



William Corrêa de Oliveira Junior

**Modelagem de Dados de Refração Sísmica Profunda utilizando
Traçado de Raios**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
Agosto 2012

William Corrêa de Oliveira Junior

**Modelagem de Dados de Refração Sísmica Profunda utilizando
Traçado de Raios**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador: Prof. Dr. Fábio André Perosi

Rio de Janeiro

Agosto 2012

WILLIAM, Corrêa de Oliveira Junior

Modelagem de Dados de Refração Sísmica Profunda utilizando Traçado de Raios / William Corrêa de Oliveira Junior - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2012.

44 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2012.

Orientador: Fabio Perosi, 1. Geologia. 2. Geofísica – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Fabio André Perosi. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. **Modelagem de Dados de Refração Sísmica Profunda utilizando Traçado de Raios**

William Corrêa de Oliveira Junior

Modelagem de Dados de Refração Sísmica Profunda utilizando Traçado de Raios

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador: Prof. Dr. Fábio André Perosi

Aprovada em: 30. Agosto, 2012

Por:

Orientador: Prof. Dr. Fábio André Perosi (UFRJ)

Prof. Dr. Antônio Nuno de Castro Santa Rosa (UnB)

Prof. Dra. Gleide Alencar do Nascimento Dias (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
Agosto 2012

À minha família, com toda gratidão e carinho.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal do Rio de Janeiro, aos professores e amigos que estiveram comigo durante esses anos de aprendizado seja em sala de aula e trabalhos de campo.

Ao professor Fábio André Perosi por toda colaboração e suporte para a realização desse trabalho. E também todos do Laboratório de Geofísica.

Agradeço principalmente a Vânia de Lourdes Carvalho de Oliveira, William Corrêa de Oliveira, Thales Carvalho de Oliveira, Monique Louise Carvalho de Oliveira e Luiza Cordeiro Rebelo por todo apoio, nos momentos de felicidade e também de tristeza, por todo esforço para que eu conseguisse alcançar meus objetivos e me tornar a pessoa que sou hoje, por estar sempre comigo independente da distância.

Agradeço a Deus, Família e Amizade.

Sumário

Agradecimentos.....	v
Sumário.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de tabelas.....	ix
Resumo.....	x
Abstract.....	1
1 INTRODUÇÃO	2
2 OBJETIVO.....	3
3 CONCEITOS BÁSICOS.....	4
3.1 Crosta.....	4
3.2 Manto.....	4
3.3 Litosfera e Astenosfera.....	4
3.4 Teoria da Elasticidade.....	5
3.5 Teoria de Ondas.....	5
3.5.1 Ondas planas.....	5
3.5.2 Ondas Esféricas.....	5
3.6 Teoria de Raios.....	6
3.7 Espalhamento dos Raios.....	9
3.8 Refração Sísmica Profunda.....	9
3.8.1 Tempo reduzido.....	10
3.8.2 Possíveis Adversidades.....	10
3.8.3 Generalidades.....	10
4 ARCABOUÇO TECTÔNICO.....	12
4.1 Localização e embasamento Tectônico.....	12
4.2 Faixa Araguaia.....	14
4.3 Faixa Brasília.....	14
4.3.1 Arco Magmático de Goiás.....	14
4.3.2 Maciço de Goiás.....	15
4.3.3 Faixas Dobradas e Empurrões de Antepais.....	15
4.4 Cráton São Francisco.....	15
4.5 Sequência Cronológica.....	15
5 METODOLOGIA.....	16
5,1 O Programa SAC.....	16
5,2 O Programa MacRay.....	18
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
6.1 Introdução.....	19
6.2 Resultados do programa SAC.....	19
6.3 Resultados do programa MacRay.....	24
6.4 Discussões	25
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
Referências bibliográficas.....	40
Apêndice A – Dados das leituras no programa SAC.....	41

Lista de Figuras

- Figura 1** - O movimento de uma partícula numa onda P unidimensional é transmitido com uma serie de rarefações e contrações paralelas ao eixo xx. [p.5]
- Figura 2** - Onda esférica se propagando, os raios são perpendiculares a frente de onda. (Boyd, 1999). [p.6]
- Figura 3** - Princípio de Huygens, propagação de onda e criação frentes de ondas secundárias. [p.7]
- Figura 4** - Raios refletidos e refratados, Lei de Snell. [p.8]
- Figura 5** - Mapa geológico da Província Tocantins com a localização dos experimentos de refração sísmica profunda e região de estudo. (Perosi, 2000) [p.13]
- Figura 6** - Mapa geológico em detalhe da área de estudo, com a localização dos experimentos de refração sísmica profunda e região de estudo. [p.14]
- Figura 7** - Sismograma visualizado no SAC observa-se as chegadas das ondas P e S. [p.17]
- Figura 8** - Seção sísmica do tiro ex11 (leitura do tiro direto), com as chegadas das ondas P. [p.20]
- Figura 9** - Seção sísmica do tiro ex12 (leitura do tiro reverso), com as chegadas das ondas P. [p.21]
- Figura 10** - Seção sísmica do tiro ex12 (leitura do tiro direto), com as chegadas das ondas P. [p.22]
- Figura 11** - Seção sísmica do tiro ex13 (leitura do tiro reverso), com as chegadas das ondas P. [p.23]
- Figura 12** - Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 1 direto – Modelo Final. [p.26]
- Figura 13** - Traçado de raios Seção 1. Tiro 1 direto – Modelo Final. [p.26]
- Figura 14** - Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 3 reverso – Modelo Final. [p.27]
- Figura 15** - Traçado de raios Seção 1. Tiro 3 reverso – Modelo Final. [p.27]
- Figura 16** - Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 1 direto e tiro 3 reverso – Modelo Final. [p.28]
- Figura 17** - Traçado de raios. Seção 1. Tiro 1 direto e tiro 3 reverso – Modelo Final. [p.28]
- Figura 18** - Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 2 reverso – Modelo Final. [p.29]
- Figura 19** - Traçado de raios. Seção 1. Tiro 2 reverso – Modelo Final. [p.29]

Figura 20 - Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 2 direto– Modelo Final. [p.30]

Figura 21 - Traçado de raios. Seção 1. Tiro 2 direto – Modelo Final. [p.30]

Figura 22 - Traçado de raios. Seção 1. Tiro 2 direto e reverso – Modelo Final. [p.31]

Figura 23 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Modelo Final. [p.32]

Figura 24 - Traçado de raios. Seção 1. Modelo Final. [p.32]

Figura 25 - Sobreposição da seção sísmica do tiro direto ex11 - curva caminho-tempo. [p.33]

Figura 26 - Sobreposição da seção sísmica tiro reverso ex12 - curva caminho-tempo. [p.34]

Figura 27 - Sobreposição da seção sísmica tiro direto ex12 - curva caminho-tempo. [p.35]

Figura 28 - Sobreposição da seção sísmica tiro reverso ex13 - curva caminho-tempo. [p.36]

Figura 29 - Modelo de Velocidades Final. Os valores em preto e branco representam a velocidades das ondas P. [p.37]

Figura 30 - Modelo Geológico Final. [p.38]

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Leitura dos tempos para o tiro ex11, e dados adicionais. [p.16]

Tabela 2 – Valores de velocidade das ondas P, S e densidade. Associados diversos materiais. [p.24]

Tabela 3 – Leituras realizadas a partir do programa SAC. Ex11 até Ex12 (Tiro direto) e Ex12 até Ex11 (tiro reverso). [p.41]

Tabela 4 - Leituras realizadas a partir do programa SAC. Ex12 até Ex13 (Tiro direto) e Ex13 até Ex12 (tiro reverso). [p.42]

Tabela 5 – Leituras realizadas a partir do programa SAC. Ex11 até Ex13 (Tiro direto) e Ex13 até Ex11 (tiro reverso). [p.43]

Resumo

CORRÊA, William. Modelagem de Dados de Refração Sísmica Profunda utilizando Traçado de Raios. 2012. 44 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A partir de dados obtidos em um levantamento de Refração Sísmica Profunda no setor central da Província Tocantins, compreendendo a região da Faixa Araguaia e a Faixa de Dobramentos Brasília, apresenta-se o objetivo que é determinar um modelo de velocidades sísmicas para a porção da crosta superior e intermediária modelo de velocidades sísmicas para a crosta superficial e intermediária. Utilizou-se um segmento de 100 km dessa linha sísmica contendo 3 pontos de tiro (nos extremos e no centro do arranjo) e 20 pontos de registros independentes, sincronizados por GPS. Como resultado obtemos um modelo de velocidades sísmica que apresenta dois principais refratores: o primeiro, apresentando profundidades entre 1000 m (oeste) e 1125 m (leste) com velocidades variando de 2,90 km/s até 5,05 km/s, respectivamente, indicando possível presença de basalto (de oeste a leste); o segundo, apresentando profundidades entre 4090 m (oeste) e 3410 m (leste) com velocidades variando de 5,87 km/s (nos extremos) até 5,93 km/s (na porção central), indicando possível presença de rochas de origem granítica.

Palavras-chave: Modelo de Velocidades Sísmicas; Refração Sísmica Profunda; Traçado de Raios.

Abstract

CORRÊA, William. **Forwarding Modelling of Deep Seismic Refraction Data using Ray Tracing**. 2012. 44 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

From data obtained in a survey of Deep Seismic Refraction in the central sector of Tocantins Province, comprising the region of the Araguaia Belt and the Brasília Fold Belt, it was determined a seismic velocity model for the upper and middle crust. It was used a 100 km segment of seismic line containing three shotpoints (at the ends and center of the array) and 20 independent record points, synchronized by GPS. As a result, it was obtained a seismic velocity model having two main refractors: the first, with depths between 1000 m (west) and 1125 m (east) with velocities ranging from 2.90 km/s to 5.05 km/s, respectively, the second, with depths between 4090 m (west) and 3410 m (east) at velocities ranging from 5.87 km/s (at the ends) to 5.93 km/sec (central portion).

Key-Words: Seismic Velocities Model; Deep Seismic Refraction; Ray Tracing.

1 INTRODUÇÃO

Os dados sísmicos e sismológicos são importantes fontes de informação para compreendermos o interior do nosso planeta. As geometrias dos arranjos para coletar os dados sísmicos podem ter várias escalas e nos experimentos de Refração Sísmica Profunda (RSP) esses arranjos podem chegar a centenas de quilômetros para obter informações sobre a crosta terrestre até mais profundas do que a descontinuidade de Mohorovicic. No Brasil foram executados poucos perfis de Refração Sísmica Profunda (RSP). Neste trabalho foram utilizados dados do Projeto Temático “Estudos Geofísicos e Modelos Tectônicos dos Setores Central e Sudeste da Província Tocantins, Brasil Central”, que foi o pioneiro no Brasil feito especificamente para este fim.

No Capítulo 2 é apresentado o objetivo deste trabalho que é gerar um modelo de velocidades sísmicas e no Capítulo 3 são apresentados conceitos básicos sobre os principais aspectos geológicos da região estudada e teorias que se fazem necessárias para a compreensão da metodologia utilizada. As principais estruturas tectônicas, arcabouço tectônico e a geologia regional são descritas no Capítulo 4.

A metodologia utilizada é expressa no Capítulo 5, apresentando e explicando o trabalho realizado nos programas SAC (Seismic Analysis Code; Tapley and Tull, 1991) e MacRay. No Capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos e os discutimos, incluindo seções sísmicas com a união dos dados de leitura na plataforma SAC. Apresenta-se também o modelo final de velocidade compilando informações das curvas caminho-tempo e traçados de raios gerados pelo programa MacRay, e a sobreposição de seções sísmicas das ondas P com as curvas caminho-tempo de forma a afirmar o resultado. No Capítulo 7 apresentam-se as Considerações Finais.

2 OBJETIVOS

Determinar um modelo de velocidades sísmicas para a porção da crosta superior e intermediária na região de estudo, utilizando o método geofísico de Refração Sísmica Profunda, aplicando modelagem por traçado de raios conjuntamente com conhecimentos geológicos e geofísicos e *softwares* que permitam elaborar um modelo satisfatório.

3 CONCEITOS BÁSICOS

Por se tratar de um trabalho de Refração Sísmica Profunda, certos conceitos geológicos e geofísicos são imprescindíveis, tais como, definições de crosta e manto e a teoria da elasticidade e propagação de ondas aplicadas ao interior terrestre. Abaixo esses conceitos são apresentados:

3.1 Crosta

A definição de Crosta na visão sismológica segundo Meissner (1986), diz que é a cobertura externa do planeta na qual a velocidade das ondas compressoriais (ondas P) é menor 7,6 km/s ou a velocidade das ondas de cisalhamento (ondas S) que 4,4 km/s. Porém existe uma sobreposição entre as velocidades devido a transição crosta profunda (“fria”) e manto superior (“quente”), essa interface recebeu o nome de Descontinuidade de Mohorovicic quando em 1909, Andrija Mohorovicic percebeu o aumento de velocidade das ondas sísmicas compressoriais em profundidades de dezenas de quilômetros. A Descontinuidade de Moho é uma interface irregular com grandes profundidades variando de 36 a 44 km, podendo se apresentar maior em cadeias de montanha como Himalaia.

De acordo com a gravimetria, Crosta é a camada externa na qual a densidade das rochas é menor que 3,1 g/cm³. E de acordo com a geologia, Crosta é a camada externa da Terra constituída por sedimentos, gnaisses, granito, granodiorito, gabro, anfíbolito, e granulito, na porção continental, onde se podem encontrar espessuras variando de 20 a 70 km, porém essa composição não é uniforme devido a correntes convectivas atuantes no interior da Terra que reciclam e misturam os sedimentos. Na porção oceânica, que é mais fina com espessuras de até 5 km podendo aumentar em direção ao continente devido a deposição de sedimentos provenientes da erosão continental, temos sedimentos, basaltos, gabros e serpentinitos. Vale ressaltar que a espessura da Crosta Oceânica é quase constante desde sua criação nas dorsais oceânicas.

3.2 Manto

Segundo Meissner (1986), a definição de Manto ocorre de acordo com o uso de critérios como velocidade sísmica, afirmando que Manto é a zona da crosta com velocidades das ondas P maiores que 7,6 km/s ou as velocidades das ondas S maiores que 4,4 km/s. A definição por densidade diz que Manto é a zona com densidade maior que 3,1 g/cm³, e para geologia, define-se Manto como a porção na qual se predomina as rochas ultramáficas como peridotitos e eclogitos.

3.3 Litosfera e Astenosfera

A Litosfera pode ser definida porção superior da Terra, móvel e rígida, de alta viscosidade, com espessuras variando de 50 a 100 km abaixo dos oceanos e 100 a 200 km abaixo dos continentes.

