempos de trânsito são calculados para os pontos que estão neste quadrado inicial. Os quatro nós situados ao longo da aresta do quadrado são estimados pela relação:

$$T_{i\pm 1,j} = \frac{\delta x}{2(s_{i\pm 1,j} + s_{i,j})} \quad (3.5)$$

e

$$T_{i,j\pm 1} = \frac{\delta z}{2(s_{i,j\pm 1} + s_{i,j})} \quad (3.6)$$

onde  $s$  é a vagarosidade e  $\delta x$  e  $\delta z$  são o espaçamento do grid em  $x$  e  $z$ .

O uso da ideia do "quadrado expansível" para definir a forma da frente de onda pode nem sempre respeitar a direção do fluxo do tempo de trânsito através do meio. Como uma consequência, as primeiras chegadas podem não ser garantidas, o que pode levar a instabilidade. Mesmo assim, o esquema proposto por Vidale (1988) se mantém popular, e sua estabilidade foi melhorada através da introdução de novos recursos para realizar a diferença finita e a propagação da frente de onda computacional. Qin et al. (1992), ao invés de usar este quadrado em expansão como frente de onda para calcular os tempos de trânsito, utilizou a propagação da

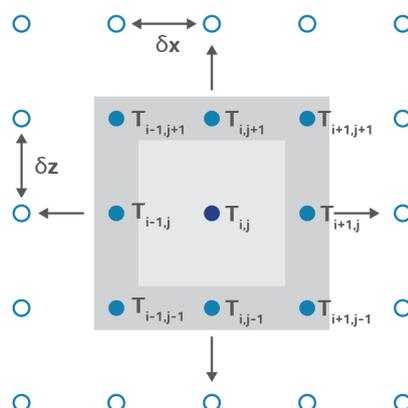


Figura 32 – O método do quadrado expansível para cálculo progressivo dos tempos de trânsito através de um campo de velocidade “gridado”. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).

própria frente de onda. Esta abordagem garante que a forma da frente de onda computacional esteja de acordo com a frente de onda da primeira chegada, o que minimiza a possibilidade de computar as chegadas além da primeira.

Métodos baseados em *grids* de solução da equação *Eikonal* são amplamente utilizados para calcular as primeiras chegadas no tempo de trânsito em meios contínuos, e de fato, a maioria dos métodos garantem a sua estabilidade nestes casos.

#### 3.3.4.2 Método *Shortest Path Ray*

O método de traçado de raio *Shortest Path Ray* ou *SPR* —ou ainda mencionado como *Wave Propagation Method* —é outro método popular para determinar os tempo de trânsito de primeira chegada para todos os pontos do campo de velocidade “gridado” (MOSER, 1991). Ao invés de solucionar uma equação diferencial, uma rede é formada ao conectar nós vizinhos com segmentos de caminhos de tempo de trânsito. Assim, de acordo com o Princípio de Fermat, o caminho de menor tempo será o que corresponde ao percurso real do raio.

Uma metodologia para este método é definir o campo de velocidade como um conjunto de células com velocidades constantes e com uma rede de nós posicionadas

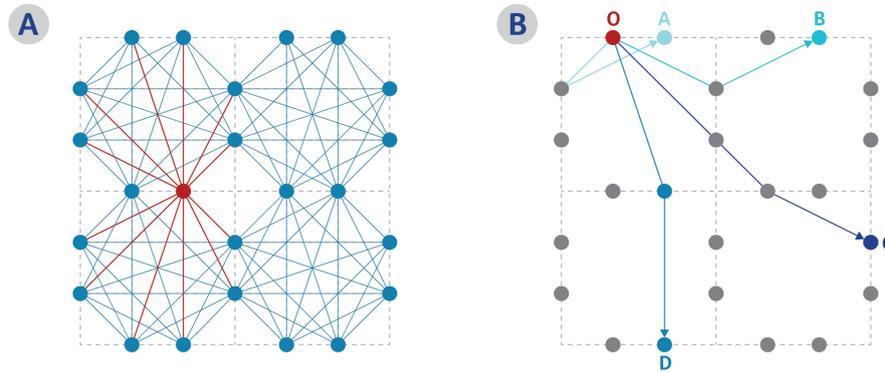


Figura 33 – Rede do método *Shortest Path Ray* construída sobre um *grid* com células de velocidades constantes por Nakanishi e Yamaguchi (1986). (A) Todos os caminhos possíveis entre nós. A linha vermelha apresenta todas as conexões de apenas um nó. (B) Caminhos mais curtos entre a origem  $O$  e uma seleção de nós e um meio homogêneo. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).

na interface entre cada célula. A vantagem desta abordagem é que os tempos de trânsito entre cada par de nós podem ser facilmente avaliados como  $t = d \cdot s$  onde  $d$  é a distância entre os dois nós e  $s$  é a vagarosidade da célula que contém o segmento do raio. A precisão pode ser aumentada ou por reduzir o tamanho da célula ou pelo aumento do número de nós em cada aresta da célula.

Por sua simplicidade na execução do algoritmo, foi este o método escolhido para construir o traçado de raios apresentado no módulo de inversão tomográfica, *Plotrefa<sup>TM</sup>* da empresa Geometrics Inc. e que foi responsável por gerar os resultados que serão apresentados no capítulo 5 deste trabalho. O “número de nós” —ou, do inglês, *number of nodes*—, por exemplo, é um dos parâmetros que foram testados durante a realização da tomografia de refração.

Outra forma de criar uma rede é usar um *grid* regular de nós de velocidades e formar conexões lineares entre os nós de velocidade adjacentes (MOSER, 1991) como mostrado na Figura 34A. O tempo de trânsito entre dois nós conectados A e B podem ser aproximados simplificadaamente por  $t = d(s_A + s_B)/2$ , onde  $s_A$  e  $s_B$  são as vagarosidades nos nós A e B, respectivamente. A distância angular entre os segmentos que saem de um apenas um nó na Figura 34B é  $45^\circ$ , o que é relativamente grande. Isto pode ser reduzido aumentando o número de conexões

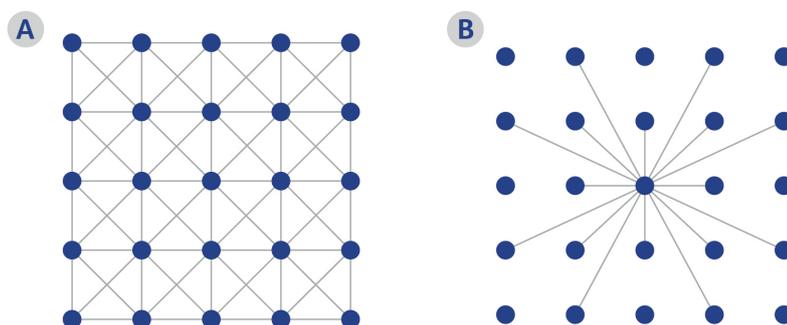


Figura 34 – Rede do método de *Shortest Path* construída sobre um *grid* com nós de velocidade por Moser (1991). (A) Um *grid* com 25 nós com 8 conexões por nó. (B) Aumentando o número de conexões permite representar mais precisamente os menores desvios dos caminhos. Modificado de Rawlinson, Hauser e Sambridge (2008).

dos nós como demonstrado na Figura 34b.

Uma vez que a estrutura da rede e o método de determinação do tempo de trânsito entre pares de nós for escolhido, o próximo passo é utilizar o algoritmo de *Shortest Path Ray* para calcular o campo de tempo de trânsito completo e percursos dos raios associados.

Enfim, vale notar a similaridade do método de *Shortest Path Ray* com as soluções da equação *Eikonal*. A única real diferença é na forma de como os tempos de trânsito são atualizados na vizinhança dos nós. Outro detalhe é que erros no método *SPR* são relacionados ao espaçamento finito de nó e a distribuição angular das conexões entre eles, pois um intervalo limitado de ângulos entre conectores adjacentes pode não permitir uma representação precisa do caminho. A precisão das soluções da *Eikonal* é também função do espaçamento do *grid*. E ainda, comparado ao *Ray Tracing*, as vantagens desses métodos baseados em um *grid* incluem a habilidade de calcular os tempos de trânsito para todos os pontos do meio em uma etapa, além de estabilidade, e em muitos casos, eficiência computacional.

## 3.4 O Problema Inverso Não linear

A tomografia como um método geofísico de inversão não linear é trabalhada através de rotinas iterativas. Os algoritmos tomográficos são construídos basicamente com a ideia de um modelo inicial e o cálculo do dado (problema direto); a comparação entre o dado calculado e o dado observado e se o resíduo estiver acima da tolerância definida como aceitável para o objetivo previamente traçado, o modelo (antes inicial) será atualizado e as rotinas novamente aplicadas. (JONES, 2010) A cada iteração, a não-linearidade do problema é reduzida gradativamente já que o modelo de velocidade tende a convergir para aquele que gerou a resposta em subsuperfície.

Este fluxo iterativo será apresentado mais a frente na seção 4.5.

### 3.4.1 Solução por Mínimos Quadrados: Norma $L_2$

O método dos mínimos quadrados é um método de otimização aplicado durante a inversão do dado, ou seja, é um método para solução de sistemas lineares, sendo muito eficiente em grande parte dos casos. Segundo Claerbout e Muir (1973), este tipo de ferramenta para ajuste de curvas é relativamente sensível à ruídos com amplitudes muito acentuadas.

No caso do problema não linear, a norma  $L_2$  é muito utilizada e seu objetivo é minimizar uma certa função, fazendo com que o resíduo, que é a diferença entre o dado calculado e o dado observado, seja o menor possível e aceitável para determinado problema. Quanto menor o resíduo do dado, menor o erro RMS do modelo. Em outras palavras, o melhor ajuste entre os tempos teóricos e os observados é aquele para o qual o RMS é menor.

Assim, no contexto de mínimos quadrados (norma  $L_2$ ), a função objetivo a ser minimizada é a do quadrado do resíduo, dada pela equação

$$\phi(m) = \|d_{obs} - L(m)\|_2 \quad (3.7)$$

onde  $d$  é o dado observado;  $L(m)$  é o dado calculado. Para elevar a matriz ao quadrado, multiplica-se ela mesma por sua matriz transposta.

Esta equação significa que buscar minimizá-la é buscar a solução que tenha o menor resíduo possível em relação ao dado observado e conseqüentemente, obter os parâmetro que melhor se ajustam às observações.

Abrindo a equação, tem-se que

$$\begin{aligned}\phi(m) &= [d^T - m^T L^T][d - Lm] \Rightarrow \\ \phi(m) &= d^T d - d^T Lm - m^T L^T d + m^T L^T Lm\end{aligned}\quad (3.8)$$

Para minimizar a função, deve-se encontrar os pontos nos quais sua derivada seja zero. Assim, derivando a Equação 3.8 e igualando a zero, obtêm-se

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi(m)}{\partial m} &= 0 - L^T d - L^T d = 2L^T Lm = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2L^T Lm = 2L^T d\end{aligned}\quad (3.9)$$

Sendo a multiplicação de matrizes  $L^T L$  inversível, tem-se que

$$\begin{aligned}(L^T L)^{-1} L^T Lm &= (L^T L)^{-1} L^T d \Rightarrow \\ \Rightarrow m &= [L^T L]^{-1} L^T d\end{aligned}\quad (3.10)$$

Por fim, esta é a solução por mínimos quadrados

$$\Delta m = (L^T L)^{-1} L^T \Delta d, \quad (3.11)$$

$$m_{i+1} = m_i + \Delta m \quad (3.12)$$

que soluciona problemas, determinando uma solução cujo erro quadrático seja mínimo. Ela será utilizada ao longo do fluxo de inversão também para calcular o erro do modelo calculado e o modelo real, que gerou os dados observados. Assim também, através da Equação 3.11, a inversão poderá ajustar a solução  $m$  a cada iteração, sempre buscando minimizar o resíduo de acordo com a Equação 3.12.

## 3.5 Fluxo de Inversão Tomográfica

O fluxo de inversão que será adotado é chamado de inversão determinística. Seu foco é minimizar as diferenças entre o tempo observado e o tempo calculado. As rotinas de inversão serão, então, apresentadas com este objetivo (Figura 35).

No capítulo 4, este fluxo será descrito detalhadamente, considerando a inversão dos dados sintéticos e do dado real.

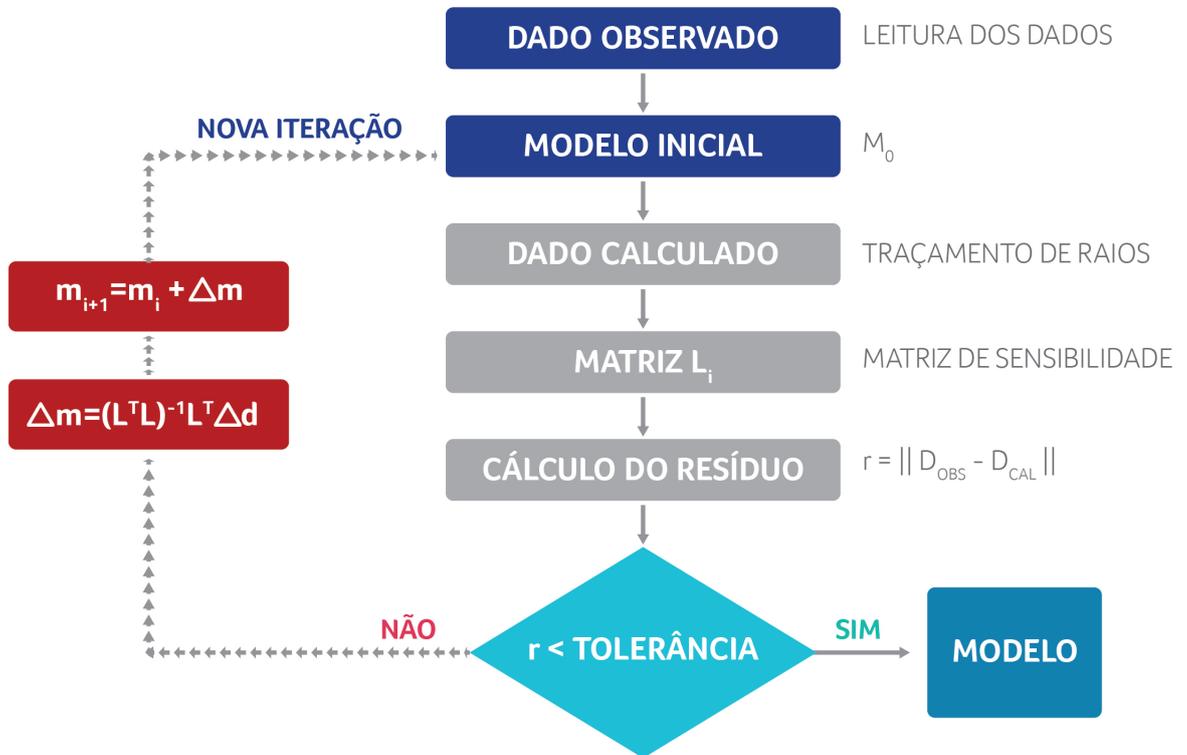


Figura 35 – Fluxo de inversão para um problema não linear.

## 4 Metodologia: métodos e materiais

A primeira parte da metodologia deste trabalho foi elaborada considerando o uso de dados sintéticos de acordo com o fluxo apresentado na Figura 36.



Figura 36 – Fluxo da metodologia para resolução de um problema com um dado sintético.

Primeiramente, faz-se a modelagem de um modelo sintético. Em seguida, define-se a discretização adequada ao modelo para assim escrever a matriz de sensibilidade. A partir dela, tem-se os tempos de trânsito calculados que serão os dados de entrada. Por ser um modelo sintético, estes dados calculados serão considerados dados observados, afinal, foram produzidos a partir do modelo que simula a subsuperfície. A denominação *dados calculados* será aplicada para os dados que serão calculados na etapa de inversão.

A inversão se inicia, então, com a construção do modelo inicial e após as etapas da tomografia, geram-se os dados calculados. Como o objetivo da inversão é minimizar a diferença entre dado calculado e dado observado, observa-se o resíduo

desta diferença. Se o resíduo possuir um valor dentro do que se julgar aceitável para a finalidade do projeto, o processo da inversão do dado termina e exibe o modelo final. Utilizando um modelo sintético, pode-se analisar também o erro. Erro esse que representa o quão diferente é o modelo final do modelo sintético, que simula a subsuperfície. Caso contrário, se o resíduo for acima de um valor de tolerância definido previamente, atualiza-se o modelo inicial e dá-se o início ao método novamente. Outra forma de encerrar o processo iterativo é estabelecer um número máximo de iterações a serem realizadas, evitando entrar em um modo de repetição infinito sem convergir para uma solução. Cutler et al. (1984) indica que o processo deve chegar idealmente a uma solução entre três e cinco iterações. Para o dado sintético, espera-se que o resíduo seja nulo ou tão próximo ao zero, já que tem-se a informação de como seria o modelo da subsuperfície a partir do modelo sintético que foi criado.

A segunda parte da metodologia apresentada faz uso de dados reais adquiridos em um levantamento de campo. Após a aquisição, tem-se os dados observados e o desenvolvimento das mesmas etapas aplicadas para a tomografia em dados sintéticos. Então, as etapas do processo de modelagem e inversão que serão realizadas com dados reais estarão de acordo com o fluxo apresentado na Figura 37.

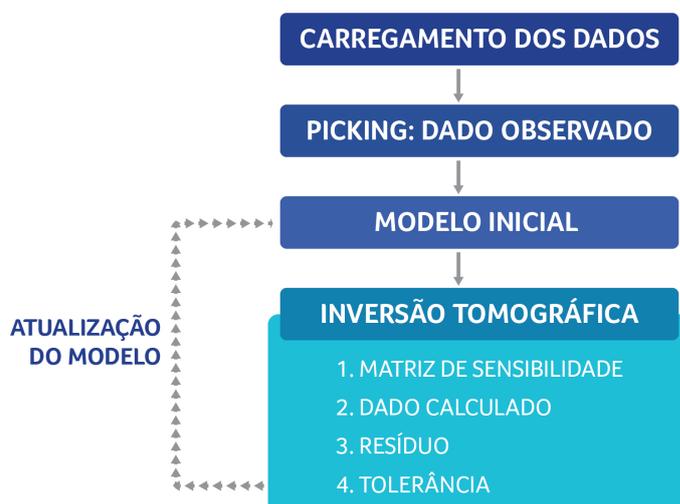


Figura 37 – Fluxo de metodologia para resolução de um problema com um dado real.

## 4.1 Software de Aplicação Prática do Método Sísmico de Refração

As etapas de cada estudo serão detalhadas nas próximas seções e para realizá-las foi utilizada a suíte da *Geometrics Inc., SeisImager/2D<sup>TM</sup>*. É um pacote de refração baseado em uma metodologia de tomografia de tempo de trânsito não linear bastante adequada para os objetivos deste trabalho.

E, para manipular as diferentes etapas do estudo de métodos sísmicos, o software *SeisImager/2D* é dividido em quatro módulos, sendo dois deles voltados apenas para a análise da refração: o *Pickwin<sup>TM</sup>* e o *Plotrefa<sup>TM</sup>* e que foram os módulos utilizados para gerar os resultados desta dissertação.