Astenosfera possui menos rigidez devido a temperaturas mais elevadas a que é submetida. A base da astenosfera situa-se a uma profundidade de aproximadamente 700 km. Sob a litosfera oceânica o topo da astenosfera é caracterizado pelo aparecimento da zona de baixa velocidade, onde ocorre uma redução de 3 e 6% na velocidade das ondas P e S.

3.4 Teoria da Elasticidade

Essa teoria diz respeito às deformações sofridas por um material elástico quando sujeito a tensão. Quando uma tensão é aplicada sobre um material, o resultado é a sua deformação, ou seja, deslocamento de suas partículas das posições iniciais. E em muitas situações esses deslocamentos são reversíveis, como quando a força é removida, assim as partículas voltam às suas posições iniciais.

A Teoria da Elasticidade é essencial para sismologia, pois ondas sísmicas são propagações de deformações elásticas no interior da Terra. Na teoria, o meio é composto por partículas compactadas, que são consideradas funções contínuas e diferenciáveis, as tensões e deformações sofridas são registradas por tensores de esforço e deformação.

Combinando a Teoria da Elasticidade com a Lei de Hooke, que relaciona tensão com deformação, e a Lei de Newton, que relaciona força (tensão) com aceleração, utilizando constantes elásticas e a densidade chega-se a equação da onda.

3.5 Teoria de Ondas

No estudo da física, onda é uma perturbação que se propaga no espaço ou em qualquer outro meio, transporta energia mediante um campo oscilante ou perturbação de um meio elástico, podendo ser denominadas ondas eletromagnéticas ou mecânicas. As ondas podem se classificar de acordo com a direção de propagação de energia, quanto à natureza das ondas e quanto à direção de propagação. Para descrever uma onda é necessária uma série de grandezas, entre elas temos: velocidade (V), amplitude (A), frequência (f), período ($T= 1/f$) e o comprimento de onda (λ).

A equação de onda “clássica” e fundamental ligada à propagação de ondas é:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \mathbf{y} \quad (1)$$

Desta equação pode-se derivar o conceito de ondas planas, aplicado sismologia.

Para entender melhor como a Lei de Newton e a Lei de Hooke chegam na equação da onda e suportam a teoria de ondas sísmicas, podemos explicar da seguinte forma: a passagem de uma onda produz um deslocamento u e uma força F_x em uma direção x . Na posição $x + dx$ é de $u + du$ e a força $F_x + dF_x$. Se dx representa o comprimento infinitesimal de um pequeno elemento de volume cuja massa é $\rho dx A_x$. A força F_x é causada pela componente da tensão σ_{xx} , que atua na área A_x e que é igual a $\sigma_{xx} A_x$.

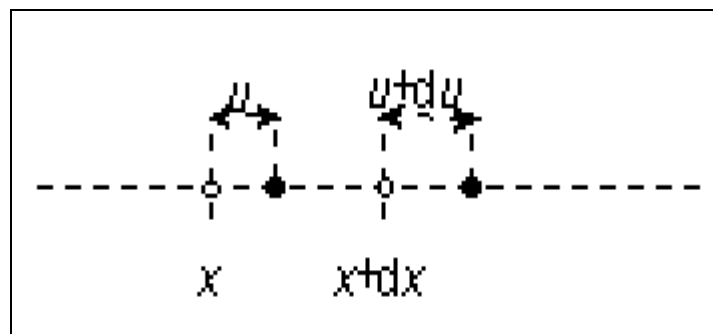


Figura 1 – O movimento de uma partícula numa onda P unidimensional é transmitido com uma série de rarefações e contrações paralelas ao eixo xx .

Podemos descrever a equação do movimento unidimensional, usando a 2ª lei de Newton:

$$(\rho dx A_x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = dx A_x \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \quad (2)$$

A definição do modelo de Young, E , e da deformação normal, permite escrever:

$$\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx} = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

Substituindo nas equações anteriores, obtemos a equação da onda unidimensional:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

O conceito de Frente de Onda pode ser aplicado tanto em ondas planas como esféricas. E a frente de onda é definida como o lugar onde a onda se encontra após ter transcorrido determinado tempo. Em meios homogêneos e isotrópicos as ondas providas de uma fonte pontual se propagam esfericamente. (Perosi, 2000). Na figura 1, abaixo mostramos a propagação de uma onda esférica e os raios perpendiculares à frente de onda.

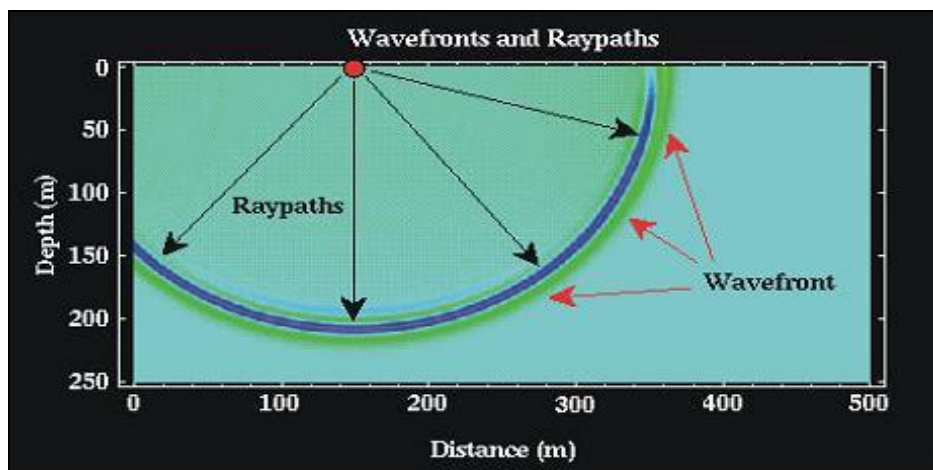


Figura 2 - Onda esférica se propagando, os raios são perpendiculares a frente de onda. (Boyd, 1999)

3.6 Teoria de Raios

Para propagação de ondas, raios são linhas utilizadas para auxiliar a visualização do caminho percorrido por uma onda. Sabemos que distância entre duas frentes de onda é o comprimento de onda (λ), a onda possui frequência (f), e se movimenta com uma velocidade de fase (v). Assim temos:

$$v = \lambda \cdot f \quad (5)$$

Equação Iconal

A Equação do Iconal (Eikonal Equation) é uma equação diferencial parcial não-linear utilizada em problemas de propagação de ondas. Na ótica ela relaciona a ótica física (as ondas) com a ótica geométrica (os raios), analogamente ela é muito importante na sismologia, pois relaciona as ondas sísmicas com os raios sísmicos.

O traçado de raios e a aplicação numérica da equação iconal envolvem o conhecimento explícito da distribuição das velocidades intervalares em subsuperfície. Por essa razão, essas técnicas aplicadas em situações particulares, como na modelagem, na migração em profundidade e na inversão de dados sísmicos. (Rosa, 2010).

Mas nesse trabalho daremos prioridade à interpretação dos modelos gerados através da modelagem dos raios sísmicos e não as formas de solução da equação iconal.

A forma mais simples da equação iconal é essa:

Perceba que ela relaciona o inverso da velocidade tempo pela distância, em sismologia chamamos de vagareza.

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{v^2} \quad (6)$$

Princípio de Huygens

“Todos os pontos do meio atingidos por uma frente de onda comportam-se como fontes pontuais de frentes de ondas secundárias.”. As leis de Reflexão e Refração podem ser explicadas por estes principio. Depois de certo tempo ‘t’, a nova posição da frente de onda será dada por uma superfície envoltória dessas frentes de ondas secundárias (Bullen, 1985). Na figura 2 abaixo, ilustramos o principio de Huygens, demonstrando a propagação de onda e a criação de ondas secundárias.

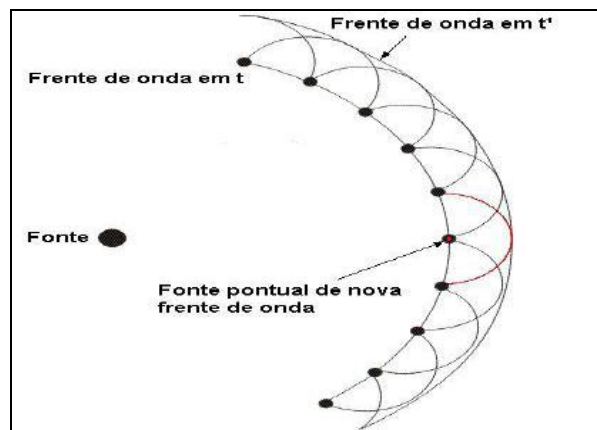


Figura 3. Princípio de Huygens, propagação de onda e criação frentes de ondas secundárias.

Princípio de Fermat.

Fermat demonstrou matematicamente que “entre os possíveis raios que ligam determinados pontos, o raio estacionário tem um tempo de propagação estacionário”, ou seja, o raio percorre o caminho onde o tempo é mínimo.

Lei de Snell

Descreve a relação entre os ângulos de incidência e refração, quando uma onda passa através de uma interface entre dois meios com diferentes velocidades de propagação. Se a velocidade de propagação é V_1 , ao ser transmitido para outro meio com velocidade V_2 , sofrerá refração e os ângulos de incidência θ_1 , e refração θ_2 , respeitam a relação dada pela lei de Snell, como ilustrado na figura 3.

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (7)$$

No caso do ângulo de incidência alcançar um determinado valor onde o ângulo de refração é igual a 90° , o raio refratado será tangente a interface e denominado ângulo crítico (θ_c) e para incidências acima deste valor, ocorre o fenômeno de reflexão total, onde $V_2 > V_1$.

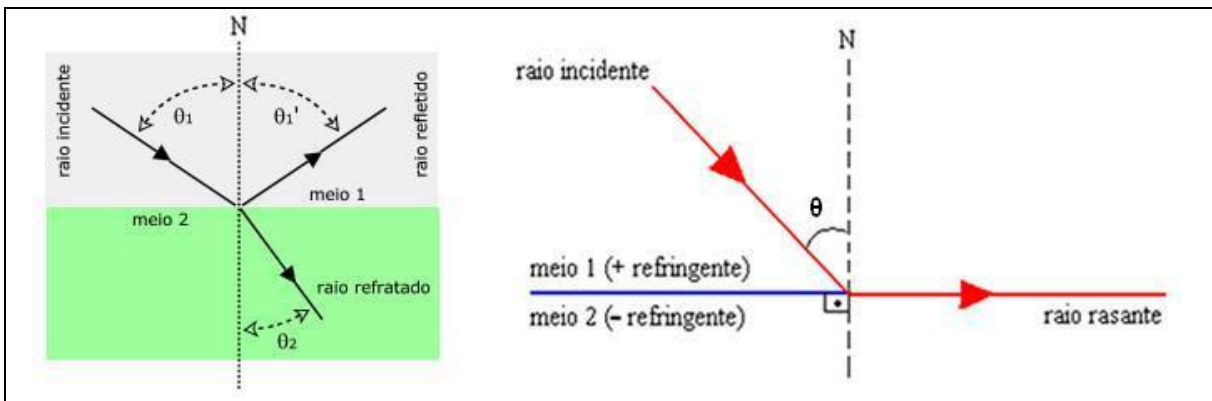


Figura 4 – Raios refletidos e refratados, Lei de Snell.

Em refração sísmica o raio utilizado nos experimentos incide no topo da camada inferior com velocidade (V_1) mais alta, com o ângulo crítico (ou próximo a ele), e percorre caminho horizontal ao longo da camada com velocidade V_2 , e em seguida é refratado de volta para a superfície com o mesmo ângulo. O parâmetro para definir o parâmetro de raio p (parâmetro p), é de grande importância, pois é um identificador de raios. Essa razão é constante para qualquer raio com um ângulo inicial de penetração na Terra e descreve cada meio em termos da velocidade na superfície V° e de seu ângulo de emergência i° .

$$\frac{\sin i}{V_i} = \frac{\sin i^\circ}{V^\circ} = p = \text{CONSTANTE} \quad (8)$$

Reflexão

É um método de prospecção geofísica que utiliza os princípios da sismologia para estimar as propriedades da subsuperfície da Terra com base na reflexão de ondas sísmicas. Quando uma onda longitudinal atinge duas camadas com impedância acústicas contrastantes, parte da onda é refletida e parte penetra na camada seguinte. O ângulo de incidência do raio é igual ao ângulo do raio refletido. Este ângulo é medido em relação a uma linha imaginária normal à superfície refletora (interface entre meios de diferentes propriedades).

Reflexão Total

Existe uma situação em que o raio refratado será quase paralelo à superfície. Aumentando um pouco mais o ângulo de incidência, ao chegar ao ângulo crítico o feixe refratado desaparece e assim, raio é totalmente refletido. Esse fenômeno chama-se reflexão total. Para que isso aconteça, é preciso que a luz seja proveniente de um meio mais refringente em relação ao outro ($N_1 < N_2$).

Refração Crítica

A refração total ou crítica vai ocorrer quando a onda atingir uma interface com um meio de maior velocidade, cujo raio sísmico faça um ângulo de incidência tal, cujo ângulo de refração resulte em um ângulo reto (90°). Este ângulo de incidência é denominado de ângulo crítico.

3.7 Espalhamento dos Raios

Segundo Bullen (1985), existem três possibilidades de espalhamento de onda:

O primeiro caso ocorre se os obstáculos são muito menores, quando comparados os comprimento de onda da onda incidente. Quando passam por uma região com grande número de pequenos espalhamentos, as ondas sísmicas interferem com as outras e formam trens de ondas, coerente ou não, dependendo do espelhamento que os obstáculos causarão.

No segundo, se a onda incide em um obstáculo muito maior que seu comprimento de onda, aplicam-se as suposições de ótica geométrica e teoria do raio. Assim, as ondas são tratadas como refletidas e refratadas numa interface.

No terceiro, obstáculos e comprimentos de onda possuem a mesma ordem de grandeza, ocorre difração, e as ondas são difratadas e espalhadas. Ao atingir um obstáculo a frente de onda se espalha em todas as direções e a ótica geométrica não pode ser aplicada, põem os Princípios de Huygens e Fermat são válidos.

3.8 Refração Sísmica Profunda

Refração sísmica profunda (RSP), ou “Deep Seismic Sounding” (DSS) tem como uma das principais finalidades, estudar grandes estruturas da crosta terrestre. Investigações sobre o embasamento cristalino da costa profunda da Terra até o manto superior são dominados pelo método de refração. A Refração Sísmica Profunda também pode ser chamada de Refração de Ângulo Amplo (“Wide-Angle Reflection”), eventos de ângulo amplo têm um registro mais claro, e provêm das interfaces de primeira ordem na forma de reflexões ou zonas de forte gradiente positivo de velocidade, e tem origem freqüente, da Descontinuidade de Moho.

A modelagem de sismogramas sintéticos melhorou a resolução dessas zonas e o comportamento das amplitudes. A avaliação destes eventos de ângulo amplo se tornou o ramo mais importante da interpretação de Refração Sísmica Profunda e é a base para perfis de velocidade-profundidade (modelo V-z) nos experimentos.

No método de Refração Sísmica profunda são utilizadas fontes de energia Principalmente ativas (explosões) e geofones registradores pra captar e armazenar as perturbações produzidas por estas fontes após percorrer as camadas do interior da Terra. Para este método deve-se usar um comprimento de Refração Sísmica Profunda de 8 a 6 vezes maior que a profundidade que se deseja estudar.

Os fundamentos do método de refração sísmica podem ser encontrados nos textos de prospecção sísmica, tais como Dobrin (1985), Sheriff & Geldart (1982).

3.8.1 Método de Tempo Reduzido

Serve para melhorar a correlação dos tempos de propagação, os tempos de chegadas são reduzidos, e assim é possível ter uma visão ampliada das fases em relação ao tempo normal. O Tempo Reduzido poder ser negativo (não existe tempo negativo, mas o Tempo Reduzido é uma equação matemática, não é o tempo no sentido físico).

Temos que:

$$tr = t - \frac{x}{Vr} \quad (9)$$

Onde x é distância entre fonte e receptor, Vr é velocidade usada para redução de tr é o tempo de propagação reduzido. Normalmente usa-se para Crosta $Vr = 6$ km/s e para o Manto Superior $Vr = 8$ km/s.

3.8.2 Possíveis Adversidades

É possível a ocorrência de camadas com Gradiente de Velocidade, no caso de gradiente positivo notamos curvas caminho-tempo curvilíneas e em gradientes negativos, a identificação direta com técnicas de refração sísmica não é possível. Podemos ter também a presença de Camadas Inclinadas, estas formam declives com um ângulo constante, para solucionar pode ser usado um ajuste, utilizando a mesma formulação matemática das camadas paralelas. A utilização de um tiro reverso detecta atrasos ou adiantamentos causados por essas camadas inclinadas, e combinando informações dos tempos de trajetória correspondentes as explosões das extremidades, estima-se a inclinação da interface.

3.8.3 Generalidades

Os levantamentos de Refração Sísmica Profunda são realizados em arranjos lineares na maioria dos casos. Existe um grande trabalho de correção dos tempos registrados, de acordo com parâmetros como altitude, hora da explosão, distâncias e estado do solo. Após as correções colocam-se os registros em escalas reduzidas, e normalizam-se os registros individuais para analisar as frequências e escolher o melhor filtro.

Basicamente as interpretações seguem três passos:

1. Avaliar uma dimensão da estrutura velocidade-profundidade por aplicação de métodos diretos e formulas simples.
2. Traçar raios para a verificação dos principais ramos das curvas caminho-tempo utilizando cálculos de modelos e rotinas de tentativa e erro no ajuste das velocidades e profundidades, objetivando encontrar um ajuste entre as curvas caminho-tempo calculadas e as observadas (ver Cerveny *et al*, 1977; apud Meissner, 1986).
3. Elaborar sismogramas sintéticos e suas variações para achar uma correspondência entre as amplitudes calculadas e observadas, entre as curvas caminho-tempo teóricas e reais, e finalmente para toda a seção sísmica, incluindo eventos múltiplos (Fuchs & Mueller, 1971; Braile & Smith, 1975; apud Meissner, 1986).

Na maioria das vezes somente dados estruturais são obtidos em um levantamento por refração sísmica, porém é possível reconhecer litologias dependendo das condições dos dados. Inicialmente os principais objetivos são reconhecer a forma e profundidade do embasamento e natureza ou tipo de rocha das unidades litológicas estudadas, de acordo com suas velocidades.

A identificação dos dados de refração são simples, porém encontra-se dificuldade quando existem grande números de refratores.

Para uma boa interpretação normalmente se usa as primeiras chegadas das ondas refratadas, pois permitem maior precisão na determinação dos tempos de propagação. As chegadas secundárias são utilizadas a partir da determinação de um ciclo posterior no trem de ondas e assim estima-se a propagação através do tempo medido.

4 ARCABOUÇO TECTÔNICO

4.1 Localização e embasamento Tectônico

A área de estudo corresponde a porção norte do estado de Goiás e Triângulo Mineiro. As 3 linhas de refração sísmica levantadas estão encontradas em territórios do estado de Goiás e Triângulo Mineiro.

A Província Tocantins, é uma mega-entidade litotectônica, de direção aproximadamente norte-sul com cerca de 1000 quilômetros de comprimento e até 400 de largura, erigida entre os Crátons Amazônico e São Francisco - Congo (Almeida et al., 1981) no ciclo orogenético Pan-Africano/Brasiliano, durante o Neoproterozóico, na ocasião em que se amalgamou o supercontinente do Gondwana (Unrug, 1992; Tromperre, 1994).

Devido a nova fragmentação do supercontinente a partir do Paleozóico-Mesozóico resultaram a abertura dos oceanos conhecidos hoje como Atlântico e Índico, e a separação dos continentes da América do Sul, África e Antártida, gerando o subcontinente da Austrália e o bloco continental da Índia.

Entende-se que a Província Tocantins formou-se devido à colisão dos Crátons Amazônico, São Francisco - Congo e o bloco continental Paranapanema, a porção central e sudeste da província registra uma grande variedade de terrenos geológicos que são considerados remanescentes do orógeno Neoproterozóico da América do Sul.

Compreende as faixas dobradas Araguaia e Paraguai, na margem do Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília estabelecida na margem do Cráton São Francisco, onde se encontra o Arco Magmático de Goiás (Pimentel *et al.* 1991, Pimentel & Fuck, 1992). A Faixa Brasília que é a unidade principal da Província Tocantins está dividida de oeste para leste em Arco Magmático de Goiás de idade Neoproterozóica, Maciço de Goiás do Arqueano/Paleoproterozóico e o cinturão de dobras e empurrões de antepais, com embasamento Paleoproterozóico, com grau metamórfico decrescendo para leste. O complexo Anápolis-Itauçu é exposto ao sul da região de estudo, em torno do eixo central desta faixa (Fábio Perosi, 2006).

Na figura 4 mostramos o Mapa geológico da Província Tocantins com a localização dos experimentos de refração sísmica profunda e região de estudo.

Na figura 5 a área de estudo que iremos utilizar neste trabalho em detalhe, com as explosões Ex11, Ex12 e Ex13, início e fim da porção estudada da Linha L1-Porangatu.

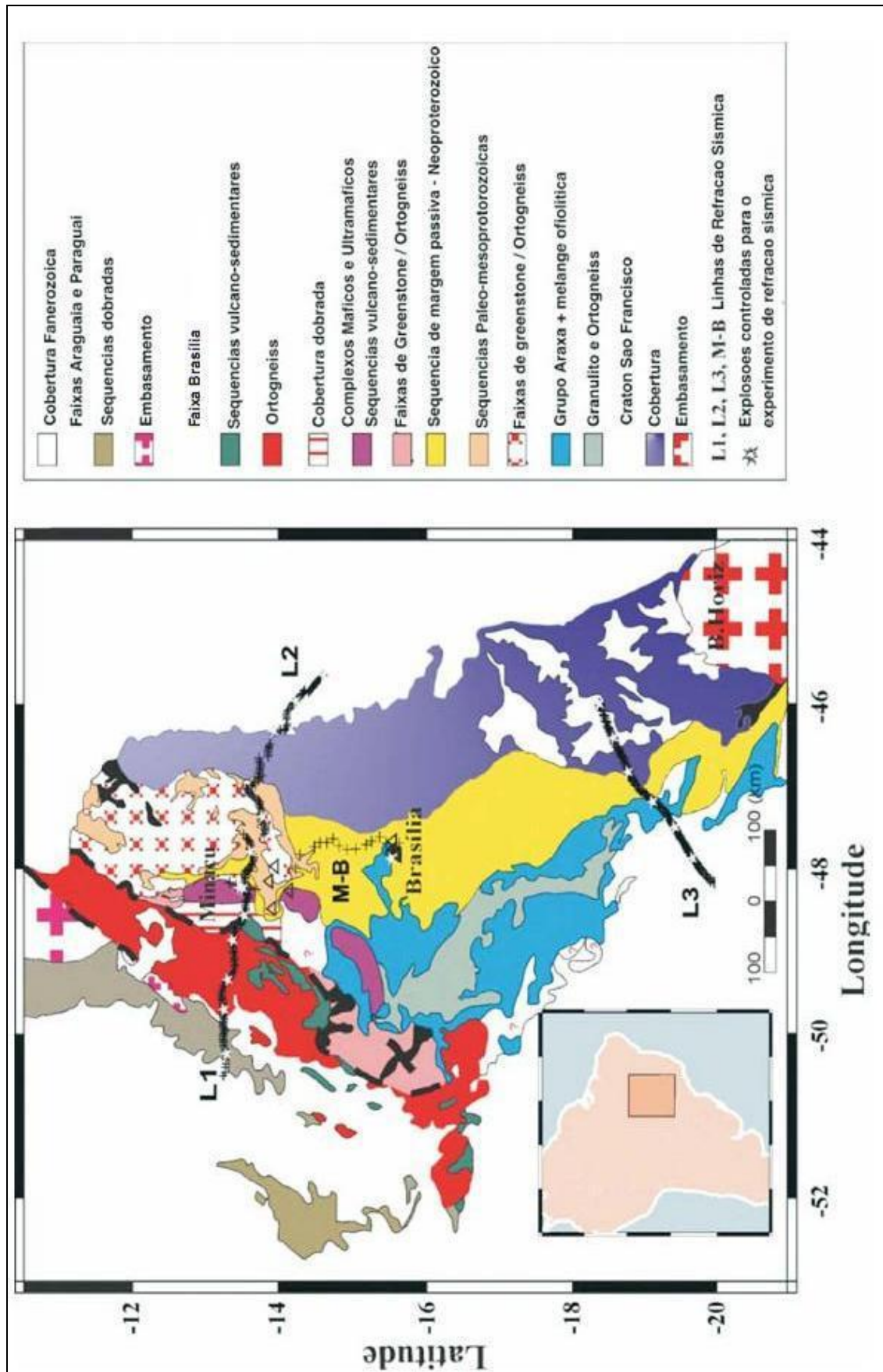


Figura 5 – Mapa geológico da Província Tocantins com a localização dos experimentos de refração sísmica profunda e região de estudo. (Perosi, 2000).

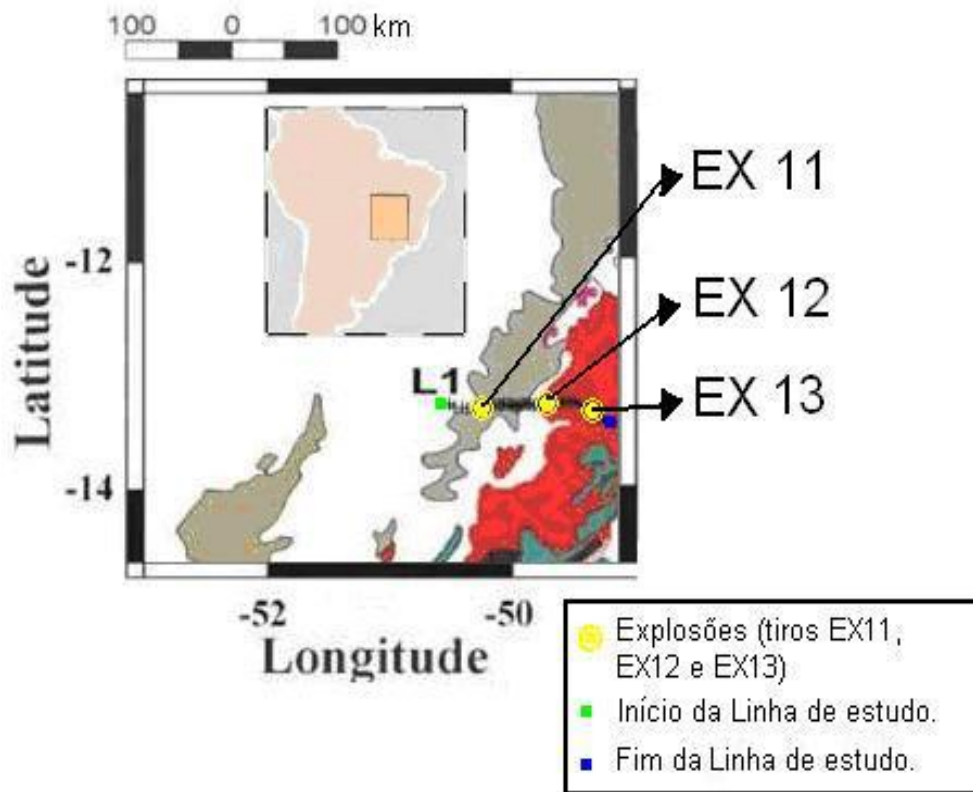


Figura 6 – Mapa geológico em detalhe da área de estudo, com a localização dos experimentos de refração sísmica profunda e região de estudo.

4.2 Faixa Araguaia

Apresenta rochas metassedimentares de idade Neoproterozóica dos grupos Estrondo e Tocantins, ortognaisses Arqueanos no embasamento do Cráton Amazônico para oeste e complexos Paleoproterozóicos de Rio dos Mangues e Porto Nacional a nordeste. Encontra-se na área um expressivo alinhamento de corpos máficos e ultramáficos de natureza ofiolítica em uma zona de falhas profundas.

4.3 Faixa Brasília

Edificada na borda ocidental do Cráton São Francisco, a Faixa Brasília estende-se por 1000 km, engloba terrenos com seqüências metassedimentares de idade proterozóica média a superior envolvidas na orogênese Brasileira.

4.3.1 Arco Magmático de Goiás

É um terreno jovem derivado de rochas metaplutônicas formador de um sistema arco de ilhas. Formado por Gnaisses derivados de rochas plutônicas, possui seqüência que vai de basalto a riolito. Basaltos possuem assinatura das ilhas vulcânicas do Pacífico indicando ambiente oceânico. Existem neste arco, gnaisses derivados de rochas plutônicas alcalinas e tonalíticas, rochas vulcanosedimentares, granitos e pequenos corpos ultramáficos que podem vir a ser testemunho da crosta oceânica inferior ou do manto residual. Tem limite a oeste marcado pelo Lineamento Transbrasiliano. No interior do Arco Magmático de Goiás encontra-se um corpo circular de anortosito com aproximadamente 15 km de diâmetro.