O módulo *Pickwin<sup>TM</sup>* é utilizado para carregar, processar e interpretar o dado levantado, além de levantar as informações referentes à aquisição em si, como a geometria da aquisição, configurando corretamente a posição da fonte e dos geofones. Sem estas informações, o dado se torna confuso e pode levar a erros ou até impossibilitar a interpretação. No processamento do dado, como descrito na seção 2.3, pode-se aplicar uma série de filtros. Neste trabalho, foi aplicado um filtro de passa baixa com frequência de corte de 1000 Hz na tentativa de melhorar a visualização do dado, retirando frequências indesejadas do sinal.

Já o módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* realiza as etapas da inversão, inclusive gerando modelos sintéticos, modelos iniciais e calculando os tempos de trânsito através do traçamento de raios, além de permitir a inserção da topografia medida no trecho levantado.

Neste módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>*, a modelagem direta, ou problema direto, é realizada através do método de *Shorterst Path Ray* de Moser (1991), descrito na seção 4.3 e a inversão é projetada para reconstruir o modelo a partir de iterações, em uma abordagem não linear de solução por mínimos quadrados. Para a inversão, possuem três técnicas disponíveis a serem aplicadas: inversão *Time-term*, inversão recíproca e a inversão tomográfica, ponto focal do estudo.

Em relação à construção do modelo inicial para a inversão, o *SeisImager/2D* oferece duas possibilidades:

1. Converter e suavizar o resultado de uma inversão *Time-term*.
2. Gerar um modelo através da definição de uma faixa de valores esperados para

velocidade e também, da profundidade da camada mais profunda e número de camadas.

Em ambos os casos, o programa irá gerar a geometria e a distribuição de velocidade para o modelo inicial e caso haja a necessidade, se pode alterar pontualmente alguns parâmetros. Lembrando sempre de trabalhar com um modelo inicial suavizado a fim de não comprometer o método tomográfico.

## 4.2 Dado Sintético

Ao longo desta seção, serão apresentados exemplos de cada etapa da metodologia. Porém, os modelos sintéticos que foram estudados estarão dispostos no próximo capítulo de Resultados.

### 4.2.1 Construção do Modelo Sintético

O modelo sintético é usualmente um modelo de parâmetros definido no início do estudo. Este simula, geralmente de forma mais simplificada, um ambiente real em subsuperfície. Assim, se define um modelo mais simples e no decorrer dos testes com os processos de inversão, estes podem ser modelados mais complexamente e, finalmente, provar a robustez e estabilidade, por exemplo, de um determinado algoritmo.

Em um estudo inicial, utilizando dado sintético com o objetivo de testar e observar os resultados gerados pelo algoritmo desenvolvido pelo software da Geometrics Inc., foi gerado um modelo sintético de camadas plano-paralelas (Figura 38).

### 4.2.2 Escolha do Método de Discretização

Após definido o modelo sintético, opta-se por um dos tipos de discretização mais apropriado ao modelo e que o melhor descreverá. Como o modelo é conhecido, esta etapa é relativamente simples, principalmente ao compararmos esta mesma etapa sendo realizada com dados reais. Na prática, não há informação precisa de qual é o modelo, apenas indicações sobre os processos que formaram a região.

Tendo esta discretização, a matriz de sensibilidade será construída.

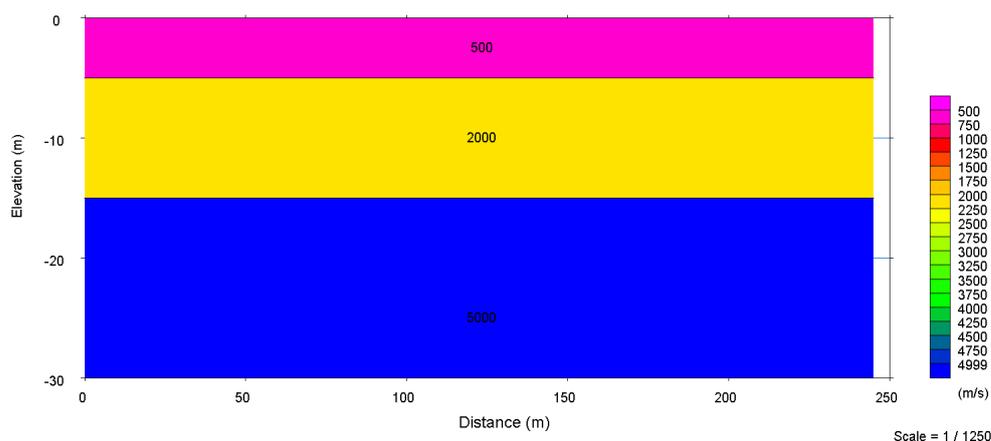


Figura 38 – Modelo sintético simples com três camadas plano-paralelas gerado no módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* do software *SeisImager/2D<sup>TM</sup>* da Geometrics Inc.

Para o dado sintético, construir o modelo sintético e definir a discretização são etapas concomitantes. Constrõe-se o modelo pensando em como descrevê-lo matematicamente e assim, passar para a linguagem de programação ou software. Pode-se também optar por um cenário geológico desejado e posteriormente definir a parametrização mais adequada para o caso. Como no caso de se optar por um modelo aproximado de uma bacia sedimentar com deposição plano paralela e, então, utilizar uma discretização por células regulares.

Para o modelo sintético apresentado na Figura 38, a discretização aplicada foi o de células irregulares. O módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* realiza esta etapa de forma automática, otimizando a discretização para um resultado mais eficiente da inversão.

### 4.2.3 Construção da Matriz de Sensibilidade e Cálculo do Tempo de Trânsito

A matriz de sensibilidade é formada pelo número de raios - número de linhas da matriz - e o número de parâmetros - número de colunas. Para calcular os valores desta matriz, utiliza-se um método de traçado de raio como foi apresentado na seção 4.3 Uma das técnicas é através da solução por diferenças finitas da função *eikonal*.

No módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>*, há o algoritmo de traçado de raios que produz esta

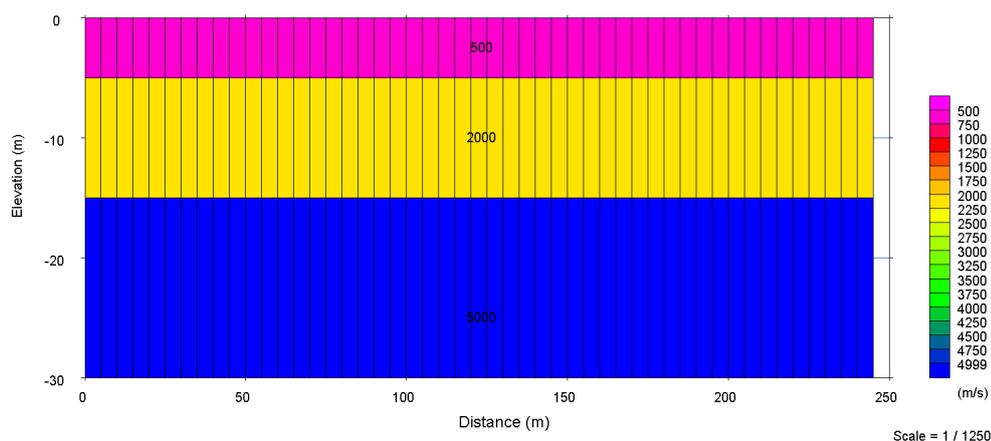


Figura 39 – Modelo sintético discretizado por células irregulares que foi gerado no módulo Plotrefa do software *SeisImager/2D* da Geometrics Inc.

matriz de sensibilidade. Ele utiliza o conceito de *shortpath travelttime* apresentado no trabalho de 1986 de Nakanishi e Yamaguchi (MOSER, 1991) e que também foi apresentado na seção 4.3 deste trabalho. Além disso, é necessário observar como os raios foram traçados (Figura 40), varrendo o modelo, e analisar sua densidade de cobertura. Se uma área do modelo não foi bem coberta, ou seja, a densidade de raios que a percorreu foi baixa ou nula, deve-se esperar que, no resultado da inversão, esta área apresente uma pior solução.

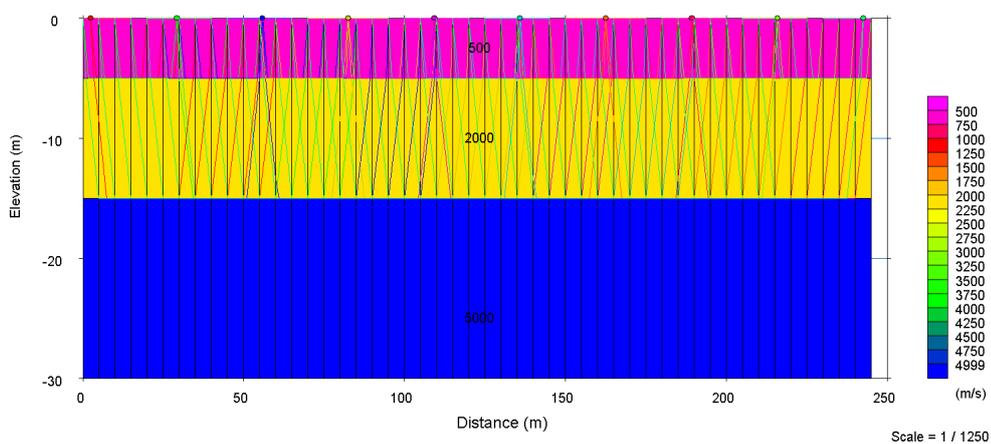


Figura 40 – Modelo sintético gerado no módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* do software *SeisImager/2D<sup>TM</sup>* da Geometrics e os traçados dos raios que produziram os tempos de trânsito calculados.

Após a construção da matriz de sensibilidade e tendo os parâmetros definidos pelo modelo sintético, calculam-se os dados, ou seja, tem-se o problema direto. Seu resultado será os tempos de trânsito ou *traveltimes*.

Para cada tiro da fonte, há o registro do sinal nos diversos receptores espalhados ao longo da linha. No exemplo da figura 41, foram definidos 10 tiros e 50 receptores - ou geofones - com intervalo de cinco metros entre cada um.

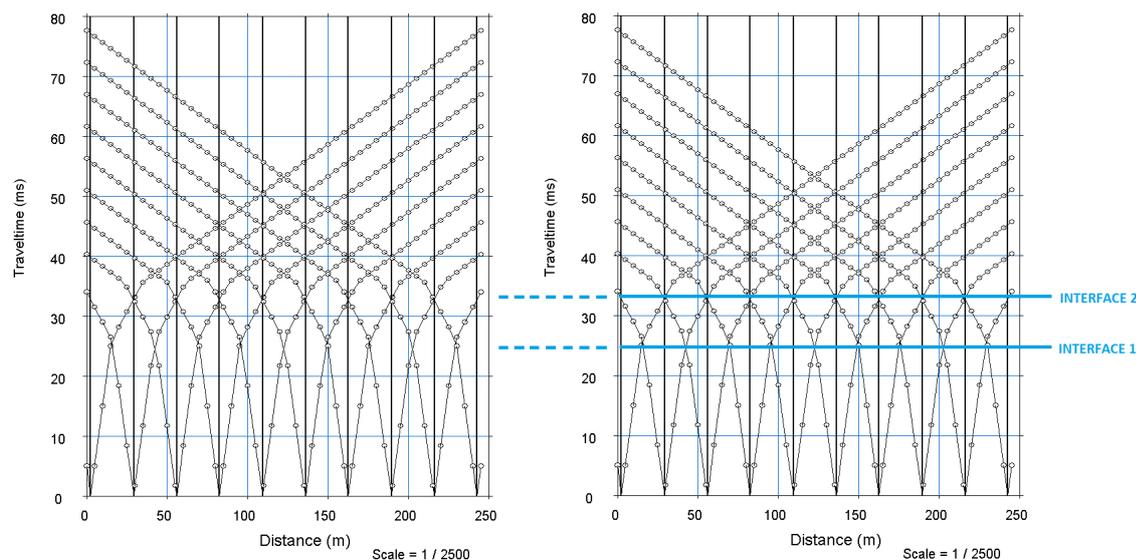


Figura 41 – Gráfico Tempo de trânsito *versus* Distância, gerado após o traçado de raios sobre um modelo sintético de três camadas. É possível realizar uma interpretação inicial, demarcando as possíveis interfaces, onde há mudança de derivada na curva. Em um dado sintético, esta tarefa é bastante simples.

Em gráficos relacionando distância (em metros) com o tempo de trânsito (em milissegundos) como o apresentado na Figura 41, pode-se observar os pontos onde a inclinação das curvas representativas de cada tiro mudam de derivada. E em uma relação de distância *versus* tempo, a derivada da curva é a velocidade ou, sua inversa, a vagarosidade. Ou seja, ao notar uma mudança de inclinação ou uma quebra na curva, define-se que há uma mudança na velocidade e assim, infere-se que há uma mudança de camada na subsuperfície. Se esta perturbação na curva do tiro for abrupta, é que houve uma significativa mudança de velocidade. Analisar gráficos deste tipo possibilita uma interpretação inicial do dado e podem sugerir um modelo aproximado do que se espera obter como solução da inversão. Como

visto no capítulo 2, esta abordagem interpretativa é aplicada no método de inversão *Time-Term*. Em um dos testes realizados neste trabalho, o resultado da inversão *Time-term* foi utilizado como modelo inicial para a inversão tomográfica.

#### 4.2.4 Inversão Tomográfica

O tempo de trânsito calculado na etapa anterior é, então, utilizado para simular um fluxo de inversão tomográfica. Durante esta simulação, deve-se imaginar que o modelo que gerou os dados de tempo é desconhecido. Assim, a rotina de inversão será composta pelas seguintes fases:

1. Modelo inicial: construção de um modelo base para iniciar o processo iterativo.

O módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* apresenta dois meios de construir um modelo inicial: modelo de camadas plano-paralelas ou através de atribuição de camadas, utilizando o algoritmo de inversão *Time-term* já mencionado aqui neste texto. Neste algoritmo, analisa-se o dado de tempo de trânsito em função da distância, define-se os pontos onde há mudança de velocidade em cada tiro, observando o gráfico Tempo *versus* Distância —em inglês, *layer assignment*—, e gera um modelo (Figura 42).

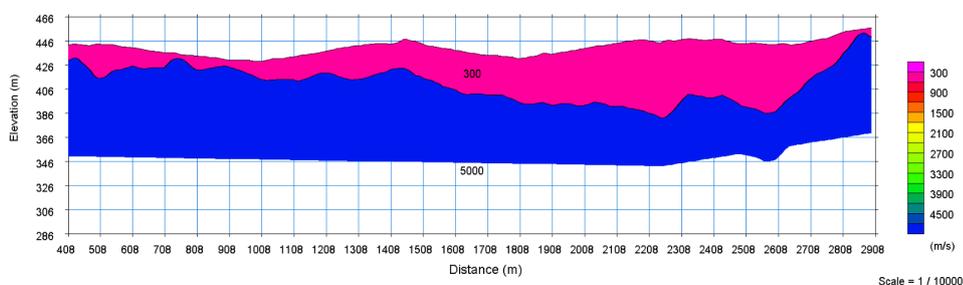


Figura 42 – Exemplo de modelo gerado pela inversão *Time-term* no módulo *Plotrefa* do software *SeisImager/2D* da Geometrics.

No entanto, como visto anteriormente, a tomografia não possui resultados satisfatórios quando trabalha a partir de camadas com velocidades muito contrastantes. Então, aplica-se uma suavização ao modelo gerado e ao final desta tarefa, este será o modelo inicial utilizado pela inversão tomográfica.

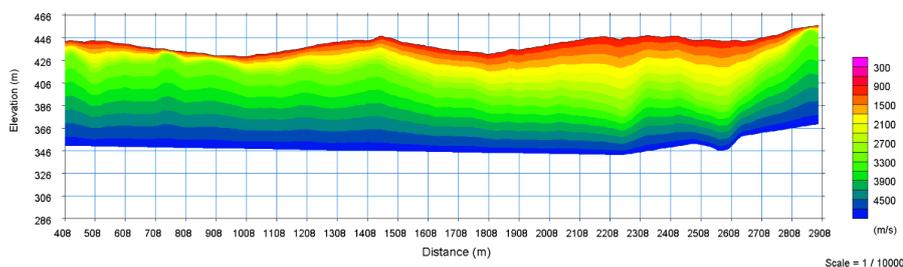


Figura 43 – Exemplo de modelo inicial gerado após a suavização do modelo resultado da inversão *Time-term*.

Uma especificidade do algoritmo aplicado pelo módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* da Geometrics Inc. é que os modelos iniciais devem possuir no mínimo 10 camadas.

2. Construção da matriz de sensibilidade: define-se uma discretização que supostamente é mais adequada à área de estudo (e é adequada para o modelo inicial proposto) e aplica-se a técnica de traçado de raio.

Como visto anteriormente, o software utilizado define automaticamente um conjunto de células irregularmente espaçadas e, em seguida, aplica a rotina de *Shortest Path Ray* para traçar os raios.

3. Dado calculado: calcula-se o problema direto para obter os tempos de trânsito.

Estes tempos de trânsito calculados são apresentados juntos aos tempos de trânsito observados e analisados em forma de gráfico relacionando tempo *versus* distância.

Quanto mais próximas as curvas calculadas forem das observadas, mais o modelo inicial representa a realidade em subsuperfície (Figura 44).

4. Resíduo = Dado calculado - Dado observado: O resíduo é frequentemente utilizado para medir as diferenças entre valores previstos por um modelo e valores observados. Na tomografia, é calculado para analisar se a inversão foi realizada satisfatoriamente e se o modelo inicial sugerido está próximo o suficiente do modelo real para que a inversão tenha uma solução única. Caso o resíduo não esteja dentro dos limites toleráveis, o algoritmo irá atualizar o modelo (antes inicial) e recomeçar a partir do item 2. Se for aceitável, tem-se a solução do problema.

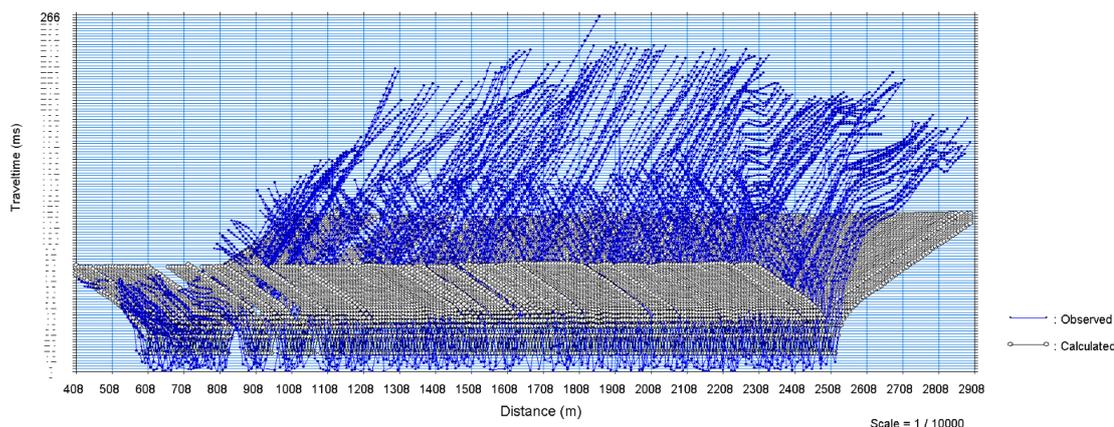


Figura 44 – Gráfico Tempo *versus* Distância: uma comparação entre o dado calculado e do observado. O dado em azul é o dado observado e o cinza é dado calculado. Neste caso, o RMS foi alto: 57,872509. Os dados observados e calculados são muito destoantes.