4.3.2 Maciço de Goiás

Formado por rochas do Arqueano e do Paleoproterozóico. Com registro de faixas de greenstone e complexos ultramáficos. As rochas do paleoproterozóico incluem um embasamento ortognaissico coberto por metassedimentos fortemente dobrados do Grupo Serra da Mesa, a leste encontram-se complexos ultramáficos de Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava e as sequências vulcanosedimentares associadas de Juscelandia, Idaianópolis e Palmeirópolis representam o limite leste do Maciço de Goiás. (Filho & Pimentel, 2000; Pimentel et al., 2000b; Pimentel, Filho & Armstrong, 2004). O limite a oeste entre o Maciço de Goiás e o Arco Magmático de Goiás do Neoproterozóico encontra-se nas zonas de cisalhamento Rio dos Bois e Mandinópolis. O Pluton Serra Dourada situado a leste da zona de cisalhamento e possui 65 km de comprimento por 20 de largura.

4.3.3 Faixas Dobradas e Empurrões de Antepais

Na região de estudo temos as rochas metassedimentares e metavulcânicas dos Grupos Araí e Paranoá correspondentes ao embasamento exposto e formam a parte leste da faixa de dobras e empurrões de antepais da Faixa Brasília, os contatos se apresentam na forma de falhas de empurrão e reversas com transporte tectônico em direção ao Cráton São Francisco. No Paraná ao longo da Serra Geral estão as faixas de dobras e empurrões de antepais que recobrem localmente e as rochas do embasamento do Cráton São Francisco. E na direção oeste temos uma zona de cisalhamento regional, o sistema de falhas Rio Maranhão representando o limite com o Maciço de Goiás. (Fonseca, Dardenne e Uhlein, 1995).

4.4 Cráton São Francisco

Na área de estudo encontram-se coberturas Neoproterozóicas do Supergrupo São Francisco em Goiás e as coberturas sedimentares da Formação Urucua de idade Fanerozóica no oeste da Bahia.

4.5 Sequência Geocronológica

As formações geológicas do Arqueano são representadas por granitos e granitóides retrabalhados no Ciclo Brasileiro. No Proterozóico Médio dessa região as formações geológicas correspondem a quartizitos e filitos carbonosos ou não da Formação Paracatu, temos também dolomitos e cherts, metapelitos e fostoritos correspondentes à Formação Vazante e quartizitos e filitos do Grupo Canastra e, granitos Caiapó correlacionados com a área de estudo.

O Proterozóico Superior apresenta micaxistos, anfíbolitos, quartizitos, gnaisses e formação ferrífera do grupo Araxá, filitos da Formação Rio Verde pertencentes ao Grupo Ibiá e Calcário, marga, dolomito, folhelho, argilito, silito, arcóseo e sílex restritos do Subgrupo Paraopeba (Grupo Bambuí – Supergrupo São Francisco).

O Mesozóico contém arenitos, arenitos calcíferos, conglomerados e calcários da Formação Marília (Grupo Bauru), atenção especial para basaltos toleiticos com intercalações de arenito e diabásio da Formação Serra Geral (Grupo São Bento) e arenitos, conglomerados e pelitos vulcanoclásticos da Formação Uberaba (Grupo Bauru). Possui registro da Suíte alcalina Salitre, Suíte Alcalina Araxá e Suíte Alcalina Tapira, arenitos sineríticos da Formação Capacete (Grupo Mata da Corda) e arenitos conglomerados, pelitos, calcretes e cherts do Grupo Areado.

5 METODOLOGIA

Utilizando dados de Refração Sísmica Profunda, provenientes do Projeto Temático “Estudos Geofísicos e Modelos Tectônicos dos Setores Central e Sudeste da Província Tocantins, Brasil Central” que possuem três linhas de refração, de aproximadamente 300 km de extensão, com explosões realizadas com espaçamento de 50 km e pontos de registros a cada 2,5 km, separamos um determinado trecho para que fosse realizado o atual trabalho. Foi selecionado um trecho com cerca de 100 km da linha L1-Porangatu e analisados somente dados com boas razões sinal/ruído nos pontos de registro.

5.1 O Programa SAC

O Programa SAC (Seismic Analysis Code; Tapley and Tull, 1991) é um programa utilizado como ferramenta de análise para estudo detalhado de eventos sísmicos. Utilizando o programa foram analisados os dados de chegada da onda P direta e refratadas nas diversas camadas da crosta e também ondas S. Foram obtidos dados de distancia (km) das estações até a fonte da explosão, tempos de chegada das ondas P e S, e velocidade das ondas P e S. Utilizando o Excel formamos tabelas com todos os dados obtidos. Na tabela abaixo temos os dados das explosões na linha 1, kstnm representam a posição do registrador (007-512 representa o numero do registrador e sua posição) e seu numero de identificação, Dist (km) representa a distância em km das estações até as fontes, tP e tS (s) são o tempo de chegada das ondas primárias P e secundárias S, tSteo (s) foi utilizado para estipular uma valor próximo da chegada das ondas S e o campo VaP e VaS correspondem as velocidades de P e S calculadas utilizando a distâncias e os tempos de P e S. Foi feito também o cálculo no Excel utilizando o método do Tempo Reduzido, afim de melhorar a análise dos dados. Na figura 6, temos uma figura de m sismograma realizado no SAC, onde foram retirados os dados citados acima.

Tabela 1 – Leitura dos tempos para o tiro ex11, e dados adicionais.

Dados	kstnm	Dist (km)	tP (s)	tS (s)	tSteo(s)	VaP(km/s)	VaS(km/s)
ex11_214.sacl	007-512	0,79072	0,18856	0,47186	0,32660	4,19	1,68
ex11_215.sacl	008-513	4,51434	0,79226	1,38030	1,37223	5,70	3,27
ex11_216.sacl	010-515	10,11813	1,70890	3,02020	2,95990	5,92	3,35
ex11_217.sacl	011-517	12,84639	2,13220	3,81130	3,69308	6,02	3,37
ex11_228.sacl	028-538	55,99193	9,32520	16,10200	16,15172	6,00	3,48
ex11_229.sacl	030-533	58,89232	9,89020	17,07500	17,13033	5,95	3,45
ex11_230.sacl	031-539	61,49422	10,20600	17,65500	17,67731	6,03	3,48
ex11_231.sacl	032-540	63,87794	10,62800	18,45100	18,40824	6,01	3,46
ex11_232.sacl	034-541	68,69479	11,42100	19,70600	19,78175	6,01	3,49
ex11_241.sacl	043-552	92,24148	15,22600	26,32900	26,37221	6,06	3,50
ex11_242.sacl	044-553	95,20715	15,72400	26,97300	27,23477	6,05	3,53
ex11_243.sacl	045-554	97,00914	16,09600	27,66300	27,87909	6,03	3,51
ex11_244.sacl	046-558	98,38993	16,47000	28,51600	28,52688	5,97	3,45

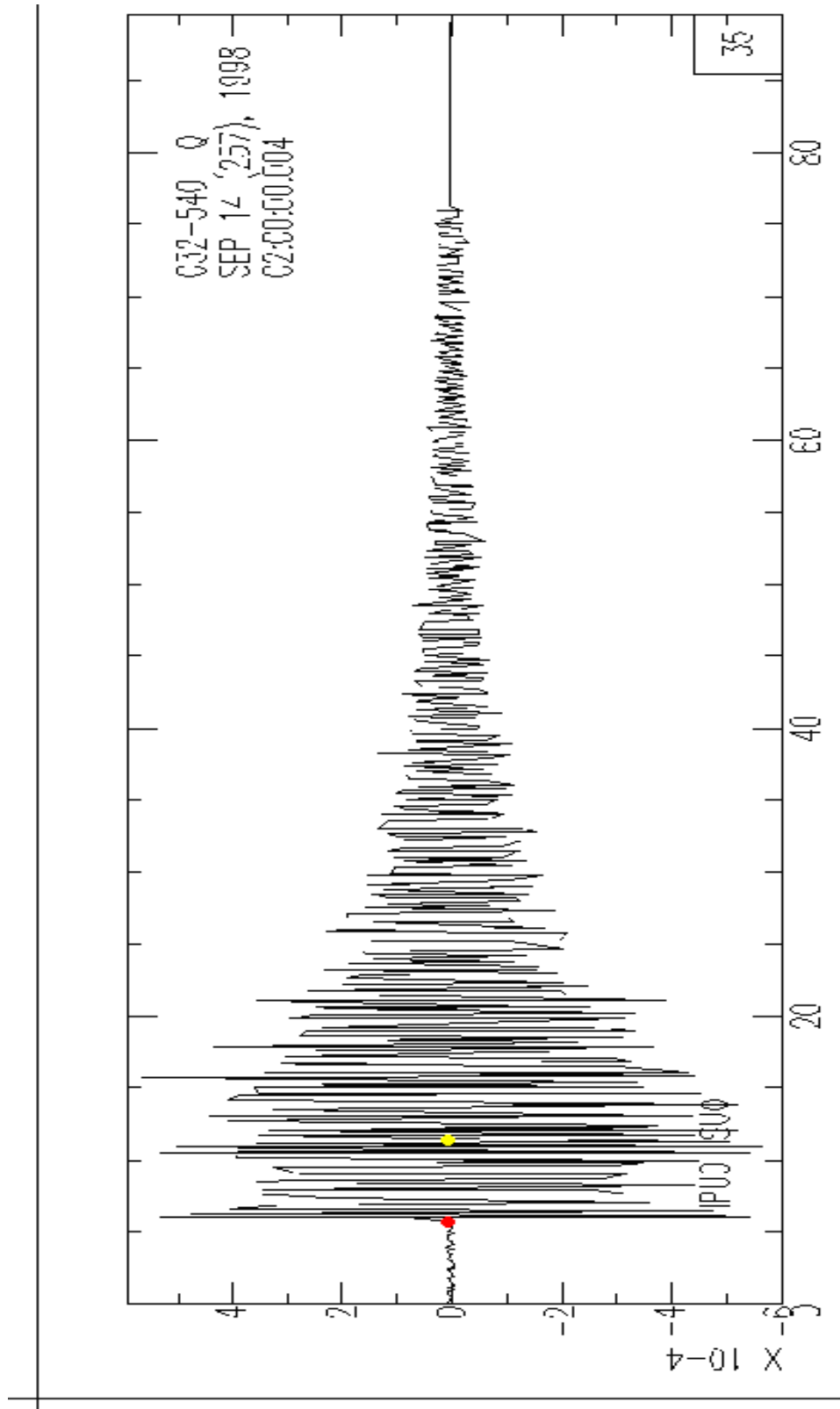


Figura 7 – Sismograma visualizado no programa SAC.

Observam-se as chegadas das ondas P (em vermelho) e S (em amarelo).

Na plataforma SAC uma das funções mais utilizadas foi a SSS (Signal Stacking Subprocess), onde foi feita a análise das diversas chegadas das ondas P, e editamos assim imagens para visualização de seções sísmicas de Distancia x Tempo dos tiros ex11, ex12 e ex13.

5.2 O Programa MacRay

O Programa MacRay escrito por Jim Luetgert (1992) do U.S. Geological Survey, indicado para modelagem de estruturas em duas dimensões, utiliza dados sísmicos, principalmente de refração. MacRay é um aplicativo desenvolvido para rastrear de forma iterativa raios sísmicos através de modelos de velocidades lateralmente homogêneos. Possui uma interface gráfica que possibilita a utilização de diversos recursos para modelagem e visualização imediata dos raios após qualquer modificação no modelo estrutural, assim facilitando a interpretação e a interação com o *software* por parte dos profissionais. Uma desvantagem é que o programa só funciona em computadores Macintosh.

Durante o trabalho foi utilizado um pré-modelo, baseado em estudos anteriores realizados na área de estudo. A aplicação se resume em carregar os dados correspondentes a localização da posição do registrador (kstnm), a Distância (Dist), a medida de Tempo Reduzido (tRed) e o peso de cada registro (grau de importância), que no caso foi utilizado 1 para todas amostras. Ao carregar os dados é feito o tratamento de cada seqüência do registro recebido, inicialmente da explosão ex11 até a segunda explosão ex12 e também as leituras reversas, cujas ondas provenientes da explosão ex12 caminhavam até a primeira explosão. A modelagem em simultaneamente a analisar os dados de refração sísmica e alterar o modelo de modo a conseguir uma sobreposição dos raios com os dados carregados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Introdução

Neste trabalho foi feito a análise de dados de Refração Sísmica Profunda e também modelagem geológica com os resultados obtidos. Os dados abrangem cerca de 100 km, iniciando-se na cidade de São Miguel do Araguaia seguindo de oeste para leste, e foram utilizadas três explosões (ex11, ex12 e ex13) ao longo destes 100 km.

Com a aplicação de conhecimentos geológicos, geofísicos e pacotes de programas utilizados em trabalhos de refração sísmica profunda em meio acadêmico obtivemos os resultados que serão apresentados neste capítulo.

6.2 Resultados do programa SAC

No programa SAC (Seismic Analysis Code; Tapley and Tull, 1991), a partir da leitura dos sinais das explosões foi analisado e processado os tempos de chegada da onda P direta e refratada nas camadas da crosta abaixo da linha sísmica. Foram montadas seções sísmicas de Distância (km) por Tempo (sec) com todos os sismogramas alinhados, utilizamos tempo reduzido para as seções e a velocidade de redução utilizada foi de 5,00 km/s. Iniciamos com a explosão ex11 resultando em leituras do tiro direto, explosão ex12 gerando leituras de um tiro reverso e um direto e na explosão ex13 com mais um tiro reverso.

Para melhor visualização das imagens, não aparecem as marcas das leituras como exemplificado na Figura 6 (Sismograma visualizado no SAC, observa-se as chegadas das ondas P e S). As leituras das chegadas das ondas P e S e demais informações de velocidade e distância serão apresentadas nas tabelas 2, 3 e 4 no apêndice A (na pagina 38).

Das figuras geradas no programa SAC, foram feitas imagens (Print Screen) da tela do computador e aplicadas no trabalho para visualização.

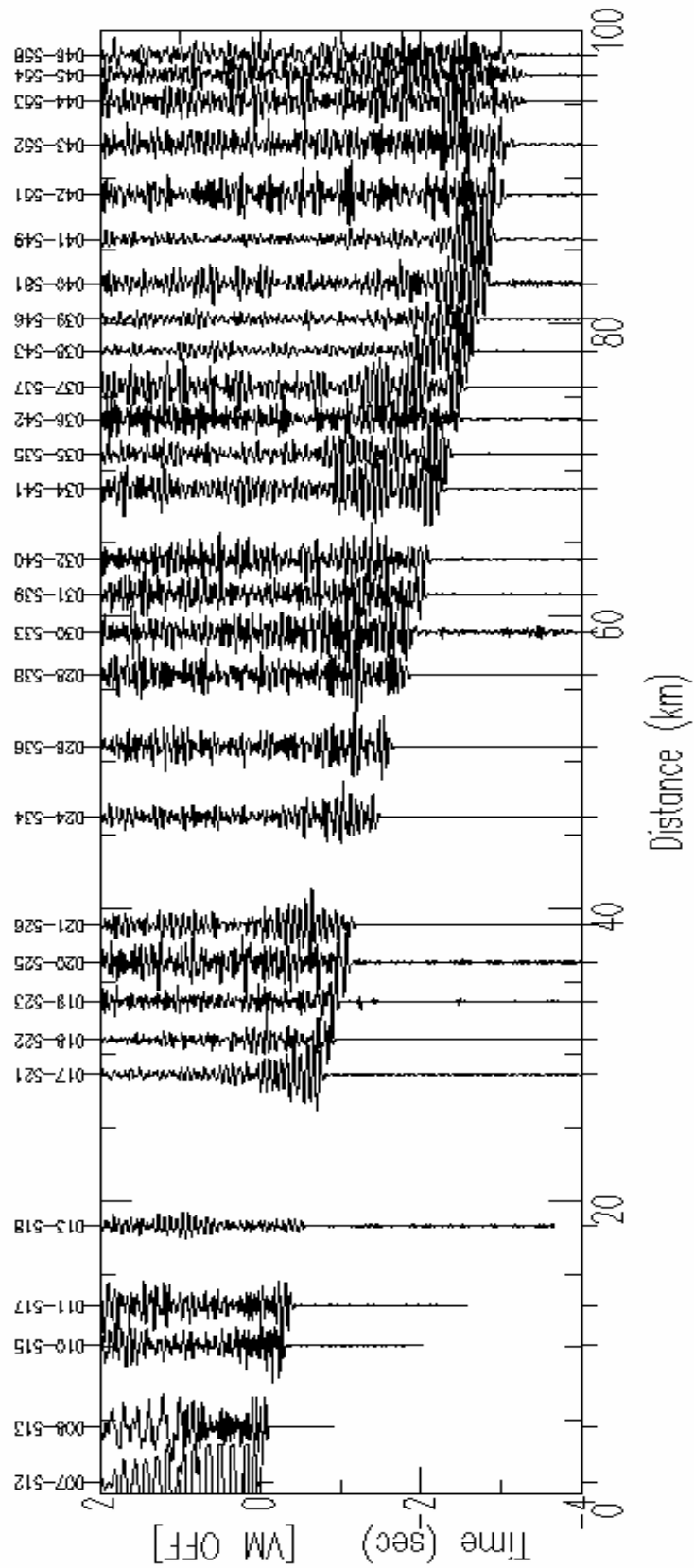


Figura 8 – Seção sísmica do tiro ex11 (leitura do tiro direto), com as chegadas das ondas P.

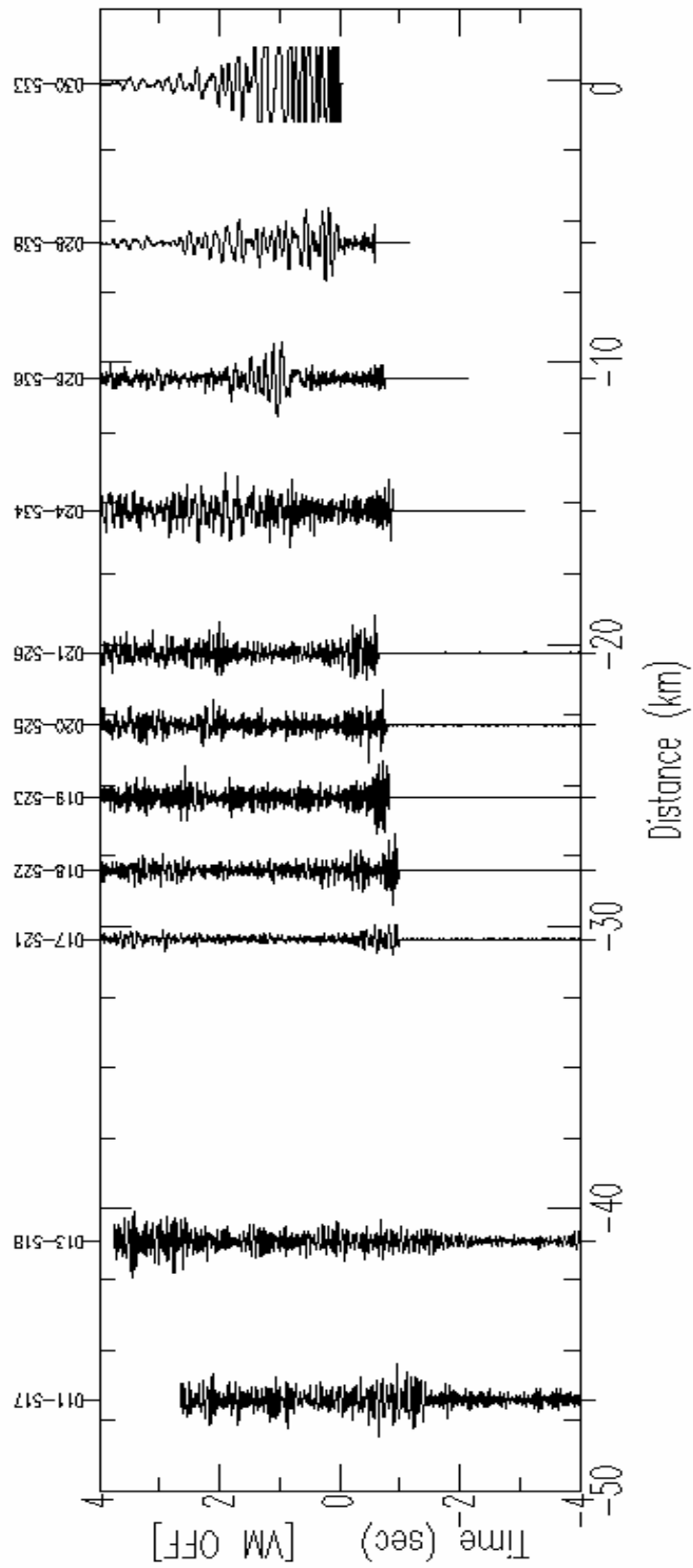


Figura 9 - Seção sísmica do tiro ex12 (leitura do tiro reverso), com as chegadas das ondas P.

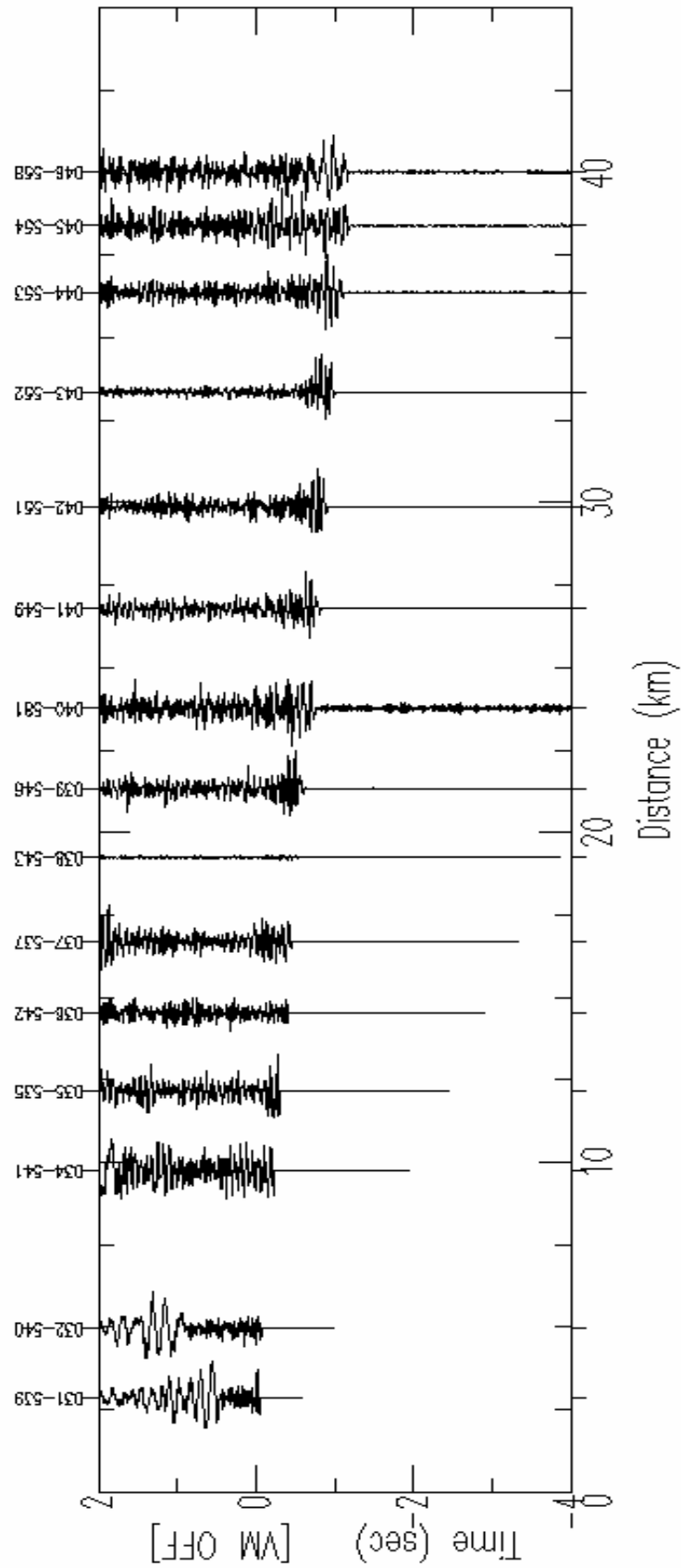


Figura 10 - Seção sísmica do tiro ex12 (leitura do tiro direto), com as chegadas das ondas P.

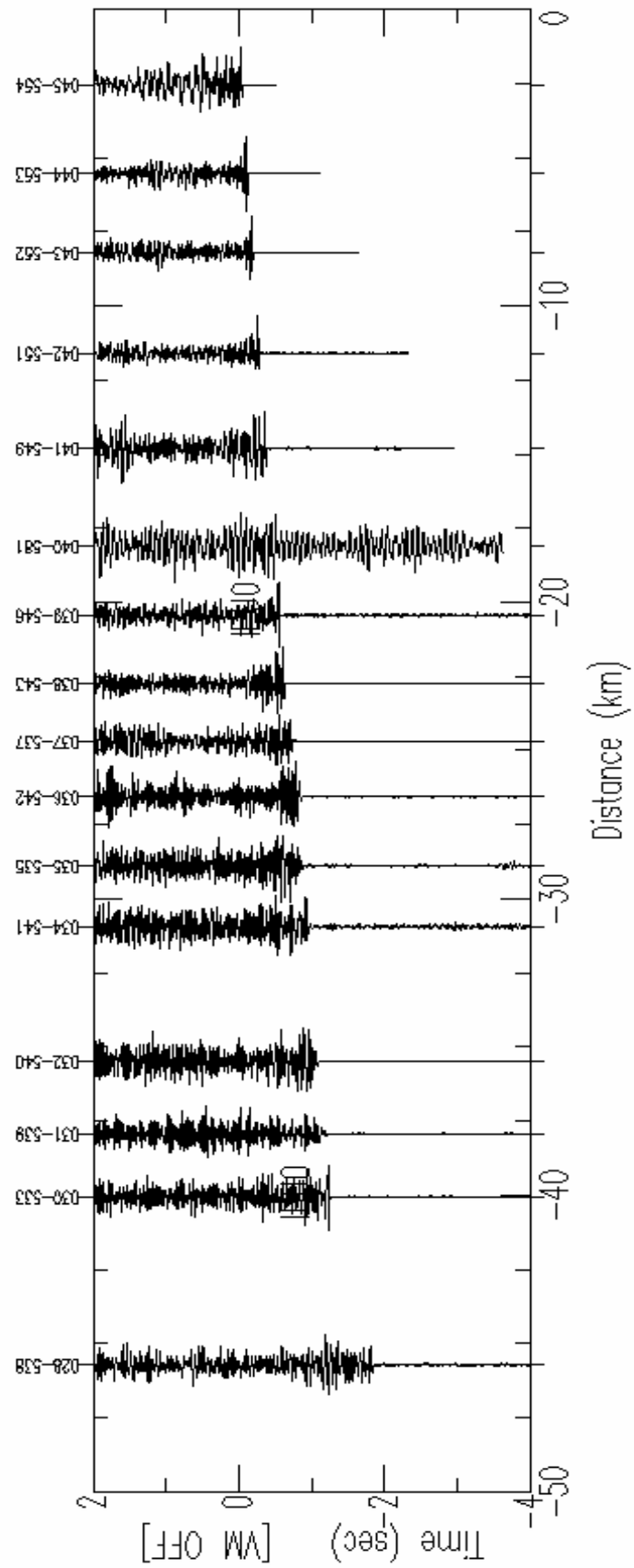


Figura 11 - Seção sísmica do tiro ex13 (leitura do tiro reverso), com as chegadas das ondas P.

Tabela 2 – Valores de velocidade das ondas P, S e densidade. Associados diversos materiais.

Material	Velocidade onda P (m/s)	Velocidade da onda S (m/s)	Densidade em (g/cm ³)
Ar	330	-	-
Solo	300-700	100-300	1,7-2,4
Areia seca	400-1200	100-500	1,5-1,7
Areia saturada	1500-2000	400-600	1,9-2,1
Argila saturada	1100-2500	200-800	2,0-2,4
Arenito saturado	2000-3500	800-1800	2,0-2,4
Calcáreo	3500-6000	2000-3300	2,4-2,7
Sal	4500-5500	2500-3100	2,1-2,3
Granito	4500-6000	2500-3300	2,5-2,7
Basalto	5000-6000	2800-3400	2,7-3,1
Gnaisse	4400-5200	2700-3200	2,5-2,7
Carvão	2200-2700	1000-1400	1,3-1,8
Água	1450-1500	-	1
Gelo	3400-3800	1700-1900	0,9
Petróleo	1200-1250	-	0,6-0,9

6.3 Resultados do programa MacRay

O programa MacRay foi ferramenta usada para modelagem, onde se utilizou os dados adquiridos no programa SAC e um modelo (gerado na Tese de Doutorado: Estrutura Crustal do Setor Central da Província Tocantins utilizando ondas P, S e fases refletidas com dados de Refração sísmica Profunda (Perosi, 2006)) já existente que foi aperfeiçoado para aplicação neste trabalho. Ao rodar os dados no programa no computador, os resultados são apresentados em janelas independentes, uma janela mostrando as curvas caminho-tempo e uma para o modelo com traçado de raios.