Ao final da inversão, após certo número de iterações, tem-se o erro RMS que representa o quão diferente é o modelo final da inversão do modelo real —ou modelo sintético —que gerou os dados observados.

Estas fases estão de acordo com o fluxo apresentado no capítulo anterior. E, no caso de a matriz de sensibilidade  $L$  possuir alguma deficiência e que interrompa o processo de inversão, uma fase extra deve ser adicionada ao fluxo, a técnica de regularização, que foi brevemente comentada na seção 1.3 deste trabalho.

## 4.3 Dado Real

Para demonstrar a metodologia aplicada a um dado real, serão apresentadas as etapas que foram realizadas na prática sobre um dado adquirido durante um levantamento de sísmica de reflexão e que será melhor detalhado no capítulo 5, durante a apresentação dos resultados.

### 4.3.1 Carregamento dos Dados

A aquisição com o equipamento da Geometrics Inc. gerou arquivos no formato *seg-y*. No entanto, o software *SeisImager/2D<sup>TM</sup>* apenas carrega o dado no formato

*seg* – 2. Foi necessário, então, realizar a conversão do dado antes de iniciar a interpretação.

### 4.3.2 *Picking*: Tempo de Trânsito de Primeiras Chegadas

Após o carregamento dos dados, busca-se obter os tempos de trânsito das primeiras chegadas, os chamados *first break travelttime*. É através desta ação de *Picking* que será escrita a matriz de dados observados. Estes dados possuem grande relevância já que é dali que se extrairá informações sobre a subsuperfície. Portanto, deve ser realizada com bastante atenção.

Consiste na observação dos traços e marcação de pontos no momento que houve o primeiro registro de sinal no receptor (Figura 45). Geralmente é executada nos sismogramas ordenados por famílias de tiro comum — *common shot gathers*. É uma das etapas que demanda maior tempo de execução e por isso, muitos algoritmos são desenvolvidos para otimizá-la e torná-la cada vez mais automática. Isto só é possível pela característica da refração de ser o primeiro evento no traço sísmico, a partir de um determinado *offset*. Este *offset* específico é o que está sendo chamando nesta dissertação de *x crítico*. Pode ser referenciado também como a distância de *crossover*.

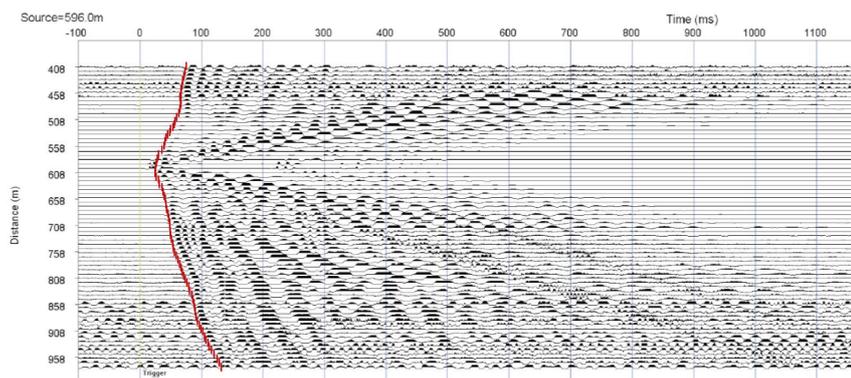


Figura 45 – Exemplo de *picking* no *software* da Geometrics Inc.: linha vermelha marcando as primeiras quebras no traço do dado.

### 4.3.3 Construção do Modelo Inicial

Como visto nos processos realizados para o teste com o dado sintético, a inversão requer a proposição de um modelo inicial. É interessante que este modelo  $m_0$  seja coerente e o mais próximo possível da solução para que a inversão tenha convergência à um mínimo global. Caso a suposição inicial não seja adequada, a inversão pode chegar a um mínimo local, gerando um resultado distante do real.

Um dos modelos iniciais desenhados para testar o algoritmo com o dado real foi o de camadas plano-paralelas (Figura 46). No capítulo 5, será apresentado também o resultado da inversão tendo como modelo inicial um modelo gerado pela inversão *Time-term*.

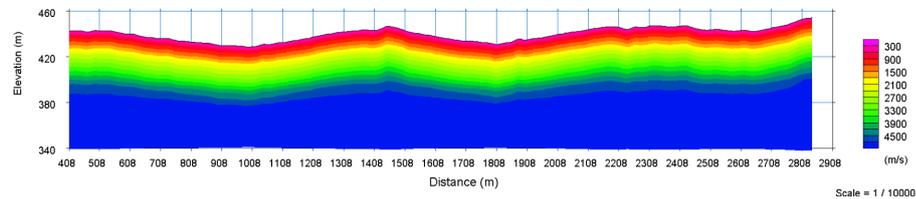


Figura 46 – Exemplo de modelo inicial de camadas plano-paralelas desenhado com o módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* da Geometrics Inc.

### 4.3.4 Inversão Tomográfica

Seguindo a mesma metodologia de inversão determinística aplicada ao dado sintético, a inversão do dado real terá o dificultador de ter apenas suspeitas do modelo verdadeiro. Um exemplo de um modelo gerado após a inversão, tendo como modelo inicial, um modelo de camadas plano-paralelas e tendo como dados de entrada, dados reais observados, é mostrado na Figura 47.

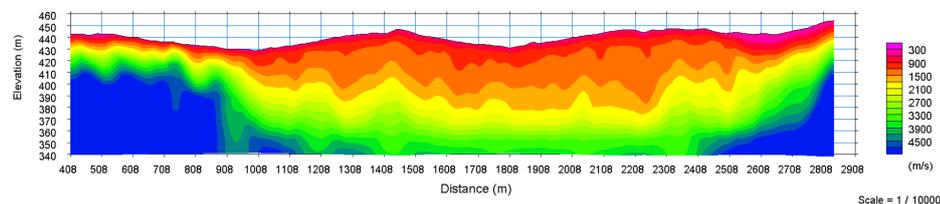


Figura 47 – Exemplo de um modelo invertido com o módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* da Geometrics Inc. a partir do modelo inicial de camadas plano-paralelas.

## 5 Resultados

### 5.1 Dado Sintético

Neste trabalho foram feitos testes usando quatro modelos sintéticos com ligeira diferença entre si, cuja geometria em subsuperfície é semelhante a situações comuns na natureza. O objetivo foi o de avaliar a resposta do software desenvolvido pela Geometrics Inc. para situações tais como: camadas plano-paralelas falhadas, camadas simplesmente plano-paralelas e camadas inclinadas. Nas próximas seções serão, então, detalhadamente relatados os resultados da inversão tomográfica destes modelos hipotéticos. As razões que conduziram à proposição de cada um deles, a adoção do modelo de referência (modelo inicial de velocidades) e de outros parâmetros, por exemplo, serão aqui colocados.

Nota-se que cada uma das situações sintéticas propostas visou atingir algum ponto relacionado com a região de onde o dado real foi adquirido. Há, por exemplo, um modelo que simula a presença de uma falha em subsuperfície e espera-se observar o comportamento do algoritmo aplicado à este tipo de situação.

#### 5.1.1 Modelo 1: Camadas Plano-Paralelas

Inicialmente, foi elaborado um modelo sintético simples de camadas plano-paralelas. Como primeiro teste, se gostaria de observar qual o comportamento do algoritmo diante de um modelo bastante básico e que não deveria provocar dificuldades para se chegar a solução do problema, portanto, sem nenhum problema de estabilidade no método.

**Modelo Sintético** Usando o módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>*, o modelo sintético foi construído de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1, gerando uma seção de 1000 m e comprimento de 60 m de profundidade, com três camadas. Para cada camada, foi aplicada um valor de velocidade constante, indo de 500 m/s para a camada mais rasa até 5000 m/s, camada mais profunda.

Modelo Sintético 1	
Intervalo entre receptores	10 m
Número de receptores	100
Número de tiros	5
Número de camadas	3

Tabela 1 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo sintético 1.

O modelo sintético fica graficamente ilustrado como na Figura 48.

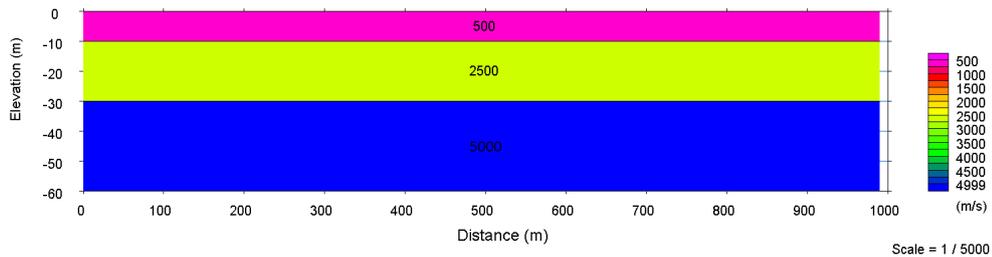


Figura 48 – Modelo 1: modelo sintético de camadas plano-paralelas.

E para gerar os dados que serão considerados "observados", aplica-se a rotina de traçado de raios disponível no software aqui utilizado. Esta rotina irá gerar o dado que pode ser observado no gráfico de Tempo de trânsito *versus* Distância na Figura 49 à direita.

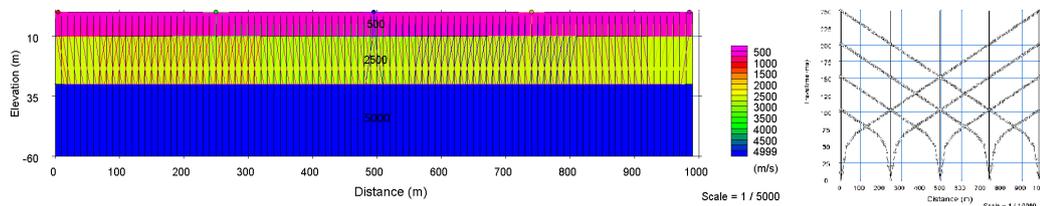


Figura 49 – À esquerda, tem-se o modelo sintético de camadas plano-paralelas e o traçado de raios que gerou o dado "observado" de tempo de trânsito; à direita, o gráfico com estes tempos de trânsito dispostos em famílias de tiros.

**Modelo Inicial** Para propiciar uma inversão simplificada, o modelo inicial foi adequadamente construído para ser fiel ao modelo sintético. Como o módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* permite apenas criar modelos iniciais com no mínimo dez camadas, utilizou-se esta restrição. Assim, o modelo inicial foi desenhado de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 2

Modelo Inicial 1	
Profundidade do topo de camada mais profunda	30 m
Velocidade mínima	500 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/2
Número de camadas	10
Profundidade total do modelo	E: -60 m   D: -60 m

Tabela 2 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para o modelo sintético 1.

Tem-se, então, o modelo inicial (Figura 50) para o modelo sintético 1.

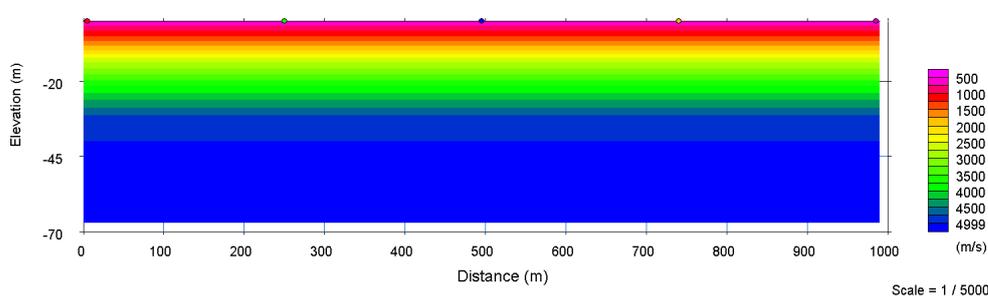


Figura 50 – Modelo inicial criado a partir da determinação de camadas plano paralelas e velocidades crescentes em relação à profundidade.

**Parâmetros da Inversão** Para iniciar os testes com a inversão tomográfica, foi estabelecido que os parâmetros a serem variados seriam:

1. Número de iterações: pois, usualmente, espera-se chegar mais próximo da solução quanto mais vezes o processo for realizado. A partir de outros estudos, observa-se que isto nem sempre ocorre. Além disso, quanto menor for o número de iterações para se chegar a uma solução tolerável, menor o tempo e custo computacional. (CUTLER et al., 1984) apresenta o número de três e cinco iterações como um número interessante de iterações e Martins e Knapp (1993) cita que o algoritmo deve chegar à uma solução satisfatória com dez iterações. Portanto, foram feitas inversões com três, cinco e dez iterações. Uma observação a ser feita é que o *Plotrefa<sup>TM</sup>* apenas possui este mecanismo de número de iterações para interromper o processo de inversão. Em geral, há a possibilidade de se estabelecer um valor de tolerância, por exemplo, para o erro RMS, ao final de cada iteração.

2. Número de nós: o método *Shortest Path Ray* aplicado pelo programa utilizado leva em consideração, como visto na seção 4.3, o número de nós no entorno de cada célula de discretização. Por padrão, o *Plotrefa<sup>TM</sup>* define nós em cada vértice da célula retangular e o número de nós variável é a quantidade de nós presente em cada aresta. Ao variar este parâmetro, procura-se observar o efeito do aumento da densidade de caminhos possíveis para o raio percorrer e, assim, teoricamente, alcançar o menor tempo de trânsito, de acordo com o Princípio de Fermat. Optou-se, então, por variar entre três e seis nós em cada aresta, evitando onerar exageradamente o tempo computacional do processo.

A seguir, observam-se os valores obtidos ao final de seis inversões e a configuração que apresentou melhor resultado está assinalada em verde (Tabela 3)

Inversão Modelo Sintético 1						
Inversões	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>
Iterações	5	3	5	3	10	10
Número de nós	3	3	6	6	3	6
Velocidade Mínima (m/s)	500	500	500	500	500	500
Velocidade Máxima (m/s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000
RMS (ms)	1,358078	5,878255	1,415628	5,956585	1,070567	1,117764

Tabela 3 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do modelo sintético 1.

**Resultados do Modelo 1** A Figura 51 foi o resultado obtido a partir da inversão. Com um erro médio de 1,07 ms, a quinta inversão foi a que melhor se aproximou do dado sintético. Pode-se ver que aumentar o número de nós e diminuir o número de iterações prejudicou o resultado da inversão, sendo dez iterações e três nós, os parâmetros a serem utilizados nos próximos modelos.

No contexto geral, nota-se que a solução manteve a tendência de camada plano-paralelas do modelo sintético, mantendo uma boa distribuição de valores de velocidade. Percebe-se que, onde os tiros foram realizados, houve uma sutil diminuição da profundidade das camadas mais velozes. Isto ocorre talvez pela geometria de aquisição e, assim, pelo traçado de raios que cobriu o meio, como observado na Figura 52.

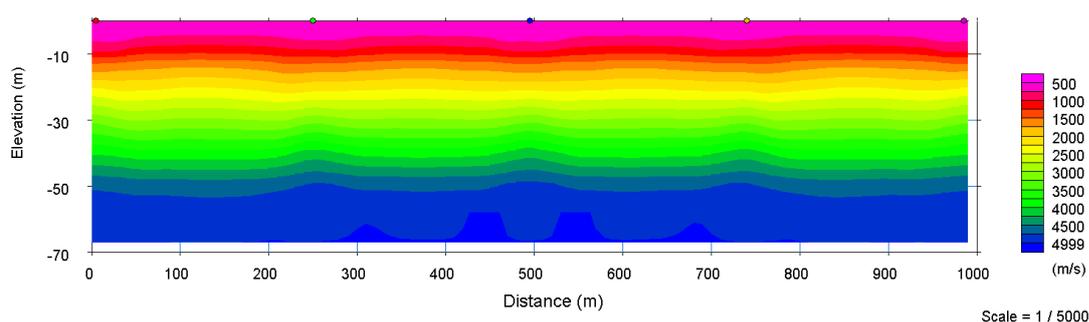


Figura 51 – Modelo 1 invertido.

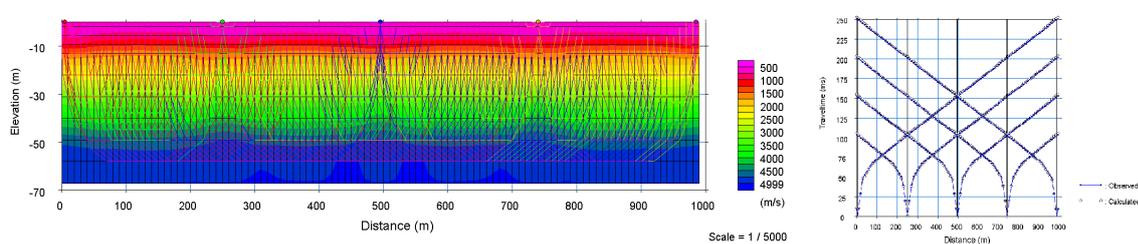


Figura 52 – Traçado de raios que varreu o modelo e gerou o modelo invertido. À direita, o gráfico de Tempo de trânsito *versus* Distância.

### 5.1.2 Modelo 2: Interface Inclinada com Camadas Plano-paralelas

O objetivo com este modelo 2 foi de observar o comportamento do algoritmo frente à uma camada inclinada mais profunda e com valor de velocidade alto. Situação esta muito comum em bacias, onde na natureza apresentam-se camadas mergulhantes tanto para uma geometria simétrica, quanto para uma geometria assimétrica como neste modelo 2.

**Modelo Sintético** Foi gerado considerando os seguintes parâmetros (Tabela 4):

Modelo Sintético 2	
Intervalo entre receptores	10 m
Número de receptores	100
Número de tiros	5
Número de camadas	4

Tabela 4 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo sintético 2.

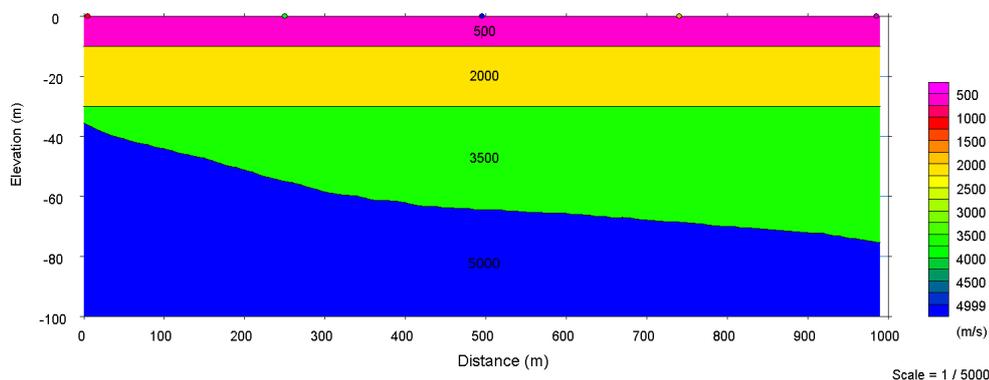


Figura 53 – Modelo 2: modelo sintético de camadas plano-paralelas e uma interface inclinada.

**Modelo Inicial e Parâmetros da Inversão** Foram fornecidos os valores encontrado nas Tabelas 5 e 6.

Modelo Inicial 2	
Profundidade do topo de camada mais profunda	30 m
Velocidade mínima	500 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
Número de camadas	10
Profundidade total do modelo	E: -100 m   D: -100 m

Tabela 5 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para o modelo sintético 2.

Inversão Modelo Sintético 2	
Iterações	10
Número de nós	3
Velocidade Mínima	500 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
RMS	1,083280 ms

Tabela 6 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do modelo sintético 2.

**Resultados do Modelo 2** Ao analisar o resultado da inversão, nota-se que houve a sensibilidade do algoritmo em relação à camada inclinada. No entanto, essa alteração no modelo não se faz tão presente no modelo invertido.

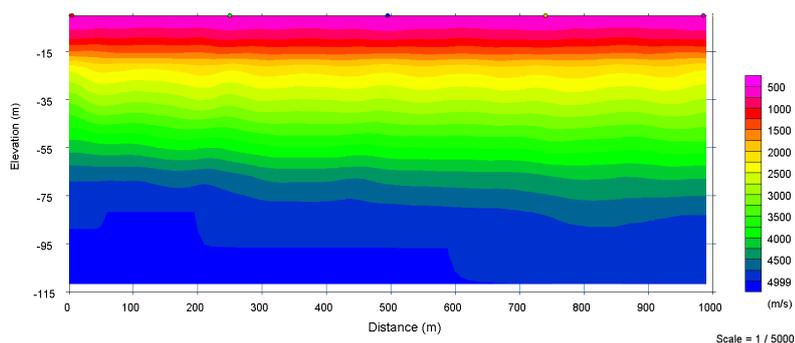


Figura 54 – Modelo sintético 2 invertido.

### 5.1.3 Modelo 3: Camadas Falhadas

Como comentado anteriormente, os modelos hipotéticos aqui apresentados estão relacionados com estruturas encontradas na natureza e que também estão ligadas ao ambiente que gerou os dados reais analisados na seção 6.2. No local do levantamento real, há a presença de sistemas de falhas sintéticas e antitéticas. Então, é interessante estudar como o algoritmo empregado lida com situações deste tipo.

**Modelo Sintético** Possui uma falha abrupta com rejeito de cerca de 10 metros e recoberta por uma camada de material intemperizado, com velocidade consideravelmente menor do que o restante do modelo (Figura 55).

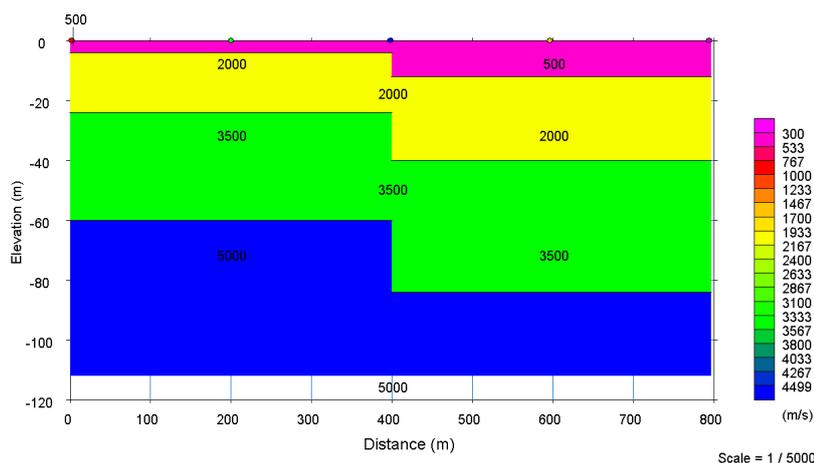


Figura 55 – Modelo 3: modelo sintético de camadas plano-paralelas falhadas.

### Resultado do Modelo e os Parâmetros do Modelo Inicial e da Inversão

O modelo inicial foi uma seção de camadas plano-paralelas de acordo com os parâmetros definidos, que podem ser vistos nas Tabelas abaixo, assim como o modelo final (Figura 56).

Modelo Inicial 3		Inversão Modelo Sintético 3	
Profundidade do topo de camada mais profunda	30 m	Iterações	10
Velocidade mínima	500 m/s	Número de nós	3
Velocidade Máxima	5000 m/s	Velocidade Mínima	500 m/s
Número de camadas	10	Velocidade Máxima	5000 m/s
Profundidade total do modelo	E: -115 m   D: -115 m	RMS	1,379385 ms

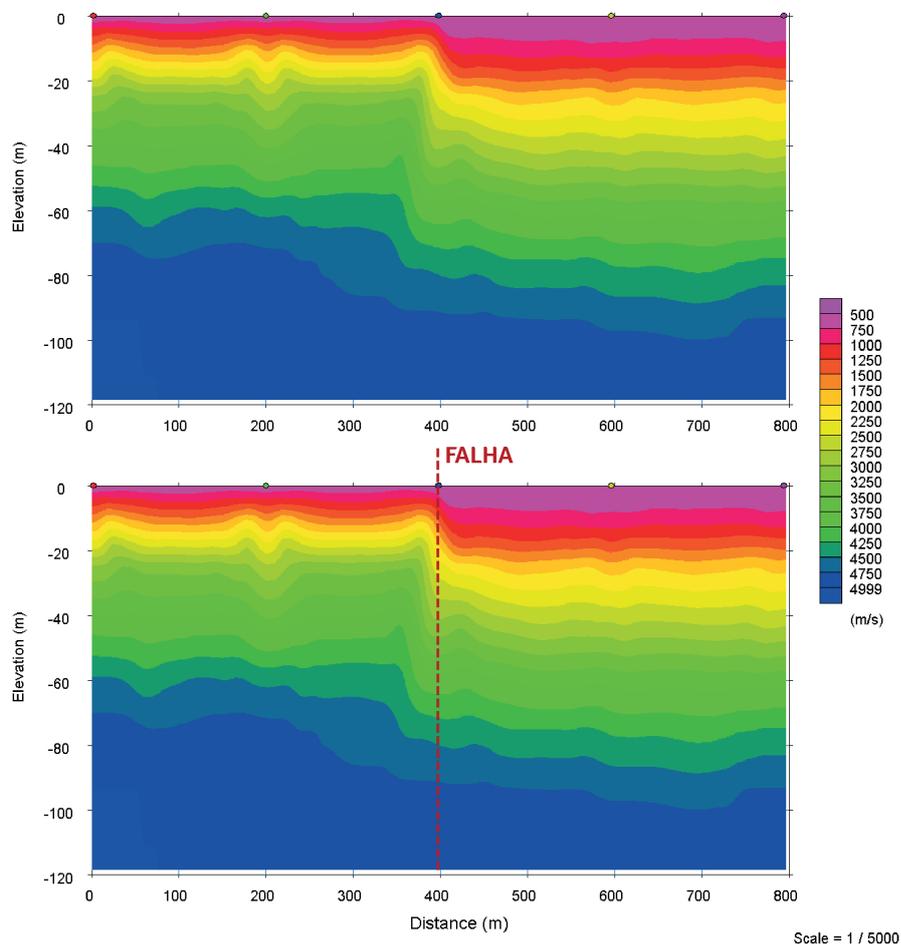


Figura 56 – Modelo 3 invertido. Embaixo, a marcação da posição da falha projetada no modelo sintético.

O algoritmo foi consideravelmente eficiente ao trabalhar com uma geometria semelhante às falhas geológicas. Ao analisar o caso real, ficou-se atento, então, à presença de alguma alteração do modelo de velocidade semelhante à este modelo sintético.

#### 5.1.4 Modelo 4: Bacia Sedimentar em Forma de Gráben

**Modelo Sintético** Assim como no caso do modelo com camadas falhadas, este modelo em forma de gráben foi esquematizado para que o algoritmo fosse testado diante de uma estrutura em subsuperfície semelhante ao que se esperava para o local onde foi adquirido o dado real.

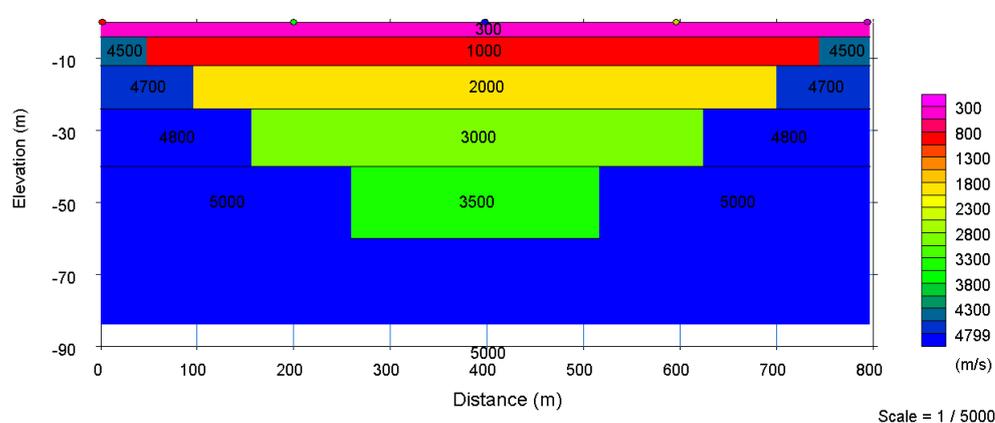


Figura 57 – Modelo 4: modelo sintético de camadas plano-paralelas e falhadas, gerando um gráben.

**Modelo Inicial e Parâmetros da Inversão** Foram estabelecidos como nas Tabela 7 e 8, sendo o modelo inicial também em camadas plano-paralelas.

Modelo Inicial 4	
Profundidade do topo de camada mais profunda	30 m
Velocidade mínima	300 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
Número de camadas	10
Profundidade total do modelo	E: -85 m   D: -85 m

Tabela 7 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para o modelo sintético 4.

Inversão Modelo Sintético 4	
Iterações	10
Número de nós	3
Velocidade Mínima	300 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
RMS	1,288882 ms

Tabela 8 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do modelo sintético 4.

**Resultados do Modelo 4** A estrutura observada na Figura 58 foi bastante satisfatória, mantendo a tendência de maior espessura no centro e um afinamento progressivo em direção às laterais.

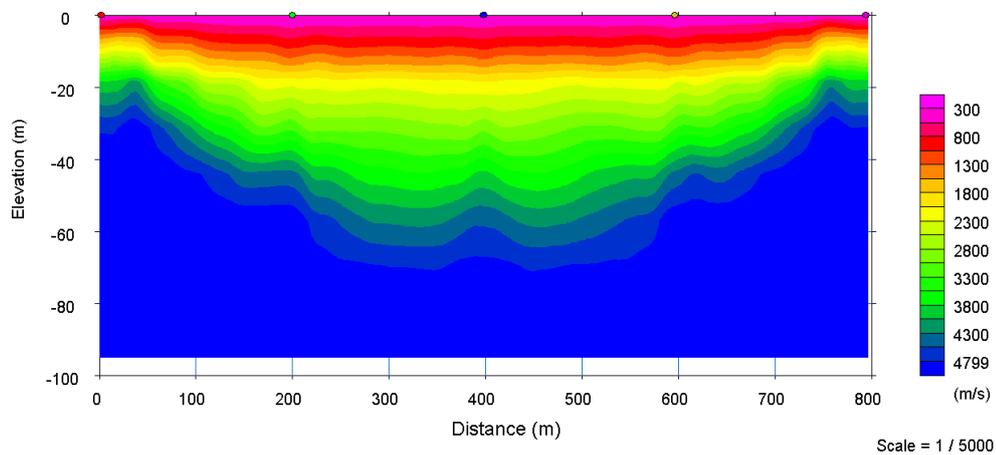


Figura 58 – Modelo 4 invertido.

### 5.1.5 Conclusão: Dados Sintéticos

Após os testes com modelos sintéticos, pode-se concluir que os modelos invertidos reproduzem a geometria do modelo sintético com certa proximidade. Tanto a profundidade quanto as velocidades foram relativamente resolvidas e recuperadas pelo modelo invertido. Mesmo em modelos com certa complexidade, como o caso do Modelo 3, o método foi eficiente dentro do propósito deste trabalho. Nota-se também que o método da Tomografia introduz um gradiente de velocidade em regiões do modelo, onde havia uma passagem brusca de uma velocidade para outra.

Isto pode ser resultado da formulação do Modelo Inicial que requer um modelo suavizado.

Também foi visto que, em todos os modelos, as interfaces não foram definidas com precisão, porém há indícios suficientes para auxiliar em uma eventual interpretação de dado real. Assim, foram esses indícios que guiaram a análise da tomografia de refração no dado real apresentado na próxima seção.

## 5.2 Dado Real

Após a validação, através dos modelos sintéticos, do algoritmo utilizado pelo módulo *Plotrefa<sup>TM</sup>* da *Geometrics Inc.* e a observação do comportamento do método da tomografia sísmica de raios criticamente refratados, é interessante observar como a técnica se aplica à um dado real. Como visto anteriormente, a diferença entre o fluxo da tomografia para um dado sintético e para um dado real é a eliminação da etapa de criação do modelo sintético e do cálculo dos tempos de trânsito que seriam considerados "observados" e a inclusão do levantamento real de campo, que fornece os sismogramas e permite a interpretação do dado para obter os tempos de trânsito. Neste caso, serão realmente os dados observados.

Portanto, nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir da inversão de um dado obtido em um trecho de levantamento de sísmica de reflexão. A partir desta aquisição, os dados de refração foram aproveitados e, assim, aplicados neste trabalho. Esta etapa da inversão foi orientada pelas informações obtidas na seção anterior de Dado Sintético.

Antes, no entanto, faz-se necessária uma breve descrição do local de estudo e do contexto geológico no qual está inserido.

### 5.2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada a noroeste do estado do Rio de Janeiro e à sudeste do município de Volta Redonda (RJ), distante cerca de 130 km da capital fluminense. É acessada através da Rodovia Presidente Dutra, continuando até a entrada para a Rodovia dos Metalúrgicos. A área de estudo se encontra, então, na saída para a Rodovia do Contorno, no bairro Brasilândia em Volta Redonda.

Situa-se em uma área na Bacia de Volta Redonda, no vale do Rio Paraíba do Sul e que é geomorfologicamente definida como colinosa, apresentando altitudes entre 440 m e 460 m. O levantamento realizado para adquirir os dados utilizados neste trabalho está inserido no polígono de coordenadas abrangendo da latitude  $22^{\circ} 30' 12,0852''$  S a  $22^{\circ} 30' 50,4''$  S e longitudes de  $44^{\circ} 02' 53,5596''$  O até  $44^{\circ} 3' 0,594''$  O (Figura 59). Este local é denominado Gráben Casa de Pedra, inserido no sistema de *horst*, grábens e hemigrabens que caracterizam estruturalmente a região.

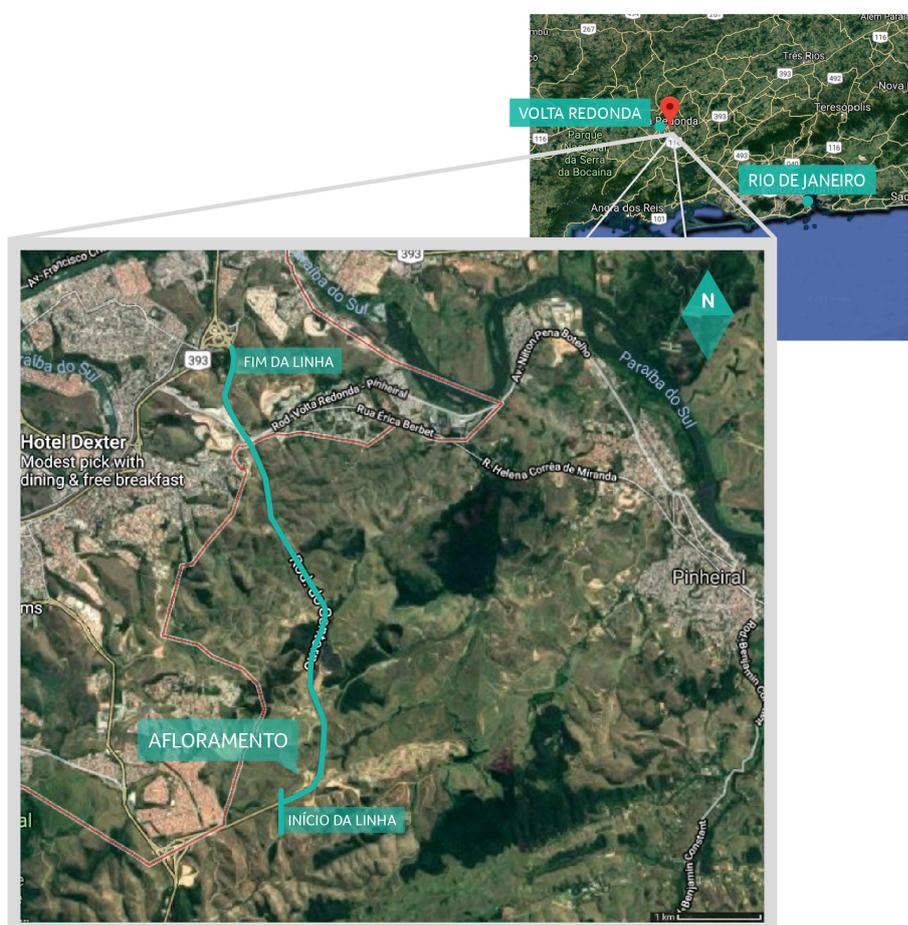


Figura 59 – Mapa da região do Gráben de Casa de Pedra e marcação da linha percorrida pelo levantamento de sísmica multicanal.

### 5.2.1.1 Contexto Geológico Estrutural

Com a colisão e a abertura do Gondwana, um supercontinente que continha as porções territoriais que viriam a ser Brasil e África, uma sequência de esforços distensivos e compressivos produziram uma faixa do continente sulamericano denominada Rife Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB) (RICCOMINI; SANT'ANNA; FERRARI, 2004). O RCSB é estruturalmente considerado como uma série de *horsts*, grábens e hemigrábens. Devido ao alto grau de complexidade de sua formação, teorias são apresentadas para discutir os eventos que produziram as estruturas presentes no RCSB. Inserida neste contexto, a região onde foi realizado o levantamento utilizado para o estudo da técnica de tomografia de refração, o Gráben Casa de Pedra, possui questionamentos quanto à sua diagênese e seu arcabouço estrutural.