O modelo 2D criado é resultado da utilização da leitura de tiros diretos e reversos, e foram inseridas características específicas como camadas inclinadas, gradientes laterais de velocidade e zonas de baixa velocidade. Com o uso destes atributos e diversas tentativas para ajustar o modelo, de forma que as curvas caminho-tempo e o traçado de raios assumissem uma sobreposição.

Para provar os resultados, as figuras 23 (Sobreposição da seção sísmica do tiro direto ex11 - curva caminho-tempo), 24 (Sobreposição da seção sísmica tiro reverso ex12 - curva caminho-tempo), 25 (Sobreposição da seção sísmica tiro direto ex12 - curva caminho-tempo) e 26 (Sobreposição da seção sísmica do tiro ex13 - curva caminho-tempo) foram montadas sobrepondo, as seções sísmicas obtidas com a análise dos dados no programa SAC e as curvas caminho-tempo oriundas da modelagem utilizando o traçado de raios sísmicos, efetuado no programa MacRay.

6.4 Discussões

Como nossa área de estudo se inicia na Faixa Araguaia e termina na Faixa Brasília, era preciso saber o que se esperava encontrar na região, e analisando a geologia local observamos na região da Bacia Bauru camadas de rochas efusivas de composição básica (basalto) e eventualmente ácidas intermediárias associadas à Formação Serra Geral – Grupo São Bento. Na porção mais profunda da área de estudo teríamos a ocorrência de rochas que podem ser granitos ou granitóides.

De acordo com a correspondência envolvendo as velocidades das ondas P registradas e a litologia local, nos fazemos analisar a Tabela 2, onde encontramos velocidades de onda P para basalto similar com as velocidades obtidas na porção mais rasa do nosso modelo. Assim a correlação dos dados pode estar indicando a ocorrência de Basalto, este que localmente pode corresponder ao Basalto do Grupo São Bento. E na região mais inferior (próximo a 5 km) do nosso modelo foram obtidas velocidades de onda P que podem vir a ser correlacionadas com granitos, possivelmente os granitos Caiapó de idade Neoproterozóico, na ocasião em que se amalgamou o supercontinente do Gondwana (Unrug, 1992; Tromperre, 1994) no ciclo orogénico Pan-Africano/Brasiliano, situados na região mais profunda.

Quanto às imagens, a cada linha e cada símbolo tem sua representatividade. As cruzes nas seções Caminho-Tempo representam as estações receptoras. Os círculos vermelhos correspondem à explosão Ex11 (tiro direto) e as linhas vermelhas nas seções Caminho-Tempo são relacionadas com as Ex11 e nas seções dos Traçados de Raios significam o caminho que as ondas percorreram na subsuperfície, da Ex11 até o receptor. E o mesmo vale para os círculos verdes, que representam as Ex12 (tiro direto e reverso) e círculos azuis que representam a explosão Ex13 (tiro reverso), assim como as retas na seção Caminho-Tempo e no Traçado de Raios.

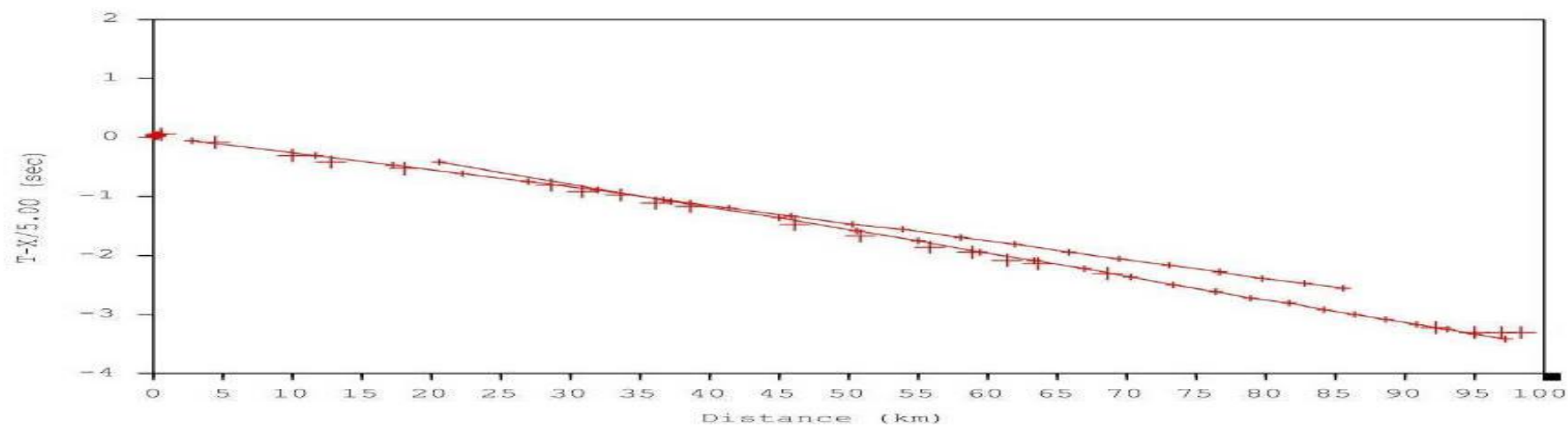


Figura 12 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 1 direto – Modelo Final

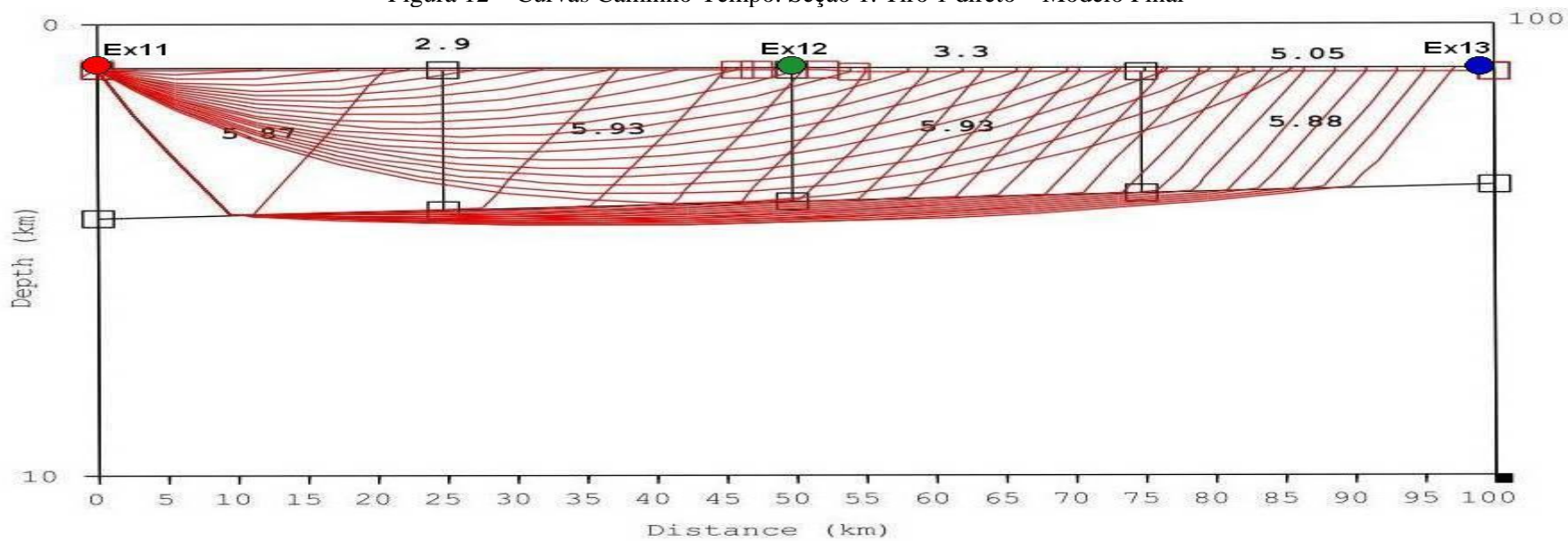


Figura 13 – Traçado de raios Seção 1. Tiro 1 direto – Modelo Final.

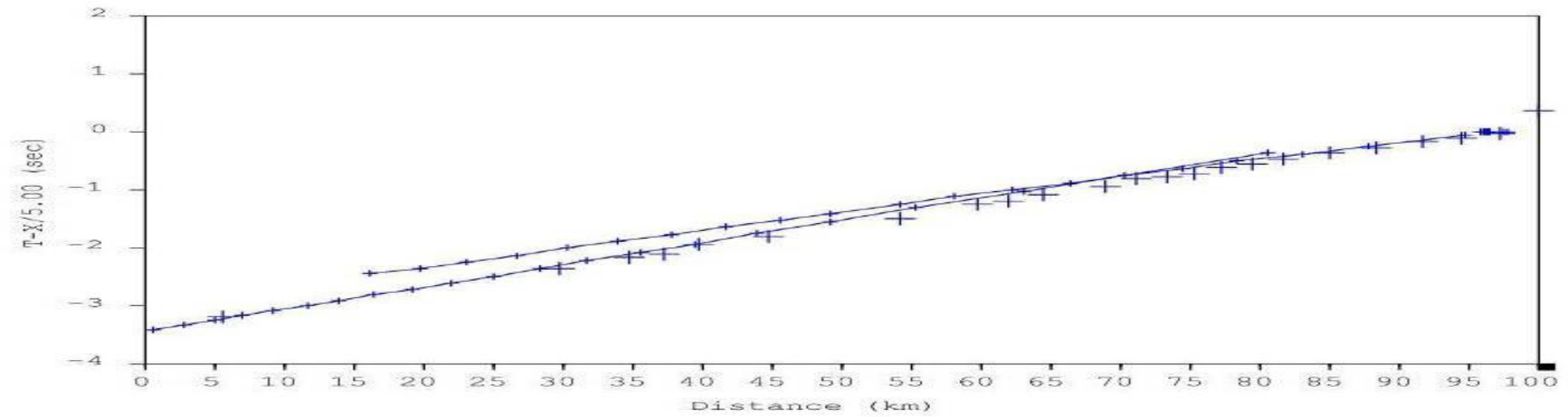


Figura 14 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 3 reverso – Modelo Final

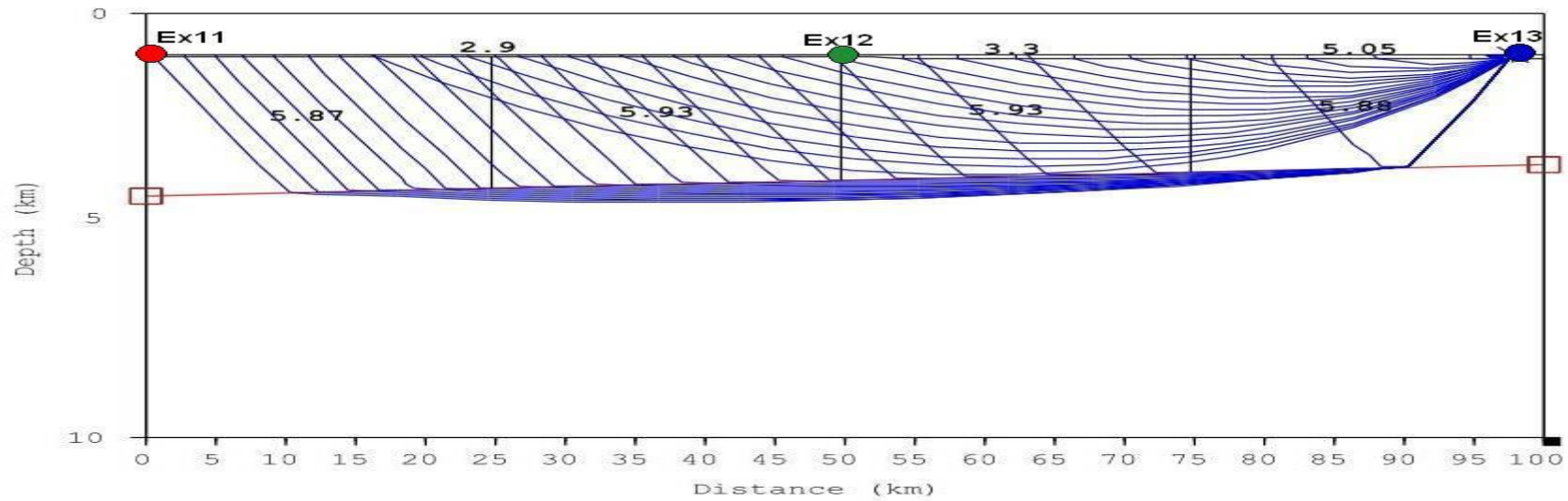


Figura 15 – Traçado de raios Seção 1. Tiro 3 reverso – Modelo Final.