A área é alvo de extensos estudos geológicos, com uma vasta bibliografia publicada, porém ainda com algumas hipóteses a serem discutidas. Por exemplo, para Negrão (2014), há a expectativa de que a subsuperfície possua sua estrutura como um hemigráben. E, apesar da extensão nos estudos geológicos na região, pesquisas geofísicas não haviam ainda sido satisfatoriamente aplicadas a fim de colaborar com a discussão levantada. As análises, então, ficaram limitadas aos dados geológicos.

Hoje, estão sendo realizados estudos geofísicos na região e campanhas de aquisição de dados já foram realizadas. Dados como de gravimetria e magnetometria foram adquiridos, além de dados de sísmica de reflexão e refração. Assim, como parte destas pesquisas, a tomografia de refração foi aplicada no dado de sísmica de refração adquirido em campo e é considerado um dos métodos geofísicos que podem contribuir e proporcionar resultados às questões objetivo. Buscou-se especificamente com a tomografia de refração orientar discussões à respeito do embasamento da área estudada. Esta é uma estrutura bastante densa e, em teoria, se destacaria por sua alta velocidade em relação ao pacote sedimentar que a recobre. No entanto, como citado anteriormente, é um método onde sua eficiência está relacionada à parte rasa da subsuperfície.

Portanto, neste trabalho, buscou-se entender a técnica tomográfica, observar suas especificações, desafios e limitações e finalmente, como objetivo secundário contribuir com as informações da subsuperfície e fornecer subsídios para a definição

do modelo mais adequado para o embasamento da região, destacando as prováveis localizações dos altos estruturais do Gráben de Casa de Pedra na Bacia de Volta Redonda.

**O Gráben Casa de Pedra** está inserido na Bacia de Volta Redonda *strictu sensu* e é o maior e mais importante depocentro desta região por seu registro sedimentar e vulcânico. É descrito como uma depressão tectônica de direção NE, desenvolvida entre as localidades de Casa de Pedra e Pinheiral, com cerca de 10  $km^2$  de área. Segundo Riccomini, Sant'Anna e Ferrari (2004), nesta localidade encontram-se sedimentos cenozóicos bem preservados com espessura de cerca de 100 m. Estes depósitos são caracterizados por arenitos lamosos, conglomerados finos a médios e lentes de argilitos, relacionados a sistemas fluviais entrelaçados (NEGRÃO, 2014). Estudos geológicos de Melo Mário Sérgio e Riccomini (1985) apontam para duas principais associações de fácies sedimentares e que também caracterizam a Bacia de Volta Redonda (NEGRÃO, 2014). São elas:

1. Associação de fácies com granulometria heterogênea típica de ambiente fluvial entrelaçado.
2. Associação de fácies típica de ambientes de leques aluviais.

Portanto, os estudos apontam para um ambiente fluvial, o que poderá influenciar na propagação das ondas sísmicas em subsuperfície. Em ambientes heterogêneos, a onda sofrerá difração e se dispersará facilmente.

Como visto, em relação ao arcabouço estrutural, há ainda a discussão de hipóteses que apresentam diferentes características gerais do embasamento do Gráben de Casa de Pedra. De acordo com a interpretação de Negrão (2014), Casa de Pedra teria a geometria de hemigráben, ou seja, uma de suas bordas apresentaria uma maior espessura sedimentar ou, equivalentemente, uma maior profundidade do topo do embasamento. Seus limites estariam à norte e à sul por conjuntos de falhas normais e flexural, e à leste e à oeste por altos estruturais em zonas de transferência. Para este resultado levantado por Negrão (2014), a borda sul seria recoberta pelo maior pacote sedimentar da região estudada, de cerca de 170 m, e sua espessura sofreria um afinamento em direção à borda norte.

## 5.3 Aquisição dos Dados

A aquisição dos dados foi projetada para um levantamento de reflexão e a partir dela foram aproveitados os dados de refração. Portanto, o levantamento foi superdimensionado para um estudo de refração. Caso o objetivo fosse apenas o estudo do fenômeno da refração, haveria a possibilidade de realizar a aquisição com menos geofones e cobrindo uma extensão maior, reduzindo custos, tempo de levantamento e aumentando a eficiência do método.

**Equipamentos** Os equipamentos utilizados para a aquisição dos dados foram fornecidos pela empresa Geometrics Inc. e consistiam em um sismógrafo modelo Geode com 24 canais e uma bateria de 12 V —para gravação dos dados—, uma série de geofones —receptores terrestres do sinal— com 4,5 Hz, além de cabos como o cabo *trigger* —que aponta para o sistema o início do registro do dado— e cabo de *spread* —que liga os geofones ao sismógrafo. Como fonte, foi utilizado um martelo de cerca de dez quilos com um gatilho para gerar uma aceleração e impactar a chapa metálica posicionada no solo. O sistema da fonte é acoplado em um veículo e a cada tiro, posiciona-se a chapa logo abaixo para, assim, produzir as ondas mecânicas que serão captadas pelos receptores. Uma observação feita em relação à este tipo de equipamento é que se a placa metálica estiver apoiada sobre uma superfície rígida, como o caso do asfalto de uma estrada, ao aplicar energia, haverá um deslocamento vertical da chapa, prejudicando o sinal emitido pela fonte. A presença desta trepidação acrescentará um ruído indesejado ao dado.

**Linha de aquisição** Ao longo da Rodovia do Contorno foram instalados 96 geofones com espaçamento de 8 m entre eles, sendo 72 receptores ligados e 24 em *stand-by*. Após sete rolamentos da linha, onde o arranjo de geofone é deslocado ao longo do perfil para aumentar a área de cobertura, o trecho onde foram adquiridos dados totalizou 2488 m de comprimento. Os geofones foram enterrados no acostamento da via, procurando locais para uma melhor fixação do receptor, além de procurar posicioná-los o mais verticalmente possível. Foram realizados 247 tiros, sendo que para cada posição da fonte, uma sequência de três tiros foi realizada para posteriormente empilhá-la e assim, melhorar a razão

sinal/ruído.

### 5.3.1 Processamento dos Dados

A partir da aquisição, os dados foram processados com o auxílio do programa *SeisImager/2D<sup>TM</sup>*, utilizando os módulos *Pickwin<sup>TM</sup>* e *Plotrefa<sup>TM</sup>*.

Como destrinchado ao longo do capítulo 4 sobre a metodologia, após o levantamento dos dados, os arquivos em formato *seg - y* são convertidos para *seg - 2* e inseridos como dados de entrada no módulo *Pickwin<sup>TM</sup>*. Nesta etapa, pode-se aplicar filtros de ganho de amplitude e diminuir a janela de tempo para observar os traços apenas no intervalo de interesse.

Para este dado, foi aplicado um filtro *high cut* para excluir frequências mais altas e eliminar uma certa quantidade de ruído e também foi feita a normalização das amplitudes para a auxiliar na visualização das primeiras quebras.

Feito isso, interpreta-se o dado, realizando o *picking* no dado, ou seja, são definidas as primeiras chegadas observadas em cada traço. O módulo *Pickwin<sup>TM</sup>* oferece a funcionalidade para fazer o *picking* automático, mas devido às características do dado levantado, isto não foi uma grande vantagem. O dado bastante ruidoso prejudicou o algoritmo de automação e requisitou um cuidadoso controle de qualidade, demandando mais tempo nesta tarefa.

Ao fim da marcação das primeiras quebras, tem-se os dados observados (Figura 60).

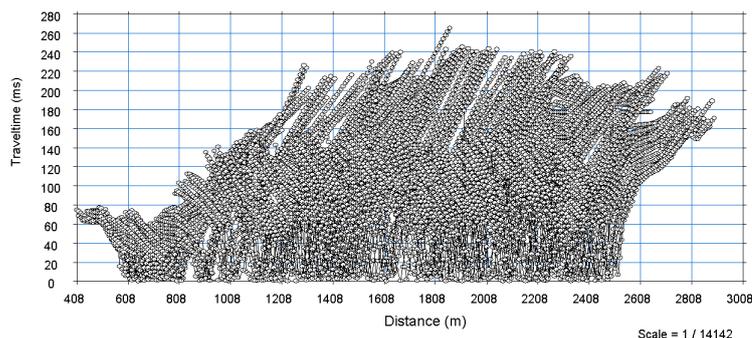


Figura 60 – Resultado do *Picking* é um gráfico relacionando Tempo *versus* Distância, onde já se observa a tendência da estrutura das camadas. Como o levantamento foi projetado para o estudo de sismica de reflexão, há um considerável aumento no número de tiros, dificultando esta análise visual.

## 5.4 Inversão tomográfica

Para realizar inversão do dado, foi escolhido aplicar duas formas de fornecer um modelo inicial para o algoritmo. Como visto, pode-se fazer através de modelo com camadas plano-paralelas ou de um modelo resultante da inversão *Time-term*.

### 5.4.1 Inversão 1: Modelo Inicial com Camadas Plano-paralelas

O modelo inicial de camadas plano-paralelas foi configurado com os valores da Tabela 9 e como pode ser visto na Figura 61.

Modelo Inicial   Camadas Plano-paralelas	
Profundidade do topo de camada mais profunda	30 m
Velocidade mínima	300 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
Número de camadas	10
Profundidade total do modelo	E: 300 m   D: 300 m

Tabela 9 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial para a inversão do dado real.

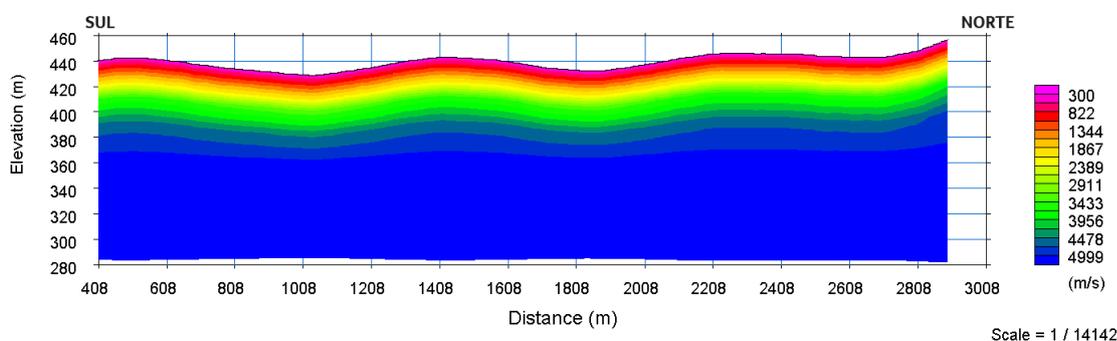


Figura 61 – Modelo inicial criado a partir da determinação de camadas plano paralelas e velocidades crescentes em relação à profundidade.

**Parâmetros da Inversão** Os parâmetros da inversão foram balizados com os testes realizados sobre o modelo sintético 1 (Tabela 10). Assim, foi obtido um resultado RMS igual a 7,81922 ms. O resultado final da inversão é apresentado na Figura 62.

Inversão Dado Real	
Iterações	10
Número de nós	3
Velocidade Mínima	300 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
RMS	7,819211 ms

Tabela 10 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do dado real.

**Resultados do Modelo com Camadas Plano-Paralelas** A seção invertida, como esperado, apresenta feições semelhantes às vistas tanto no modelo 3 com camadas falhadas, quanto no modelo 4 de gráben. À esquerda, nota-se uma queda brusca de velocidade, podendo ser interpretada como uma falha. Falha está que já possui registro em estudos geológicos da área. À direita, na direção norte, também sugere-se a presença de uma falha.

A partir do modelo invertido, interpreta-se que o levantamento cruzou uma zona com estrutura próxima de um gráben, onde seu depocentro encontra-se na zona central do trecho e os altos estruturais são localizados nas extremidades. Na tentativa de realizar uma análise quantitativa, poderia-se inferir que o maior pacote sedimentar tem cerca de 100 metros de extensão, o que estaria de acordo com a grandeza estimada em outros trabalhos como o de Riccomini, Sant'Anna e Ferrari (2004). Na Figura 63, nota-se que o modelo como um todo foi bem amostrado pelo traçado de raios.

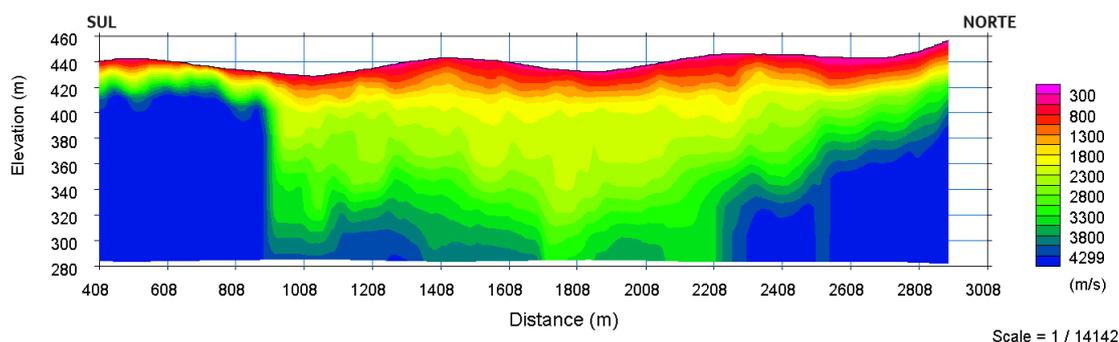


Figura 62 – Dado real invertido a partir de um modelo inicial com camadas plano-paralelas .

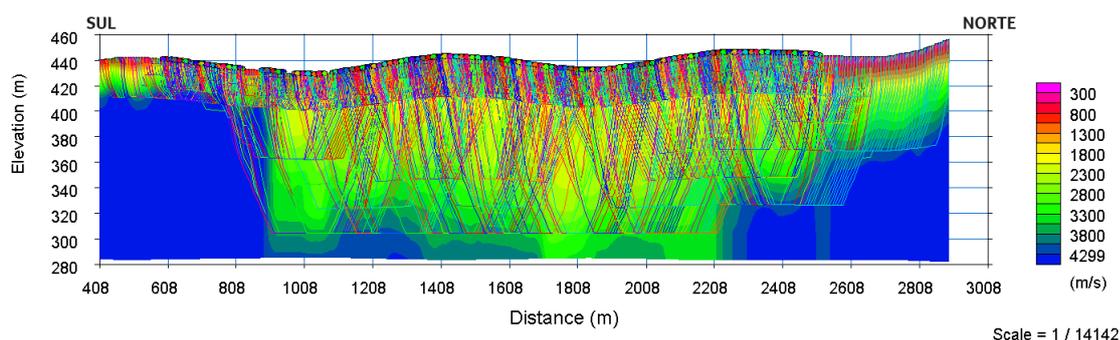


Figura 63 – Cobertura do traçado de raios sobre o modelo invertido a partir do dado real observado.

#### 5.4.2 Inversão 2: Modelo Inicial com inversão *Time-term*

Nesta segunda metodologia para inversão tomográfica, foi realizada a inversão *Time-term* para obter o modelo inicial. O algoritmo desta técnica parte da visualização e interpretação do tempo de trânsito na forma de gráfico Tempo de Trânsito *versus* Distância. Neste tipo de representação do dado de refração, é possível observar a chamada "*dog leg*", que nada mais é que o ponto onde se tem uma mudança de velocidade na subsuperfície. E é exatamente isso que se está interessado ao analisar o fenômeno da refração. Definem-se, então, visualmente as camadas, onde houver a presença desta feição que se aproxima à fisiologia da perna de um cachorro (Figura 64). Matematicamente, a passagem de uma camada para outra será demarcada onde houver uma mudança de derivada, ou seja, mudança de velocidade. Esta inversão *Time-term* fornecerá um razoável modelo inicial para a tomografia. Deve-se notar que esta técnica de inversão fornece um modelo com camadas discretas de velocidade constantes, isto é, o modelo possui passagens abruptas de uma velocidade para outra. Aplica-se, então, uma suavização para adequar o modelo inicial ao algoritmo tomográfico.

Este tipo de abordagem, através da inversão *Time-term* foi aplicada em uma tentativa de melhorar a estimativa inicial e, conseqüentemente, observar uma melhora na velocidade de convergência e também produzir uma solução mais próxima da distribuição de velocidades em subsuperfície.

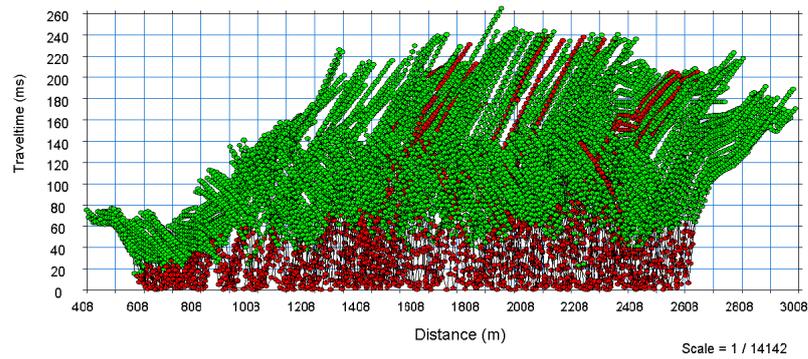


Figura 64 – Definição das camadas ao interpretar o gráfico Tempo *versus* Distância.

Os parâmetros do modelo inicial ficaram, assim, definidos: (Tabela 11)

Modelo Inicial   Layer Cake	
Velocidade mínima	1000 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
Número de camadas	2

Tabela 11 – Tabela com parâmetros utilizados na criação do modelo inicial pela inversão *Time-term* para a inverter do dado real.

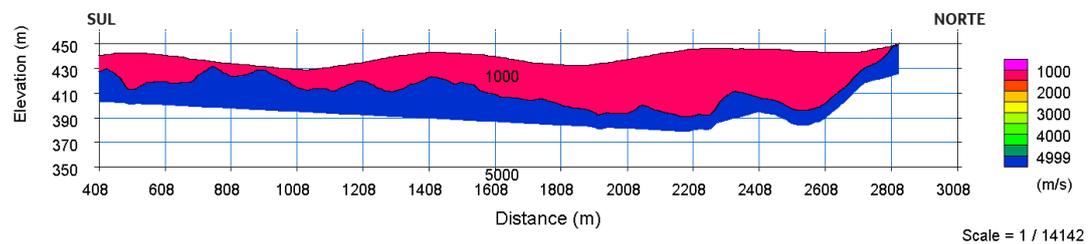


Figura 65 – Modelo criado a partir da inversão *Time-term*.

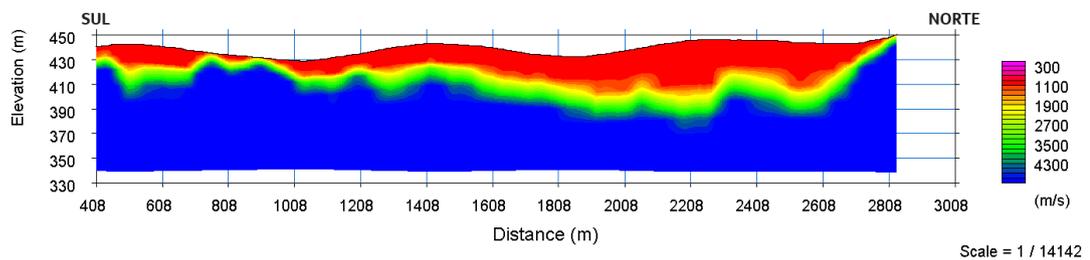


Figura 66 – Modelo inicial criado a partir da suavização do modelo gerado a partir da inversão *Time-term*.

**Resultados do Modelo *Layer Cake*** Adotando os parâmetros da Tabela 12, tem-se o modelo invertido na Figura 67.

Inversão Dado Real	
Iterações	10
Número de nós	3
Velocidade Mínima	300 m/s
Velocidade Máxima	5000 m/s
RMS	9,404866 ms

Tabela 12 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do dado real.

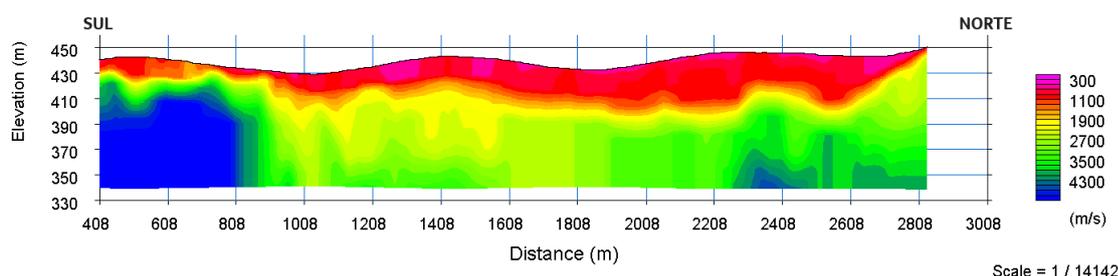


Figura 67 – Dado real invertido a partir de um modelo inicial resultante da inversão *Time-term*.

Nesta inversão, o valor de RMS foi mais alto que a primeira inversão com o dado real. Esperava-se que o erro fosse menor, já que, a princípio, com a definição do modelo inicial pela inversão *Time-term*, a solução já estaria próxima de ser atingida. Isto pode ter ocorrido, pois, pela quantidade de tiros realizados —projetados para um levantamento de reflexão—, a definição das camadas para a inversão *Time-term* ficou bastante comprometida. Outras duas possibilidades para o valor de RMS ter sido mais alto são exatamente pelo modelo inicial possuir um intervalo de velocidades diferente do intervalo sugerido na inversão e por, também, apenas contemplar duas camadas em seu modelo. Mesmo assim, deve-se destacar que a tendência geral do modelo de velocidade apresentada na inversão 1 do dado real se manteve sem grandes prejuízos.

### 5.4.3 Inversão 2.2: Modelo Inicial com o Resultado da Inversão 2

Com um valor de RMS mais alto que a inversão cujo modelo inicial utilizado foi um modelo de camadas plano-paralelas, optou-se por realizar mais uma etapa.

O resultado da inversão de número 2 foi convertido para um modelo *layer cake* (Figura 68 A). Em seguida, este modelo foi suavizado para se adequar à necessidade do algoritmo (Figura 68 B)

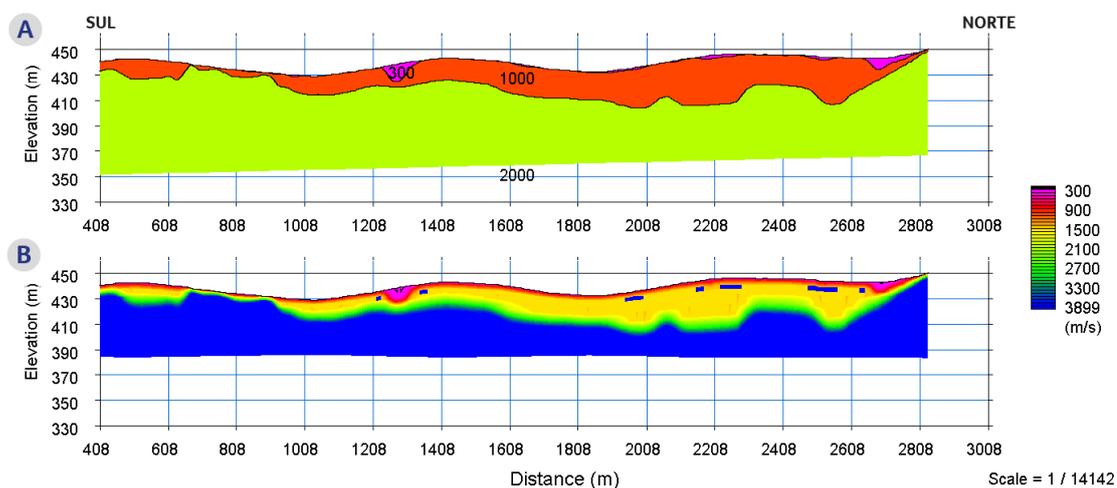


Figura 68 – (A) Modelo *layer cake* criado a partir da inversão de número 2 e (B) o modelo inicial suavizado.

**Parâmetros da Inversão** Podem ser encontrados na Tabela 13, assim como, o resultado para o erro RMS.

Inversão Dado Real	
Iterações	10
Número de nós	3
Velocidade Mínima	300 m/s
Velocidade Máxima	4500 m/s
RMS	7,852171 ms

Tabela 13 – Tabela com parâmetros utilizados na inversão do dado real.

**Resultados** Agora, após estas duas inversões, o erro RMS se aproximou do obtido na inversão de número 1, também produzindo uma seção com interpretações semelhantes às já apresentadas anteriormente (Figura 69).

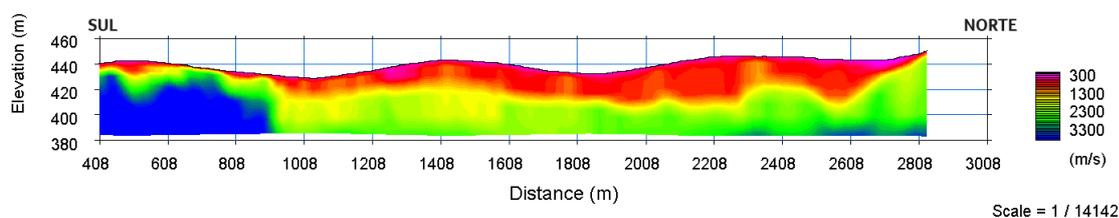


Figura 69 – Modelo gerado a partir da inversão 2.2.

## 5.5 Conclusão: Dado Real

A área de estudo é caracterizada por sedimentos fluviais entrelaçados, tornando a subsuperfície um meio heterogêneo e um tanto caótico. Com a mudança do leito do *paleorio*, lentes de lamas são observadas nos registros geológicos e isto pode ser um fator de perturbação no dado tanto de sísmica de reflexão, quanto de sísmica de refração, provocando uma maior dispersão das ondas propagadas. No entanto, o objetivo do estudo é observar a geometria e estrutura do embasamento no Gráben de Casa de Pedra. E, por ser uma rocha bastante densa, mesmo com a perda significativa do sinal, ainda assim foi possível identificar o embasamento e propor uma possível estruturação do seu arcabouço.

Segundo Negrão (2014), estudos audiomagnetotelúricos realizados previamente por Padilha e Vitorello (1992), indicaram a presença de uma camada superficial de sedimentos alterados com espessuras entre dez e vinte metros, um pacote sedimentar preenchendo a bacia de cerca de 120 metros e o embasamento em si. Para estes autores, a maior acumulação do local estaria próximo da borda norte do gráben de Casa de Pedra.

Estruturalmente, a área é definida como um "conjunto de blocos levemente rotacionados, controlados por falhas antitéticas com mergulhos para sudeste, contrapostas ao sistema de falha principal, com mergulho para nordeste, e presença de depósitos de leques aluviais associados"(NEGRÃO, 2014), como pode-se observar na Figura 70. Nota-se a presença de uma grande estrutura falhada à sul, mergulhando para norte (em se analisando em seção) e uma possível falha à norte, com mergulho para sul, (Figura 70) o que seria coerente com o sistema de falhas sintéticas e antitéticas do local.

No entanto, diferentemente dos autores anteriormente citados, o resultado obtido a partir da inversão tomográfica indica que o depocentro do Gráben Casa de Pedra se encontra na zona da bacia. Isto é, observa-se um maior pacote sedimentar no centro da linha do levantamento que cruzou a bacia e um progressivo afinamento da camada mais rasa, heterogênea e intemperizada. A rocha sã apresenta-se como um corpo mais denso, sendo identificado pelas altas velocidades no modelo. Esperava-se encontrar velocidades no entorno de 5000 m/s, características de um embasamento de bacia. Porém, posteriormente, considerou-se que poderia haver uma camada mais desgastada deste embasamento, provocando o registro de velocidades reduzidas em relação ao esperado, mas ainda um alto gradiente de velocidades. Deve-se considerar que nas extremidades do trecho de levantamento, há o afloramento do embasamento, estando recoberto apenas por solo quaternário. Dito isto, seria possível correlacionar tanto a falha observada a sul quanto à possível falha à norte com a elevação da rocha basal (Figura 70).

Como o objetivo principal deste estudo de refração para a região era localizar o depocentro da bacia e seus altos estruturais, a tomografia de refração se demonstrou uma ferramenta bastante eficiente em uma análise qualitativa do problema. Isto também é corroborado ao comparar os resultados obtidos no presente estudo com o trabalho, em andamento, de sísmica de reflexão realizado paralelamente à este por Salerno para conclusão da graduação em geofísica (2018). Além disso, resultados prévios de um levantamento gravimétrico realizado pelo Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica (GISIS) na mesma área também já apresenta indicações correlacionando fortemente os resultados obtidos pela tomografia de refração em relação ao embasamento do Gráben de Casa de Pedra. Isto reduz bastante a incerteza em relação ao modelo proposto. Posteriormente, espera-se confirmar os estudos com sondagens no local.

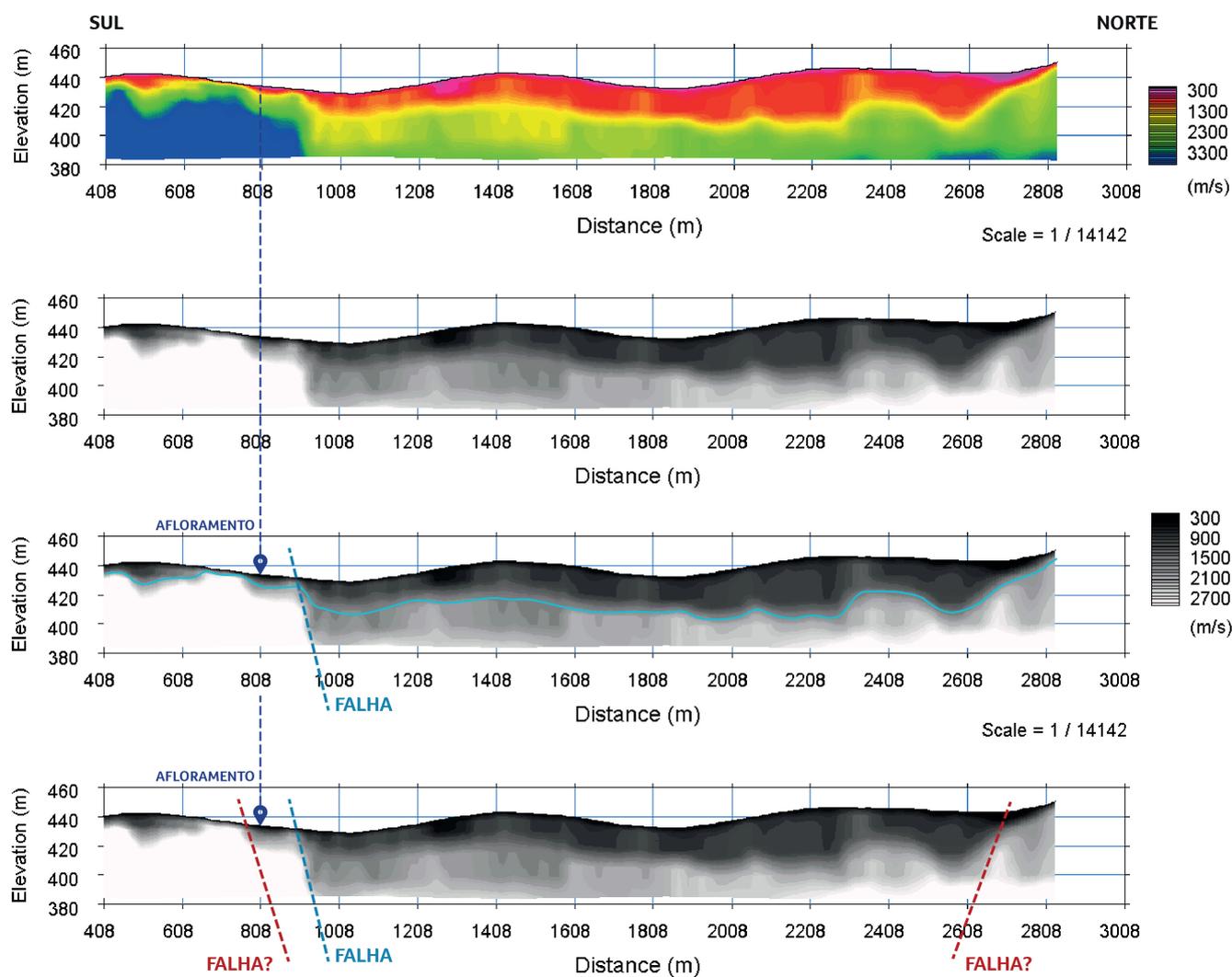


Figura 70 – Dado real invertido a partir de um modelo inicial *layer cake*; possíveis locações de falhas em subsuperfície; e posição aproximada do afloramento adjacente à linha de levantamento.



## 6 Conclusão

O método da tomografia sísmica de raios criticamente refratados é aplicado em estudos geofísicos, na indústria, com contribuições importantes desde a década de 50 do século XX. No entanto, com o maior uso do dado sísmico de reflexão, técnicas de sísmica de refração foram subutilizadas. Hoje, estudos apontam seu potencial em auxiliar outros métodos e também procuram demonstrar sua capacidade de disponibilizar dados estruturais a respeito da subsuperfície.

Após o estudo de bibliografias existentes sobre o método sísmico e, especificamente, sobre a tomografia sísmica de refração, iniciaram-se as aplicações da técnica em modelos sintéticos, procurando comprovar a sua viabilidade e estabilidade. E, com a avaliação do comportamento dos parâmetros do método e da resposta da inversão de acordo com os mesmos, foi evidenciada a eficiência do fluxo de inversão tomográfica. Além disso, esta aplicação em dados sintéticos, permitiu uma melhor percepção e interpretação dos dados tomográficos, que auxiliaram, posteriormente, na interpretação sobre o dado real.

Assim, o intuito deste trabalho foi estudar o método de tomografia de refração sísmica. Observaram-se as nuances que envolvem sua aplicação, mas também a possibilidade de realizar análises relativamente simples em relação à outros métodos geofísicos. Há muito o que se aprofundar, mas dentro do objetivo traçado, foi possível produzir resultados satisfatórios, especialmente, aqueles relacionados com a discussão à respeito do Gráben Casa de Pedra.

Quanto a isso, apesar de não demarcar com exatidão a interface que delimita o embasamento na bacia, a tomografia de refração foi capaz de mostrar uma zona de transição de velocidades, onde se observou um maior gradiente de velocidades. Isto pode ser útil para estudar regiões sedimentares, pois permite mapear a variação gradual da velocidade em função do aumento da densidade dos sedimentos. Neste trabalho, possibilitou inferir que o depocentro se encontra na zona central do Gráben de Casa de Pedra e

Enfim, a tomografia sísmica de refração apresentou-se como uma ferramenta interessante para estudo, certamente com algumas limitações, porém, com um

potencial leque de aplicações, principalmente quando se utilizada em um estudo interdisciplinar.

## Referências

- ALMEIDA, V. T. X. d.; SANTOS, M. A. C. Dissertação (Mestrado), *Tomografia sísmica de superfície: modelagem direta calculando as trajetórias de ondas refratadas*. 2013.
- AZEVEDO, P. A. de; ROCHA, M. P. Estudo do método geofísico de sísmica de refração com aplicação no futuro trecho norte do metrô de Brasília. 2010.
- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C. D. Reconstituição gravimétrica compacta. In: *3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. [S.l.: s.n.], 1993.
- BUSTAMANTE\*, S. G. H.; PACHECO, M. A. C. Inversão sísmica em três dimensões a partir de dados de reflexão sísmica por algoritmos genéticos híbridos. In: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS AND BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. *11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF 2009, Salvador, Bahia, Brazil, 24-28 August 2009*. [S.l.], 2009. p. 1355–1360.
- CAVACUNDO, O. B. M. d. *Tomografia de Refração Sísmica e de Resistividade Elétrica Aplicadas à Estimativa e Caracterização de Volumes de Sedimentos Contaminados por Metais Pesados. O Caso do Córrego Consciência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Évora, 2015.
- CLAERBOUT, J. F.; MUIR, F. Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 38, n. 5, p. 826–844, 1973.
- CUTLER, R. et al. Seismic tomography: Formulation and methodology. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1984. p. 711–712.
- ELJABRI, F. M. Geophysical assessment of soil and rock in the new Madrid seismic zone. 2017.
- FERNANDES, D. M. T. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica de Computadores), *Método Variacional em Fotônica*. 2008.
- FEROCI, M. et al. Some considerations on shallow seismic reflection surveys. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 45, n. 2, p. 127–139, 2000.

- FKIRIN, M.; BADAWY, S. Seismic refraction method to study subsoil structure. *J Geol Geophys*, v. 5, n. 259, p. 2.
- HSIAO, K.-H.; YAN, H.-S. The review of reconstruction designs of zhang heng's seismoscope. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Japan Association for Earthquake Engineering, v. 9, n. 4, p. 4\_1–4\_10, 2009.
- IWASAKI, T. Extended time-term method for identifying lateral structural variations from seismic refraction data. *Earth, planets and space*, Springer, v. 54, n. 6, p. 663–677, 2002.
- JONES, I. F. Tutorial: Velocity estimation via ray-based tomography. *First Break EAGE*, v. 28, n. 2, p. 45–52, 2010.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de exploração*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2009.
- LANDRO, M.; STAMMEIJER, J. Quantitative estimation of compaction and velocity changes using 4d impedance and travelttime changes. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 69, n. 4, p. 949–957, 2004.
- MARTINS, J.; KNAPP, R. Mapeamento tomográfico do sistema estrutural de rochas reservatórios. In: *3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. [S.l.: s.n.], 1993.
- MELO MÁRIO SÉRGIO E RICCOMINI, C. e. H. Y. D. Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 15, 1985.
- MOSER, T. Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 56, n. 1, p. 59–67, 1991.
- MURAT, M. E.; RUDMAN, A. J. Automated first arrival picking: A neural network approach 1. *Geophysical Prospecting*, Wiley Online Library, v. 40, n. 6, p. 587–604, 1992.
- NEGRÃO, A. P. *Evolução Tectonossedimentar e Deformação Rúptil Cenozoica da Região da Bacia Sedimentar de Volta Redonda (Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, RJ)*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- PERALDI, R.; CLEMENT, A. Digital processing of refraction data study of first arrivals. *Geophysical Prospecting*, v. 20, n. 3, p. 529–548, 1972.
- PEROSI, F. A. Refração sísmica profunda no setor sudeste da província tocantins. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 21, n. 2, p. 185–186, 2003.