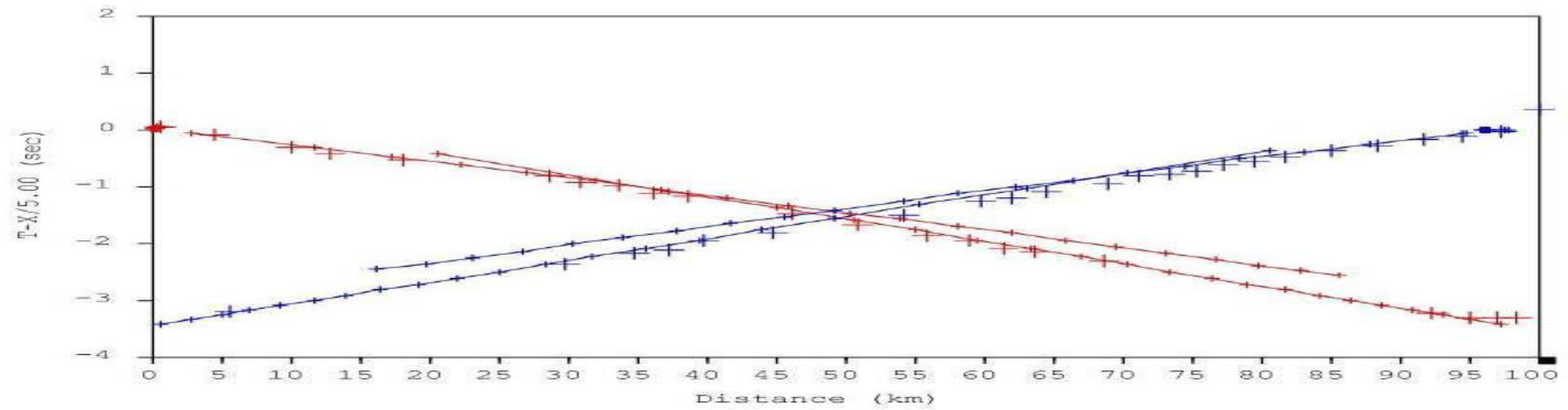


Figura 16 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 1 direto e tiro 3 reverso – Modelo Final

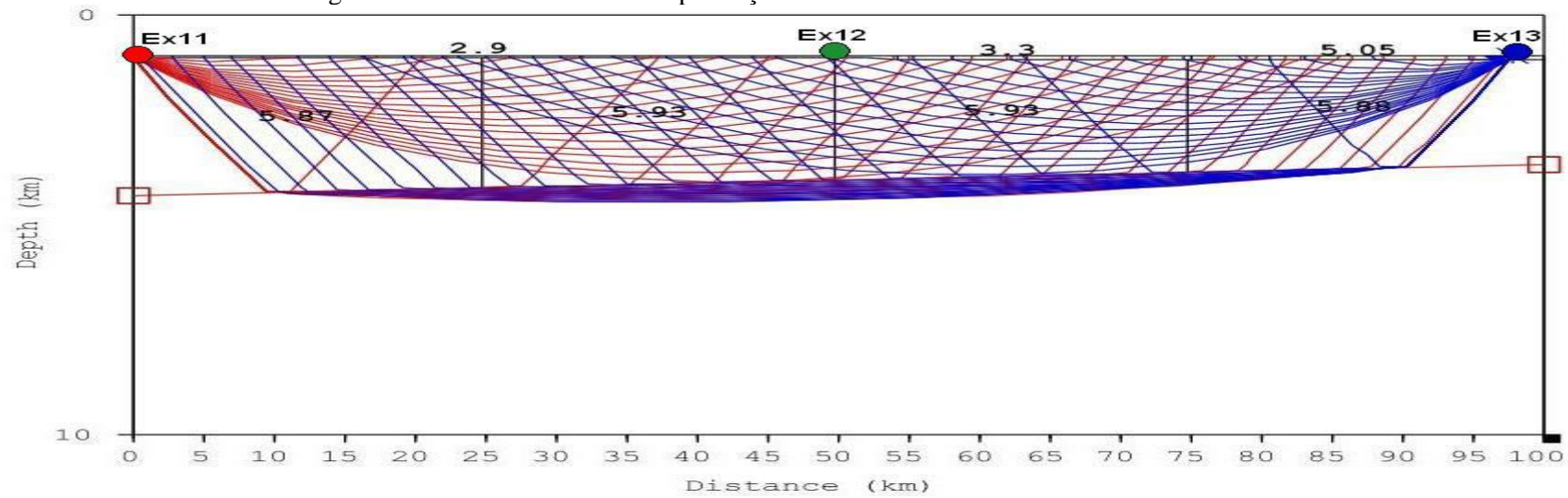


Figura 17 – Traçado de raios. Seção 1. Tiro 1 direto e tiro 3 reverso – Modelo Final.

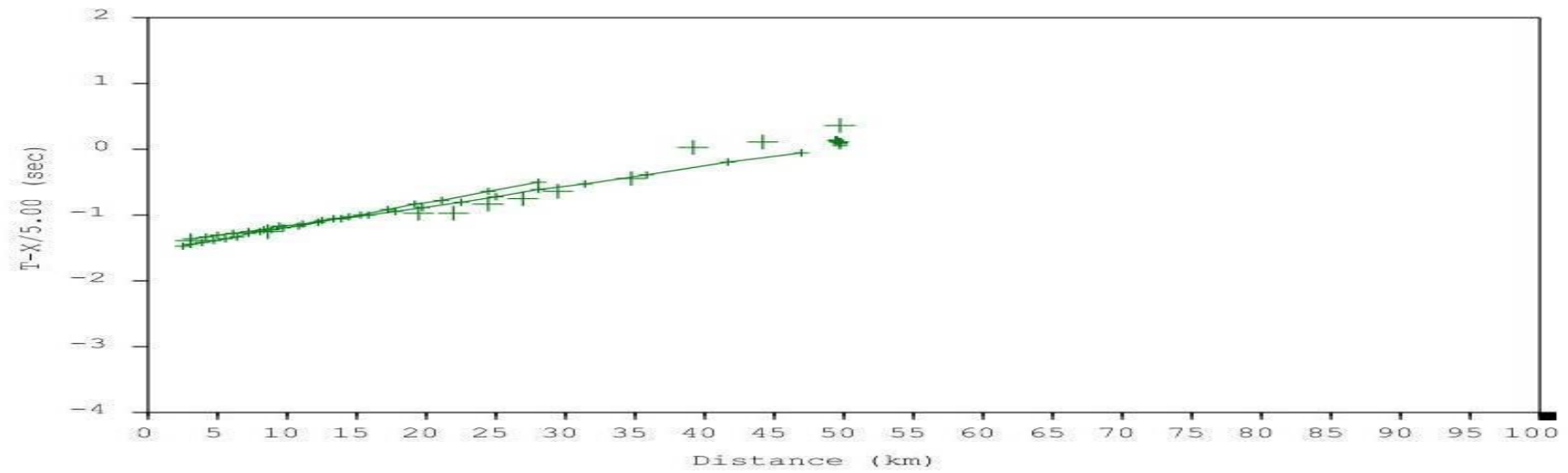


Figura 18 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 2 reverso – Modelo Final

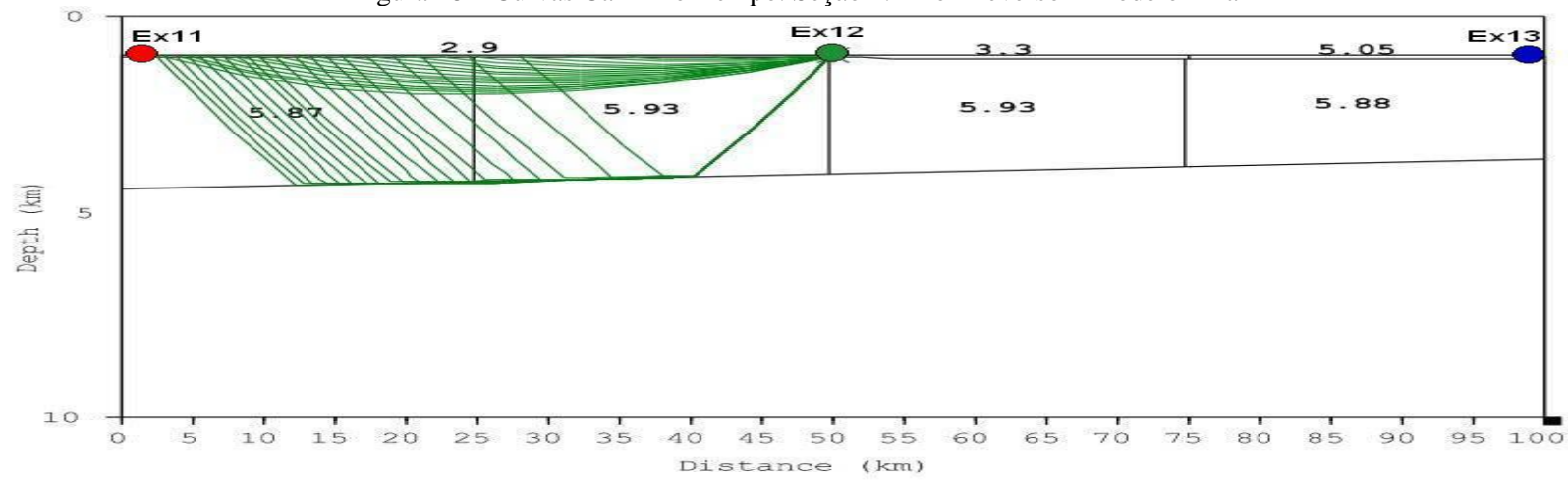


Figura 19 – Traçado de raios. Seção 1. Tiro 2 reverso – Modelo Final.

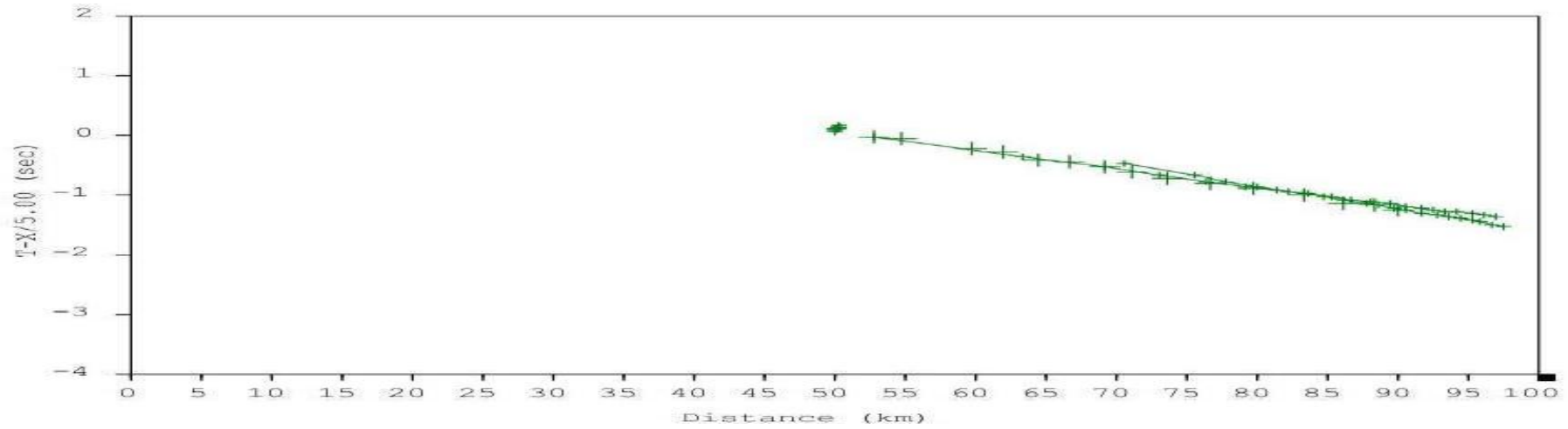


Figura 20 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Tiro 2 direto – Modelo Final

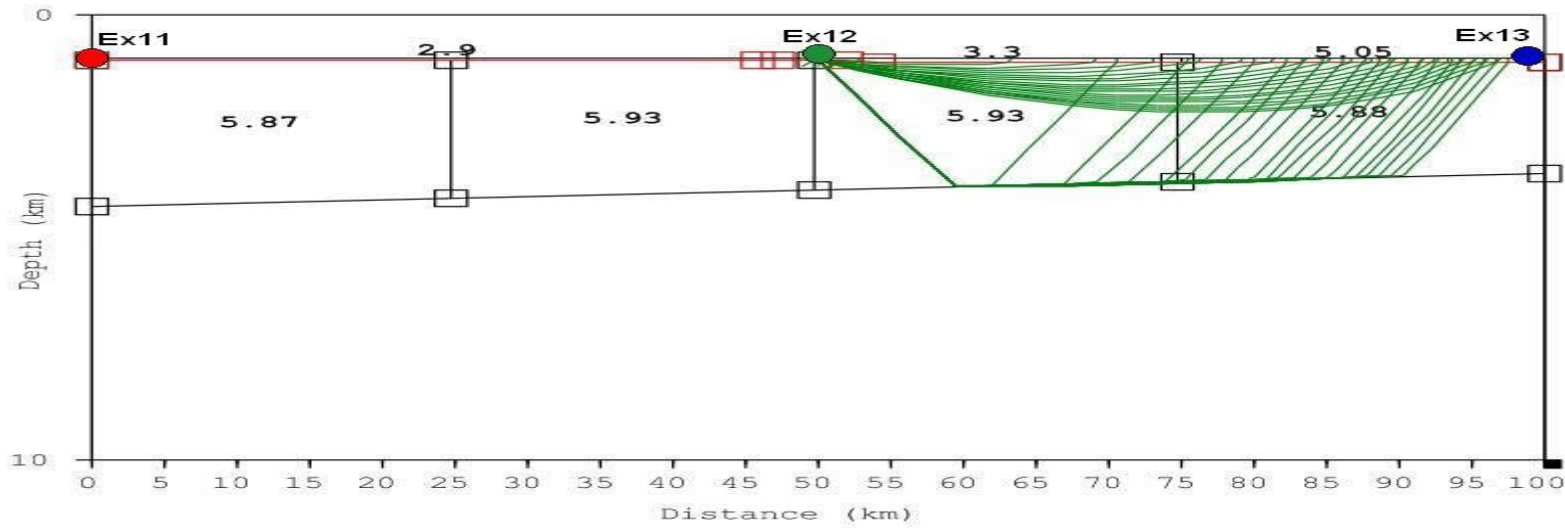


Figura 21 – Traçado de raios. Seção 1. Tiro 2 direto- Modelo Final.