- QIN, F. et al. Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 57, n. 3, p. 478–487, 1992.
- RAWLINSON, N.; HAUSER, J.; SAMBRIDGE, M. Seismic ray tracing and wavefront tracking in laterally heterogeneous media. *Advances in Geophysics*, Elsevier, v. 49, p. 203–273, 2008.
- RICCOMINI, C.; SANT’ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Beca São Paulo, p. 383–405, 2004.
- SABBIONE, J. I.; VELIS, D. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 75, n. 4, p. V67–V76, 2010.
- SANTOS, R. H. M. d.; FIGUEIRÓ, W. M. Modelagem acústica bidimensional usando diferentes parametrizações de campos de velocidades. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 24, n. 1, p. 103–105, 2006.
- SCHEIDEGGER, A. E.; WILLMORE, P. The use of a least squares method for the interpretation of data from seismic surveys. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 22, n. 1, p. 9–21, 1957.
- SEIMETZ, E. X. et al. Integration of geophysical methods to define the geological interfaces for a future metro station located in Brasília-DF, Brazil. *Geociências (São Paulo)*, v. 32, n. 4, p. 650–658, 2013.
- SERRETTI, P.; MORELLI, A. Seismic rays and traveltimes tomography of strongly heterogeneous mantle structure: application to the central Mediterranean. *Geophysical Journal International*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 187, n. 3, p. 1708–1724, 2011.
- SHARMA, P. V. *Environmental and engineering geophysics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1997.
- SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration Seismology*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995.
- SOARES, F. J.; DIAS, S.; BARBOSA, V. C. F. Inversão gravimétrica assistida. 2007.
- SOUZA, W. Determinação automática das primeiras quebras e aplicações na correção estática e processamento sísmico da bacia do Parnaíba. 1997.

- SPAGNOLINI, U. Adaptive picking of refracted first arrivals 1. *Geophysical Prospecting*, Wiley Online Library, v. 39, n. 3, p. 293–312, 1991.
- TELFORD, W. M. et al. *Applied geophysics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990. v. 1.
- UNDERWOOD, D. *Near Surface Seismic Refraction Surveying Field Methods*. Geometrics Inc, 2009. Disponível em: <ftp://geom.geometrics.com/pub/seismic/Literature/SeismicRefractionSurveying\_r4a.pdf>.
- VIDALE, J. Finite-difference calculation of travel times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, The Seismological Society of America, v. 78, n. 6, p. 2062–2076, 1988.
- VIDALE, J. E. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 55, n. 5, p. 521–526, 1990.
- WIEDERHOLD, H. et al. Geophysical methods for investigation and characterization of groundwater resources in buried valleys. *Grundwasser*, SPRINGER HEIDELBERG TIERGARTENSTRASSE 17, D-69121 HEIDELBERG, GERMANY, v. 13, n. 2, p. 68–77, 2008.
- ZHANG, J.; TOKSOZ, M. N. Nonlinear refraction traveltime tomography. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 63, n. 5, p. 1726–1737, 1998.

# 1 Anexo: Definições e Conceitos

Como tema deste trabalho, a tomografia sísmica de refração foi estudada e a partir dela foram gerados os resultados apresentados. Assim, observar definições e conceitos pode colaborar com o entendimento da técnica da tomografia.

O método sísmico abrange uma série de técnicas que utilizam as diferentes características das ondas mecânicas e pode ser dividido de acordo com o fenômeno físico escolhido. Os mais utilizados são as técnicas que utilizam a reflexão ou a refração da onda. Apenas para citar, há também o uso do efeito de transmissão da onda, por exemplo, quando se pensar em uma aquisição poço a poço. (MARTINS; KNAPP, 1993).

A Refração Sísmica está inserida dentro do método sísmico e estuda o meio em subsuperfície através das refrações críticas das ondas nas interfaces. O objetivo, a partir deste estudo da refração, é obter um modelo de velocidades (FKIRIN; BADAWY, ). E isto é realizado a partir da aplicação da teoria da inversão geofísica.

Logo, a tomografia sísmica de refração desponta como uma técnica de inversão para obter os valores de velocidade do meio em subsuperfície através das ondas criticamente refratadas.

## 1.1 Método Sísmico

O método sísmico é uma técnica de investigação geofísica que está ligada à elaboração da Lei de Hooke, em 1678. Esta lei foi uma importante contribuição para o cálculo da deformação causada por uma força exercida sobre um corpo por estar relacionada à elasticidade dos materiais. Assim, iniciaram-se os estudos sobre a energia que provocava estas perturbações em um meio.

Já em 1828, Poisson demonstrou, em teoria, a existência de dois tipos de ondas separadamente, que mais tarde foram denominadas ondas de corpo, P e S. E, após 60 anos, no final do século XIX, foi lançada a teoria das ondas superficiais (SHERIFF; GELDART, 1995).

Enquanto a base teórica das ondas sísmicas estava a ser definida, iniciou-se a

exploração geofísica petrolífera com a construção da Balança de Torção de Eötvös, que era, na verdade, uma melhoria do experimento de Cavendish, para medição da gravidade. Foi apenas em 1914 que Mintrop desenvolveu o primeiro sismógrafo com precisão suficiente para contribuir com a investigação geofísica, através do registro das ondas sísmicas. Alguns anos antes, em 1905, Garret já havia proposto o uso da refração sísmica para buscar domos salinos em subsuperfície, no entanto, ainda havia a falta do desenvolvimento de um equipamento como o de Mintrop (SHERIFF; GELDART, 1995).

Vinte anos depois da sugestão de Garret em aplicar a refração sísmica para desvendar estruturas geológicas, houve a primeira descoberta de hidrocarbonetos no Texas/EUA, aplicando o método de refração. A metodologia de exploração geofísica a ser seguida passou a ser de fazer um reconhecimento geral através da refração e em seguida, detalhar a investigação com o tal instrumento criado por Eötvös, a Balança de Torção. E foi no final da década de 20, que ocorreu a primeira descoberta através do método da reflexão, o que passa a definir como um método mais importante em relação ao método da refração (SHERIFF; GELDART, 1995).

Enfim, com o avanço da tecnologia computacional, os métodos sísmicos são continuamente aperfeiçoados, visando a extração de informação a partir das ondas mecânicas que viajam através dos meios físicos da Terra. Então, a metodologia a ser seguida, é produzir energia através de uma fonte controlada e móvel para ser captada por receptores.

### 1.1.1 Velocidades Sísmicas

As velocidades sísmicas são fundamentais para descrever a estrutura da subsuperfície. Elas são variáveis em função das características elásticas do meio e são definidas pelas constantes elásticas denominadas módulo de Young, módulo de elasticidade volumétrica, razão de Poisson e módulo de rigidez. No entanto, a combinação destas características não definem especificamente um certo tipo de rocha. As velocidades de certas rochas com os mesmos componentes mineralógicos podem variar dentro de um intervalo de valores e isto está relacionado, entre outras coisas, com sua idade, sua profundidade, seu grau de fraturamento ou porosidade e o conteúdo que preenche os seus poros (TELFORD et al., 1990).

No entanto, apesar de ser imprudente, em muitos casos, especificar o tipo de rocha apenas a partir das velocidades, em estudos mais locais, é possível extrair indicações à respeito da subsuperfície. Sabe-se, a partir de experimentos, que, em um meio poroso, a velocidade de um material mais denso é geralmente maior que a velocidade de um material menos denso. Isto quer dizer, por exemplo, que, em estudos nos quais se deseja definir uma rocha bastante densa em relação às outras geologias da região, procura-se uma área com um contraste bastante alto de velocidades. Ali deverá ser a interface que separa este corpo rochoso das outras camadas.

A relação entre densidade e velocidade pode ser observada pelas equações de  $V_p$  e  $V_s$ , que sugerem as velocidades variam inversamente com a raiz quadrada da densidade, o que iria de encontro às observações experimentais. A diferença entre a prática e a teoria pode ser explicada, pois os módulos de elasticidade  $K$  e  $\mu$  dependem da densidade e estes módulos crescem mais rapidamente que a própria densidade (SHARMA, 1997).

### 1.1.2 Ondas Sísmicas

Onda sísmica é uma onda mecânica que se propaga a partir de perturbações e deformações elásticas em um meio. Seu espalhamento ocorre em todas as direções de forma radial e sua velocidade de propagação está relacionada com as características físicas da subsuperfície (SEIMETZ et al., 2013). Esta propagação é convencionalmente representada por raios perpendiculares à frente da onda, que indica a direção de deslocamento de um ponto específico desta onda em meios isotrópicos. Ao atravessar interfaces com índices de refração diferentes, estes raios sofrem efeitos semelhantes aos observados na ótica, que são a reflexão, a refração e a transmissão, como descritos na Lei de Snell. Além desta classificação da onda quanto ao fenômeno físico, as ondas sísmicas podem ser basicamente divididas quanto à sua forma de propagação. São as já mencionadas:

1. Ondas de corpo: a onda P, primária e a onda S, cisalhante;
2. Ondas superficiais: a onda *Rayleigh* e onda *Love*.

Cada um destes tipos de onda possui características específicas e que podem fornecer informações direcionadas ao que se deseja desenvolver no projeto de estudo (Figura 71). No caso do estudo sísmico para geofísica, as ondas de maior interesse são as ondas de corpo.

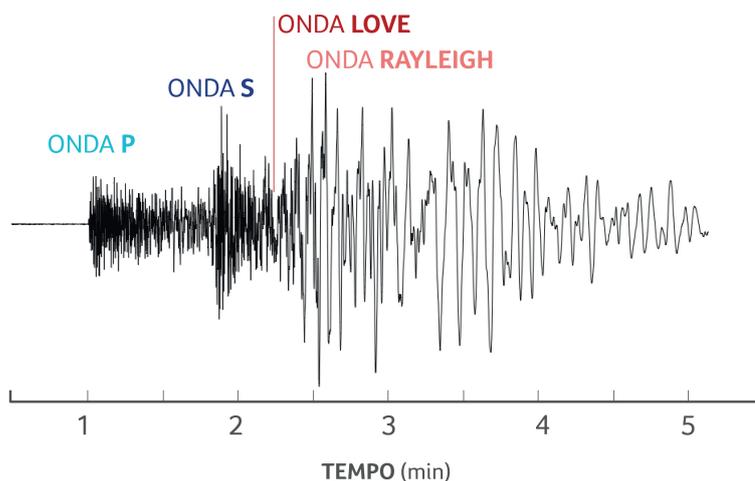


Figura 71 – Registros dos diferentes tipos de ondas em um sismograma e que ilustra a ordem de chegada no sismógrafo. Figura modificada de Eureka Brasil (2018).

#### 1.1.2.1 Ondas de Superfície

As ondas de superfície, como o nome indica, se propagam próximo à superfície da Terra e por isso, não são capazes de contribuir para a investigação geofísica. As mais conhecidas são as ondas Rayleigh e Love. São ditas como as responsáveis pela natureza destrutiva dos terremotos e para o método sísmico, são apenas consideradas ruído no sinal.

A onda Rayleigh é a mais lenta em relação às ondas sísmicas tanto de superfície quanto de corpo. São fruto da interferência entre as ondas de corpo P e S e sua propagação é contrária ao sentido de propagação da onda.

Já a onda Love é um tipo de onda transversal que se movimenta no plano horizontal com a superfície (Figura 72).

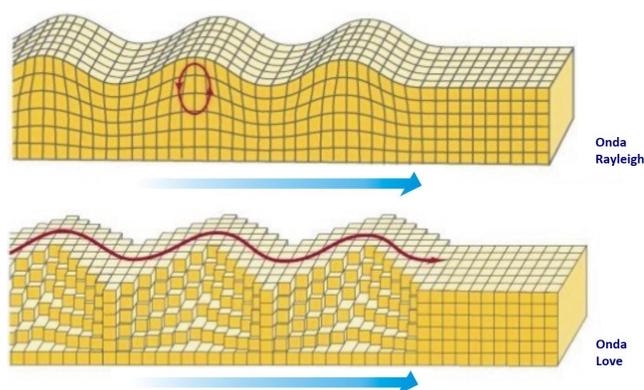


Figura 72 – Esquema representando a propagação das ondas Rayleigh (em cima) e Love (embaixo) e deformação provocada no meio. Fonte: Instituto Nacional de Normalización (2010)

### 1.1.2.2 Ondas de Corpo

As ondas de corpo são diferenciadas entre as ondas primárias e secundárias.

**Onda S** A onda secundária ou onda cisalhante ou simplesmente onda S é o segundo evento a ser registrado no sismograma (Figura 71). Possui um movimento cisalhante, onde o solo se desloca verticalmente, enquanto sua direção de propagação ocorre horizontalmente (Figura 73). Outra característica importante das ondas do tipo S é sua não propagação em meios fluidos, já que estes não possuem resistência ao cisalhamento. Para entender como se dá, então, a propagação da onda S no interior da Terra, que contém meios fluidos, deve-se olhar para o conceito de conversão das ondas S em ondas P (SOUZA, 1997).

**Onda P** Já a onda primária é, como sua denominação indica, realmente o primeiro evento observado no sismograma como mostra o esquema na Figura 71. Daí sua importância para o método sísmico, já que por ser mais rápida, pode-se, em teoria, interpretar sua chegada mais facilmente. Também é conhecida com onda de pressão, onde de compressão ou, apenas, onda P. Estas nomenclaturas têm relação com o fato de que as partículas do meio vibram na mesma direção na qual a onda está se propagando (Figura 73)(SOUZA, 1997).

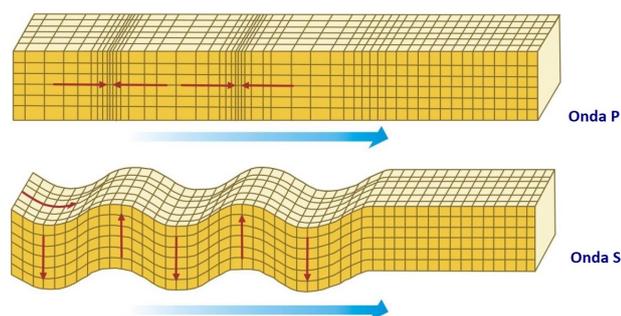


Figura 73 – Esquema representando a propagação das ondas P (em cima) e S (embaixo) e deformação provocada no meio. Fonte: Instituto Nacional de Normalización (2010)

## 1.2 Sísmica de Reflexão *versus* Sísmica de Refração

O método sísmico de refração foi empregado na indústria do petróleo antes do método de reflexão ser desenvolvido. No entanto, com o avanço tecnológico e a evolução computacional nas últimas décadas, o método de sísmica de reflexão se tornou tão comum que em muitos casos é denominado método de sísmica convencional. Por possuir menor resolução, apesar de varrer uma grande área de levantamento, a sísmica de refração foi preterida em relação à sísmica de reflexão, que, em geral, fornece maior penetração na subsuperfície e maior resolução, possibilitando uma análise prospectiva de hidrocarbonetos mais eficiente (MARTINS; KNAPP, 1993). A técnica de sísmica de refração passa a ser introduzida como uma ferramenta auxiliar ao método de sísmica de reflexão, como já citado, por exemplo, à técnica de inversão *FWI*, *full Waveform Inversion*. Para além disso, nos últimos anos, há diversos estudos, como o de Landro e Stammeijer (2004), com o objetivo de mostrar que há aplicações eficientes da sísmica de refração na indústria, especialmente, de exploração de hidrocarbonetos.

### 1.2.1 Sísmica de Reflexão

A sísmica de reflexão estima as propriedades da subsuperfície da Terra com base na reflexão de ondas sísmicas. Este método, em geral, requer a utilização de uma fonte sísmica de energia controlada, como por exemplo um explosivo, canhões de ar comprimido para aquisições marinhas (conhecidas como *air guns*), ou fontes

sísmicas vibracionais (comumente denominadas *vibroscis*). Simplificadamente, ao determinar o tempo que uma onda refletida demora até atingir um receptor, é possível estimar a profundidade da estrutura que gerou a reflexão, com certa ambiguidade inerente ao método. E observando as amplitudes do sinal, nota-se uma variação a depender do contraste entre meios na subsuperfície (SOUZA, 1997). Quanto maior o contraste, maior a amplitude. Há também estudos de sísmica, onde a fonte é passiva. Podem ser fontes passivas, as movimentações tectônicas, as marés, fluxo de fluidos em reservatórios e microfraturas induzidas durante a produção no reservatório entre outras. Técnicas com este tipo de fonte passiva tem, por exemplo, aplicação na indústria do petróleo para monitoramento de reservatório (SOUZA, 1997). A tomografia utilizando fonte passiva, por exemplo, é uma destas técnicas, pois é capaz de determinar o foco de um microsismo, mapeando as fraturas induzidas pela atividade de injeção e exploração, além de possibilitar o estudo das propriedades físicas do meio (BUSTAMANTE\*; PACHECO, 2009).

### 1.2.2 Sísmica de Refração

Já a sísmica de refração, como o nome indica, faz uso das refrações das ondas sísmicas, utilizando os mesmos tipos de fontes da sísmica de reflexão e muitas vezes, o mesmo arranjo de equipamento do levantamento de reflexão (CAVACUNDO, 2015). Para a estimativa da profundidade que produziu a onda refratada, estuda-se o tempo de trânsito da primeira chegada.

Na Tabela 14, encontra-se uma breve comparação entre os métodos de sísmica de reflexão e método de sísmica de refração. Nota-se, especialmente, a diferença de custo entre os dois métodos, favorecendo a aplicação da técnica de refração, caso o objetivo do estudo esteja adequado às limitações da mesma.

## 1.3 Refração Sísmica

A partir das classificações dos tipos de ondas e do seu comportamento, cada técnica visa utilizar estas características próprias para extrair informações, havendo basicamente a divisão entre dois grandes campos: a sísmica de reflexão e sísmica de refração. Estas áreas possuem suas especificidades e se adequam para solucionar

Comparação dos Métodos Sísmicos de Reflexão e Refração		
	Reflexão	Refração
<b>Alvos Típicos</b>	Contrastes de densidade horizontais ou mergulhantes e alvos lateralmente restritos como cavidades ou túneis em profundidades maiores que 20 m	Contrastes de densidades horizontais e rasos a profundidades menores que 40 m
<b>Restrições do local do levantamento</b>	Nenhuma	Dimensões acessíveis maiores que 5 vezes a profundidade de interesse. De preferência, sem pavimentação.
<b>Resolução Vertical</b>	5 a 10 % da profundidade	10 a 20 % da profundidade
<b>Resolução Lateral</b>	≈ metade do intervalo entre os geofones	≈ metade do intervalo entre os geofones
<b>Profundidade Efetiva do Levantamento</b>	Maior que 20 m	1/5 a 1/4 do offset máximo: distância entre o tiro e o geofone
<b>Custo Relativo</b>	3x a 5x	x

Tabela 14 – Tabela comparando os métodos de sísmica de reflexão e sísmica de refração.  
Fonte: Cavacundo (2015)

diferentes problemas. Neste trabalho, optou-se por estudar a tomografia baseada na refração sísmica e assim, alguns pontos devem ser comentados antes de iniciar o estudo em si.

As ondas sísmicas são, então, ondas mecânicas acústicas que se deslocam no meio e ao encontrarem contrastes de densidade e/ou velocidade entre uma camada e outra sofrem interações, seja saindo direto da fonte para o receptor (onda direta), seja retornando como reflexão ou ainda sendo transmitida como onda refratada (Figura 74). Esta onda refratada também pode retornar à superfície em casos onde a onda emitida atinge a interface com um ângulo de incidência crítico.

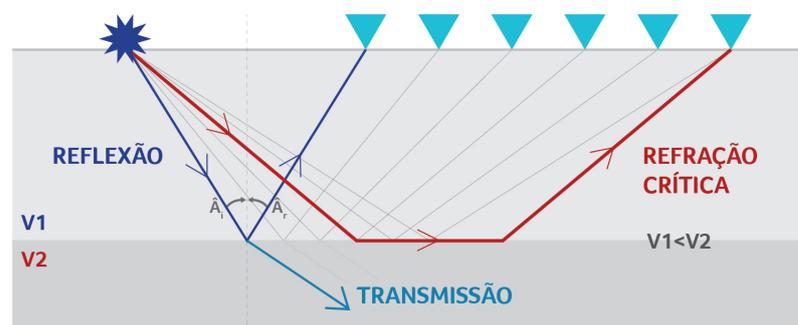


Figura 74 – Desenho esquemático do raio refletido, transmitido e criticamente refratado. Observação da Lei de Snell.

Além disso, como já apresentado, neste texto, serão consideradas apenas as ondas P refratadas, já que estas ondas têm a maior velocidade dentre as ondas sísmicas, chegando primeiro nos receptores. Sendo assim, a partir de um certo afastamento (distância entre a fonte e o receptor), a primeira chegada de sinal será da onda P criticamente refratada. Esta distância será aqui denominada  $x_{crítico}$ . Isto permite a identificação desta onda de forma mais rápida no dado sísmico. Por isso, a tomografia de refração é mencionada como tomografia de primeira quebra em muitos artigos e publicações.

No esquema da Figura 75, observa-se a curva que relaciona a distância (*offset*) e o tempo. É possível identificar, a partir de uma distância,  $x_{crítico}$ , as chegadas criticamente refratadas. Sendo a inclinação dessa curva o inverso da velocidade, quanto menor for a inclinação do gráfico, menor o tempo que a onda levará para alcançar os maiores *offsets*, ou seja, mais veloz sua presença será notada antes das ondas diretas e das ondas refletidas.

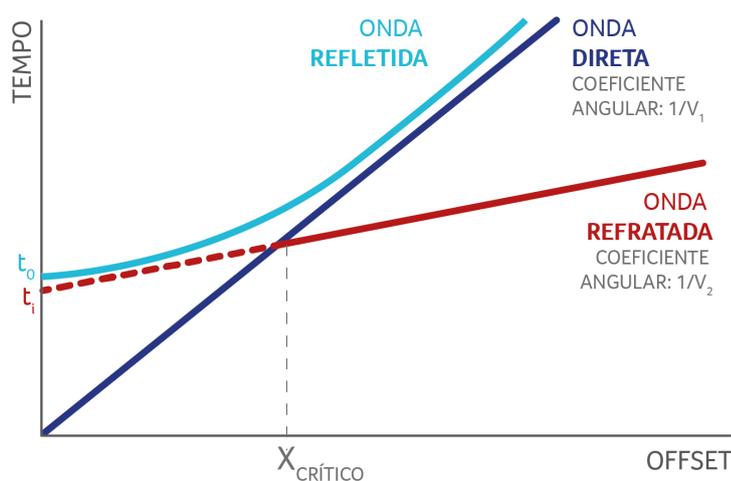


Figura 75 – Gráfico representando o momento no qual a onda criticamente refratada chegará primeiro no receptor posicionado em um determinado *offset* ( $x_{crítico}$ ).

Esta maior velocidade da onda criticamente refratada (que a partir de agora será também mencionada como onda refratada) se deve ao fato da onda mudar de direção de propagação ao atingir a interface que separa dois meios com diferentes velocidades,  $v_1$  (para a camada mais rasa) e  $v_2$  (camada embaixo da camada

superficial), e viajar nesta interface com velocidade do meio  $v_2$  (Figura 76). A onda assume esta velocidade  $v_2$ , pois não há movimento relativo entre os dois meios, já que a interface pertence aos dois meios (TELFORD et al., 1990).

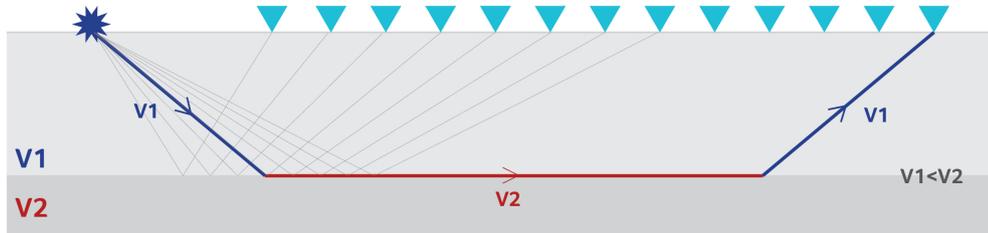


Figura 76 – Desenho esquemático do raio da onda viajando em subsuperfície e assumindo a velocidade da camada 2, ao longo da interface antes de retornar à superfície.

Faz-se necessário lembrar que para ocorrer o fenômeno da refração, a velocidade no meio 1 deve ser sempre menor que a velocidade no meio 2 (Figura 76). Assim, pela Lei de Snell descrita pela equação

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.1)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de incidência com que o raio encontra a interface,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $v$  é a velocidade do meio e  $n$  é o índice de refração do meio e, sendo  $v_1 < v_2$ , o raio, que é uma forma de representação de onda, ao atravessar o limite entre  $v_1$  e  $v_2$ , se afastará da normal. Este afastamento pode chegar a  $90^\circ$  e é neste momento que a onda passa a ser criticamente refratada (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). Neste caso, com  $\theta_2$  igual a  $90^\circ$ ,  $\theta_1$  será denominado  $\theta_{\text{crítico}}$ .

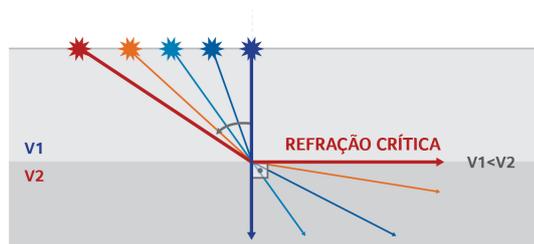


Figura 77 – Desenho esquemático do raio da onda viajando em subsuperfície e assumindo a velocidade da camada 2, ao longo da interface antes de retornar à superfície.

Também deve-se considerar o Princípio de Huygens (Figura 78). Este princípio formula que cada ponto da frente de onda é um ponto difrator, ou seja, é um ponto emissor de outras ondas. Isto teoriza a ação na qual a onda refratada volta à superfície e é captada pelos receptores.

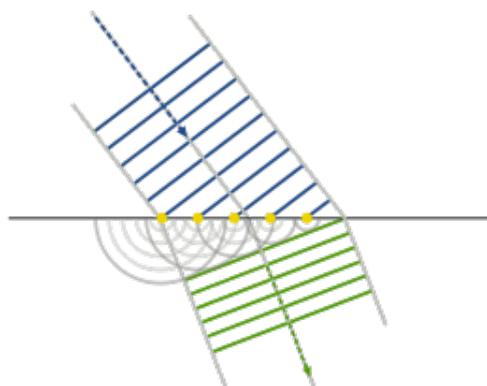


Figura 78 – A refração segundo o Princípio de Huygens. Os pontos amarelos representam as novas fontes pontuais de onda. Fonte: Arne Nordmann (2007)

Portanto, o fato da onda P refratada criticamente ser um dos primeiros eventos registrados nos sismogramas, afinal onda refratada viaja a uma velocidade maior que a onda direta, possibilita uma determinação mais acertiva dos tempos de trânsito, sendo então muito vantajosa para a interpretação dos dados (TELFORD et al., 1990). Essa característica também está sendo utilizada para o desenvolvimento de algoritmos que visam tornar a etapa de interpretação, um processo automático.

## 1.4 Conceito de Inversão

O termo *inversão* é aplicado para denominar uma série de processos e artifícios matemáticos realizados sobre um certo dado. A partir da inversão geofísica, procura-se obter uma propriedade física específica característica da geologia em subsuperfície. Por exemplo, na inversão elétrica, espera-se lograr os valores de resistividade após a inversão (CAVACUNDO, 2015).

Na tomografia de refração, inverter o dado é obter os valores de velocidade dos meios em subsuperfície a partir dos tempos de trânsito de primeira quebra (JONES,

2010). Apesar de ocorrer uma variação dos valores de velocidade para uma mesma rocha, dependendo da sua compactação, por exemplo, a inversão tomográfica permite observar anomalias nas velocidades, ou seja, possibilita a identificação de grandes mudanças de velocidade, se destacando do chamado *background* da região de estudo.

A ideia da inversão de um dado é fazer uma espécie de previsão do que poderia ser a solução do problema, realizar um cálculo e obter um dado calculado. Este dado calculado é comparado com o dado observado adquirido em campo. Se a diferença entre os dados for pequena, a predição foi bastante próxima da solução real. Se for maior do que o que se define como aceitável para o problema em questão, atualiza-se essa previsão inicial e o processo começa novamente (Figura 79) (JONES, 2010). Essa diferença entre dado calculado e dado observado é chamada de resíduo. Estas etapas fazem parte do chamado fluxo de inversão.

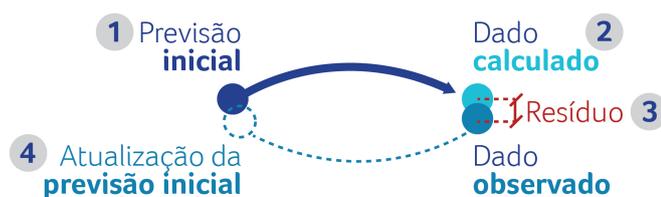


Figura 79 – Esquema ilustrando a ideia básica de um fluxo de inversão.

O fluxo de etapas para realizar a inversão seria exatamente solucionável se o problema proposto fosse constituído de um sistema de equações com uma solução que fosse única e estável, ou seja, o sistema deveria ser um sistema determinado. O número de equações linearmente independentes e diferentes de zero seria igual ao número de incógnitas.

No entanto, em geral, os problemas geofísicos são problemas denominados mal postos. Para um problema ser considerado mal posto basta não se adequar a um dos itens abaixo (ALMEIDA; SANTOS, 2013):

1. Existência: o problema deverá apresentar solução possível;
2. Unicidade: a solução deverá ser única;

3. Estabilidade: a solução deverá exibir dependência contínua em relação aos dados que a originou;

Ou seja, em um problema mal posto, não haveria informação suficiente para a determinação dos parâmetros da subsuperfície. Então, para torná-los bem-postos ou um problema com solução única, aplicam-se técnicas auxiliares denominadas de técnicas de regularização (ZHANG; TOKSOZ, 1998).

**Regularização:** É uma técnica desenvolvida para tornar um problema mal posto em bem posto. Com a inserção de informações a priori (restrições ou vínculos), usualmente, a partir de um conhecimento prévio ou suposição sobre a região estudada, o problema mal posto se torna bem posto. Busca-se, então, através de técnicas de regularização, melhorar o condicionamento do problema. Um exemplo de regularização bastante utilizada é a de Tikhonov (ALMEIDA; SANTOS, 2013).

Por não se fazer necessária neste trabalho, esta etapa será desconsiderada, porém, nos trabalhos de Barbosa e Silva (1993) e Soares, Dias e Barbosa (2007), é possível acessar informações relevantes à este tema.

## 1.5 Tomografia Geofísica de Refração

A palavra *tomografia* foi cunhada a partir da junção dos termos gregos *tomo*, que tem seu significado algo como "corte" ou "fatia", e *grafia*, que significa "escrever", "representar" (JONES, 2010). Sua ideia seria o registro de um corte de uma imagem. Inicialmente, a tomografia foi empregada na medicina como técnica de visualização de órgãos, através da transmissão e captação de ondas do tipo raio-x que atravessam o corpo humano (MARTINS; KNAPP, 1993) e, hoje, é aplicada em diversos campos do saber como a geofísica, ciências atmosféricas, geotecnia, arqueologia, ciência dos materiais entre muitos outros (CAVACUNDO, 2015).

A tomografia geofísica apropria-se, então, dos mesmos princípios de ótica da tomografia médica. No entanto, a tomografia médica é bastante eficiente, pois consegue circundar o corpo a ser investigado. Esta é uma grande limitação da tomografia geofísica: a impossibilidade de observar ou imagear o alvo de interesse

em todas as direções e ângulos. A cobertura do alvo é irregular, limitando, assim, a resolução do imageamento.

Em geral, apesar das limitações, o método tomográfico tem sido considerado confiável para modelos sintéticos realistas. Isto inclui modelos com mudança gradual de velocidade e variações laterais de velocidade. Segundo (ELJABRI, 2017), quando a tomografia é aplicada a um ambiente com contrastes de velocidade mais gradacionais, tendo variações horizontais de velocidade e uma topografia acidentada, a técnica tende a ser bem resolvida. Este detalhe é interessante, pois se aproxima de situações comumente encontradas em campo.

Especificamente, uma suposição a ser feita em relação à tomografia de refração é de que as velocidades em subsuperfície devem aumentar com o aprofundamento das camadas geológicas, já que isto permitirá a refração crítica da onda na interface entre as camadas.

É interessante observar também uma comparação entre os métodos sísmicos clássicos e a tomografia sísmica. A tomografia sísmica difere dos métodos clássicos não só pela forma de aquisição dos dados mas principalmente pelas técnicas de interpretação dos mesmos. Enquanto os métodos clássicos são baseados em considerações geométricas e idealizações matemáticas de camadas refratoras, a tomografia, parte de um modelo inicial de velocidade, resolve iterativamente o problema para determinar os tempos de trânsito teóricos e inverte os dados. Em muitas aplicações, utiliza-se um dos métodos clássicos como a *Time-term Inversion* para fornecer o modelo inicial para a tomografia. Na tabela 15, retirada de Cavacundo (2015), há uma breve comparação entre alguns exemplos de sísmica clássica e a tomografia sísmica.

Assim, a partir do desafio de identificar a subsuperfície terrestre, utilizando as ondas sísmicas e o conceito de traçamento de raios, foram elaborados diversos estudos sobre o tema. No trabalho de Cutler et al. (1984), onde é apresentada uma formulação e metodologia da tomografia, o método é apresentado como uma técnica matemática para combinar características dos caminhos, ao longo de um meio físico, percorridos pelos raios. É assim, considerada uma técnica de inversão de dados, ou seja, participa de um fluxo de etapas iterativo. Cutler et al. (1984), explicou a tomografia sísmica de reflexão da seguinte maneira:

Comparação: Métodos Clássicos versus Tomografia	
Métodos Clássicos	Tomografia
<b>Exemplos</b>	
Método de reciprocidade generalizada (GRM)	Algoritmo de <i>Raytracing</i>
Método do tempo de atraso	Solução numérica da equação eikonal
Método do tempo de interceptação	→ WET: <i>Wavepath Eikonal Travelttime</i>
Método do mais-menos	→ Generalized Simulated Annealing
<b>Modelos de Velocidade</b>	
Camadas definidas por interfaces, podendo ser inclinadas	Interface entre as camadas não é claramente definida
Camadas com velocidades contantes: variações laterais podem ser obtidas com a divisão das camadas por "blocos" finitos	Variação lateral e vertical gradual: pode ser difícil distinguir interfaces ou variações abruptas de velocidade
Número limitado de camadas	Número de camadas ilimitado
Velocidade aumenta com a profundidade	É possível observar inversões de velocidade
Geralmente, exigem mais subjetividade	Geralmente, requer menos subjetividade

Tabela 15 – Tabela comparando os métodos convencionais de sísmica de refração e a tomografia. Fonte: Cavacundo (2015)

"A essência da tomografia sísmica é construir um modelo que se aproxime do conhecimento da subsuperfície atual para assim calcular as trajetórias teóricas para cada refletor e para cada par de fonte-receptor, traçando raios através do modelo; definir os tempos de trânsito das reflexões a partir dos traços observados adequados; e modificar o modelo de velocidade através das trajetórias dos raios teóricos que o percorreram, minimizando a diferença entre os tempos observados e os calculados. O modelo de velocidade é modificado, invertendo uma versão linearizada da equação de mínimos quadrados. Finalmente, todo o processo é iterado pelo traçamento de raios através do modelo de velocidade ajustado, iniciando as etapas novamente. Se a inversão tiver sido devidamente regularizada (estabilizada), este procedimento convergirá para uma solução do problema de mínimos quadrados não lineares em poucas iterações (tipicamente de três a cinco iterações). (CUTLER et al., 1984)"

A tomografia sísmica de refração segue os mesmos princípios observados acima e isto guiará todo o estudo nesta dissertação. Deve se apontar também que as tomografias de reflexão e refração podem ser classificadas como (JONES, 2010):

1. Tomografia de tempo de trânsito: apenas se consideram os tempos de trânsito da onda entre cada par fonte-receptor;
2. Tomografia da forma da onda: considera a forma da onda ao atingir o receptor.

### 1.5.1 Tomografia: inversão a partir de tempos de trânsito

Várias estratégias de modelagem são aplicadas para quantificar e identificar as propriedades físicas da subsuperfície. No caso da tomografia, utiliza-se o tempo de trânsito.

Assim, baseado nas leis de propagação de ondas acústicas, segundo Vidale (1988), o primeiro *software* para traçar raios em ambientes complexos foi desenvolvido nos anos 70 no trabalho de Cerveny et al. (1977). O método de traçamento de raios foi realizado através de uma solução numérica de equações de traçado de raios 2D juntamente com uma determinação automática dos ângulos de trânsito destes raios. A resposta do modelo era otimizada iterativamente ao aproximar um melhor ajuste aos tempos de trânsito observados. Já, em 1992, Zelt e Smith implementaram neste algoritmo uma aproximação através de mínimos quadrados amortecidos. Este novo algoritmo apresentou bons resultados e ao longo do tempo, foram feitas melhorias sobre ele, como a modificação na parametrização do modelo (VIDALE, 1988).

Então, com a possibilidade de calcular o traçado de raios, poderia-se obter as amplitudes sintéticas e comparar com as observadas. A tomografia de tempo de trânsito tirou partido deste cálculo e como Vidale (1990) bem definiu:

"A tomografia de tempo de trânsito é uma inversão que utiliza um algoritmo iterativo de primeiras chegadas, no qual uma rotina de inversão regularizada é computada sobre um *grid*, realizado a partir da discretização do meio, utilizando uma extrapolação de diferenças finitas."