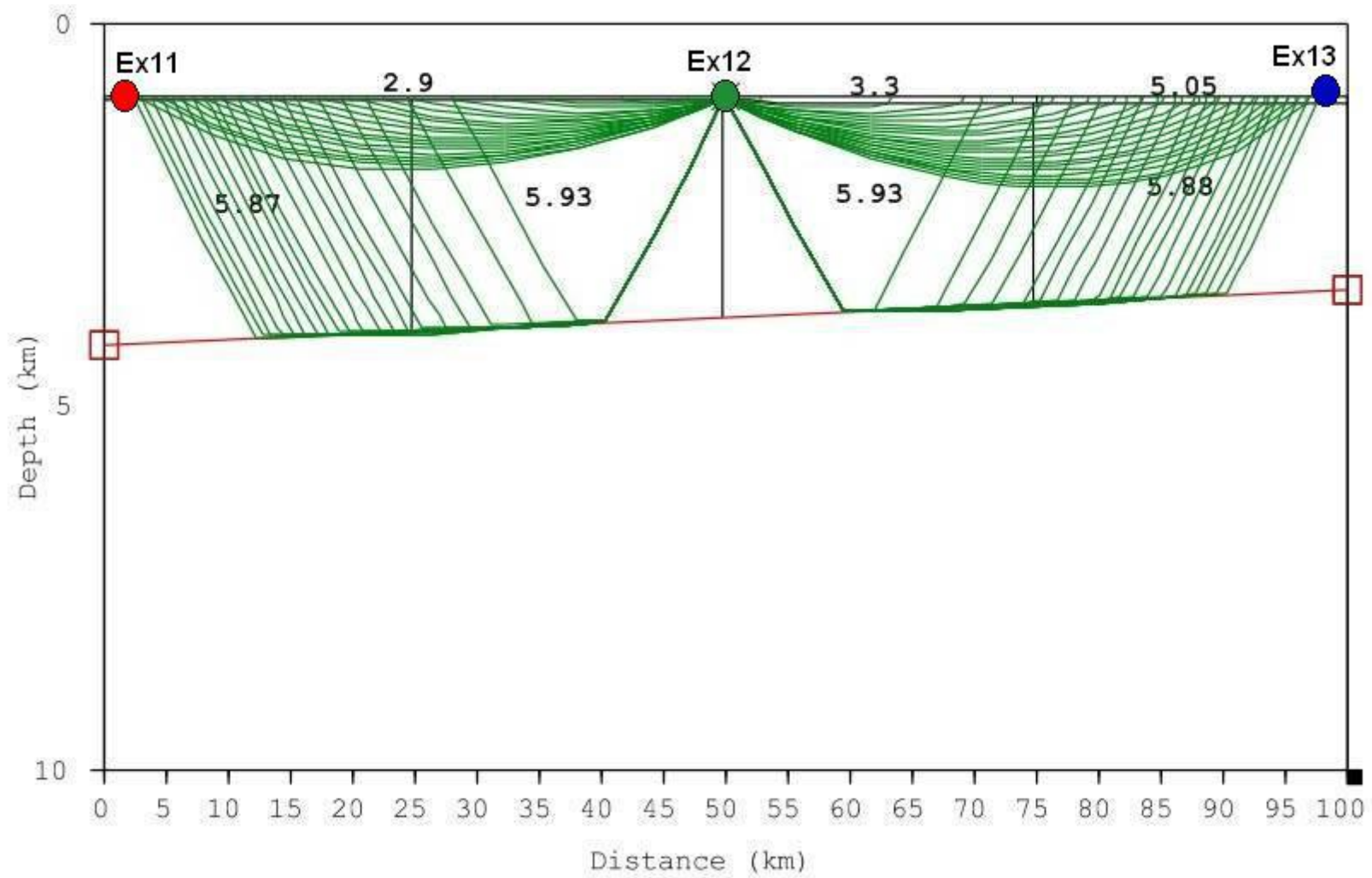


Figura 22 – Traçado de raios. Seção 1. Tiro 2 direto e reverso – Modelo Final.

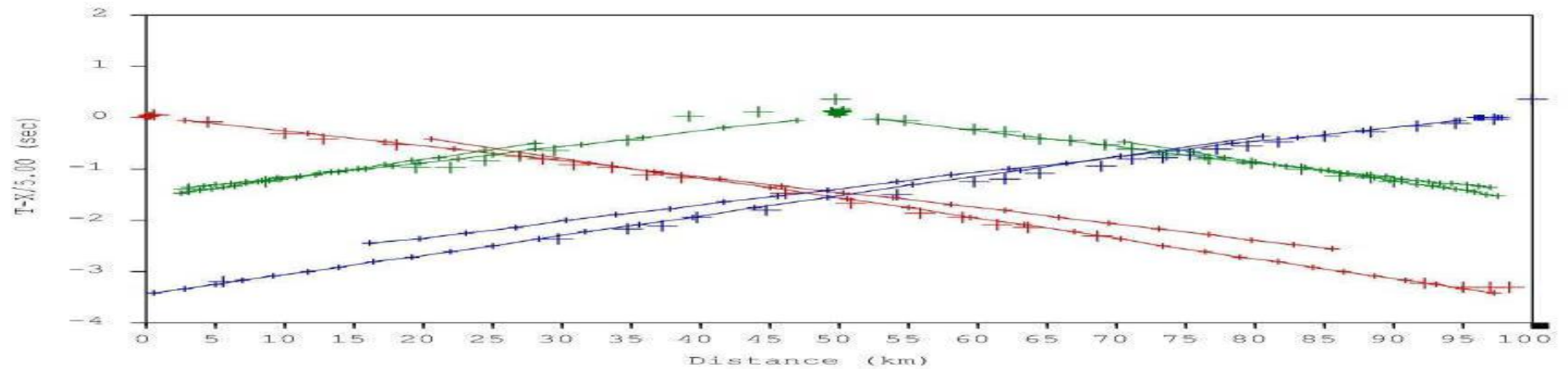


Figura 23 – Curvas Caminho-Tempo. Seção 1. Modelo Final

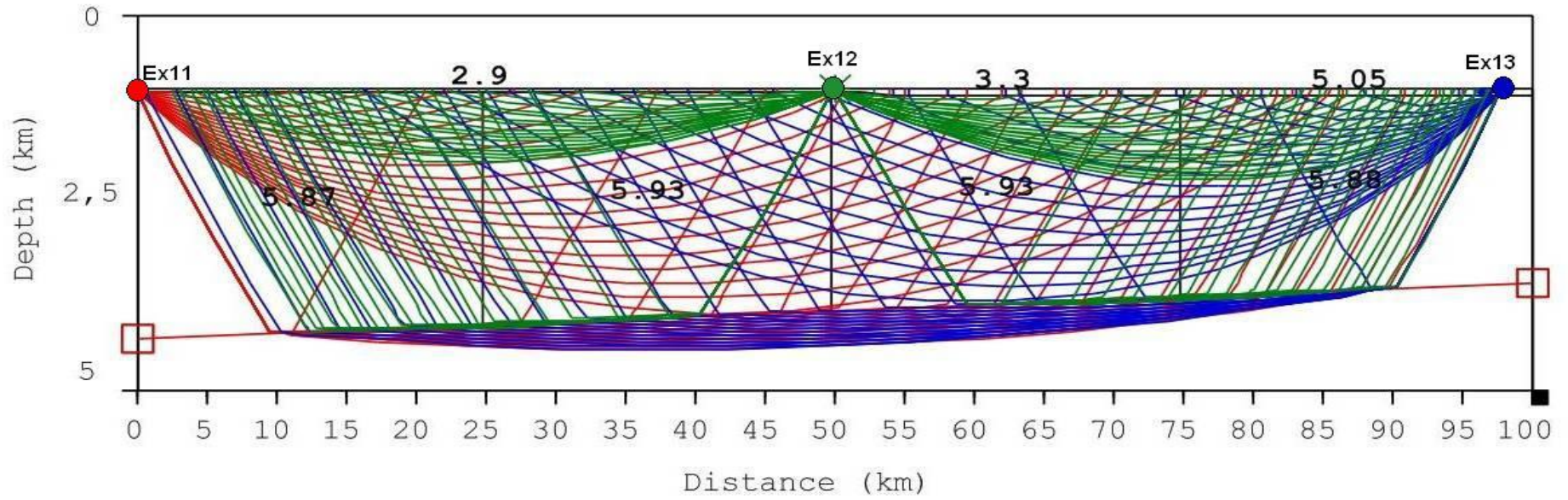


Figura 24 – Traçado de raios. Seção 1. Modelo Final

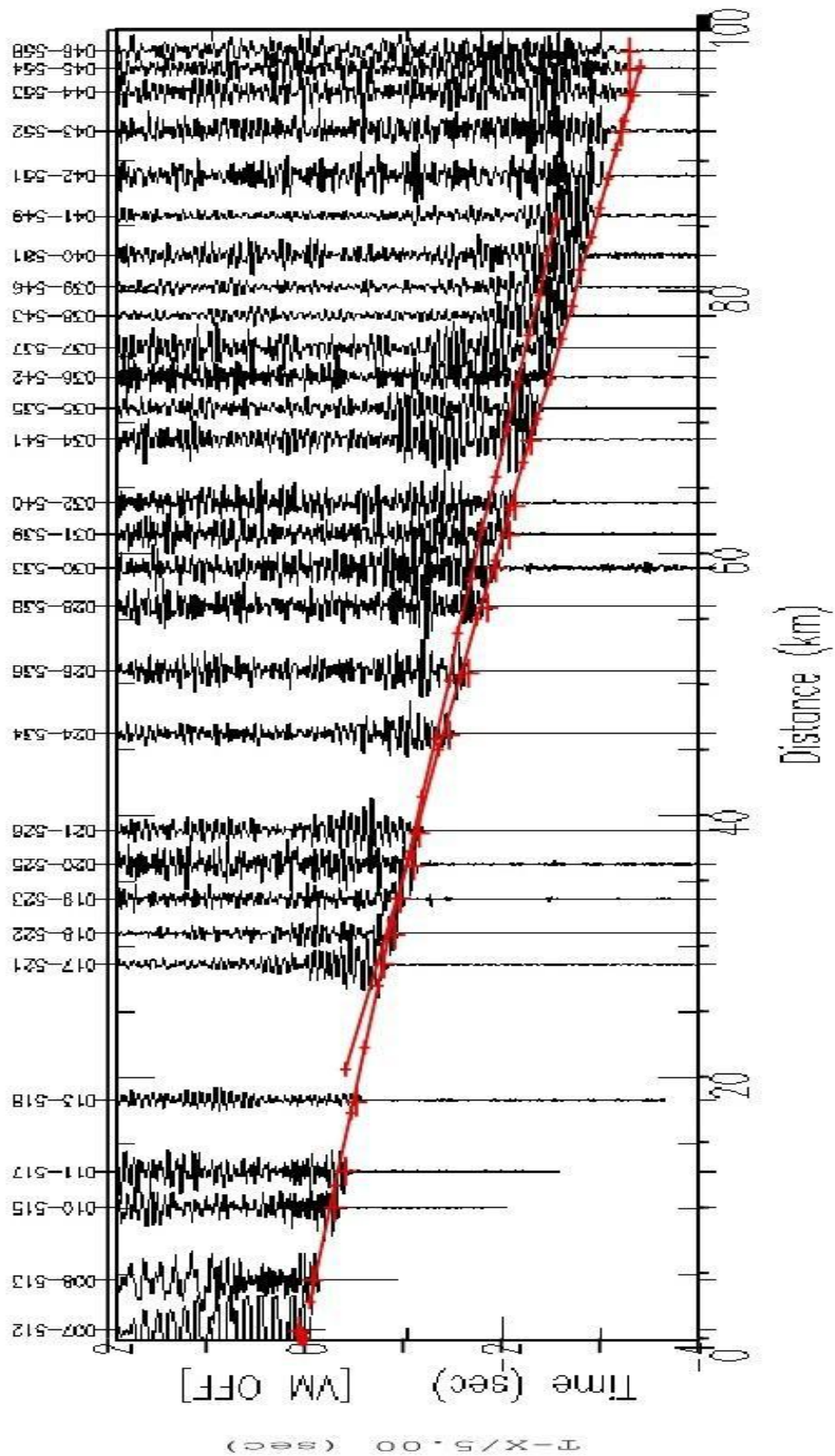


Figura 25 - Sobreposição da seção sísmica do tiro direto ex11 - curva caminho-tempo.

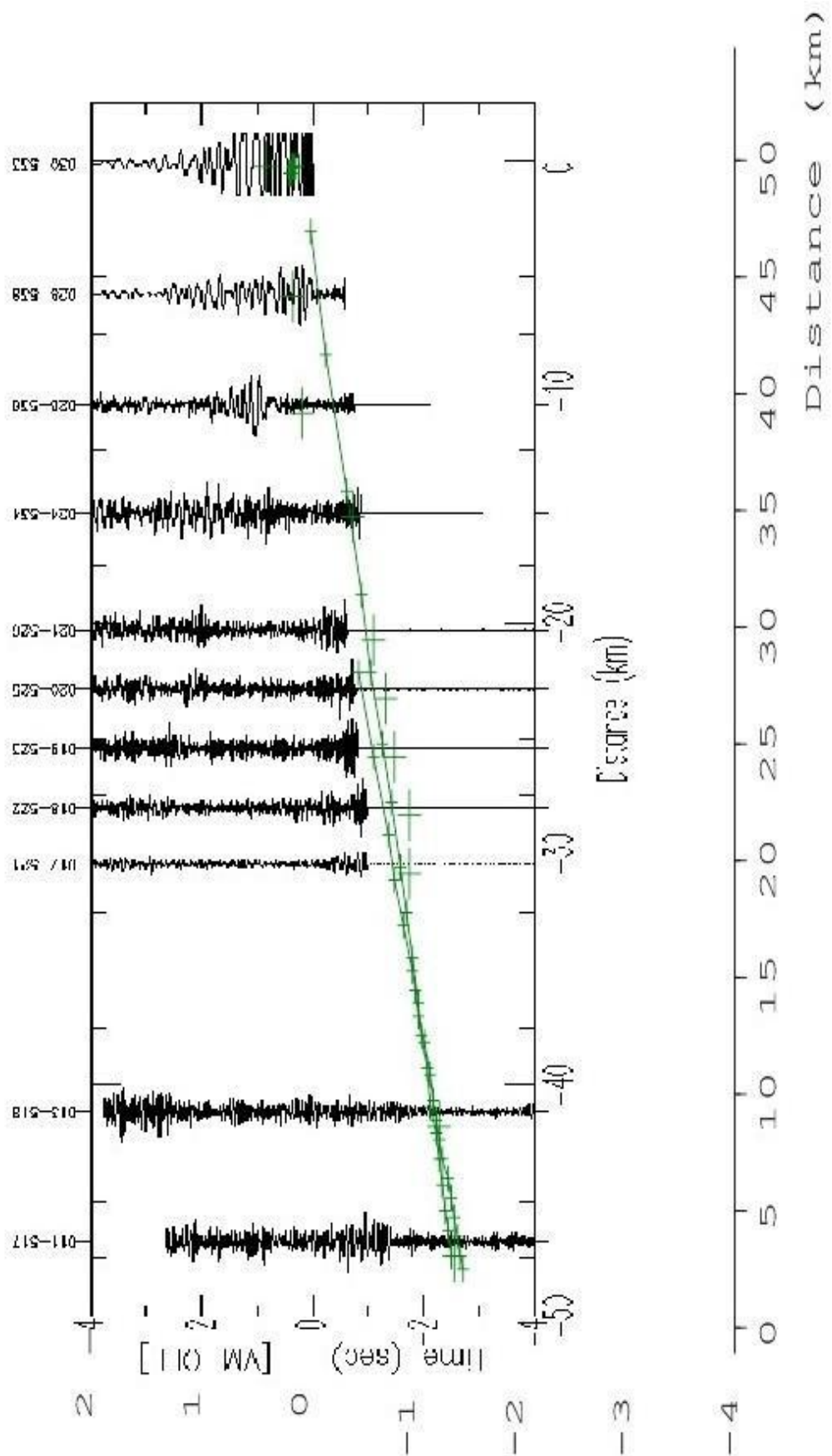


Figura 26 - Sobreposição da seção sísmica do tiro reverso ex12 - curva caminho-tempo.

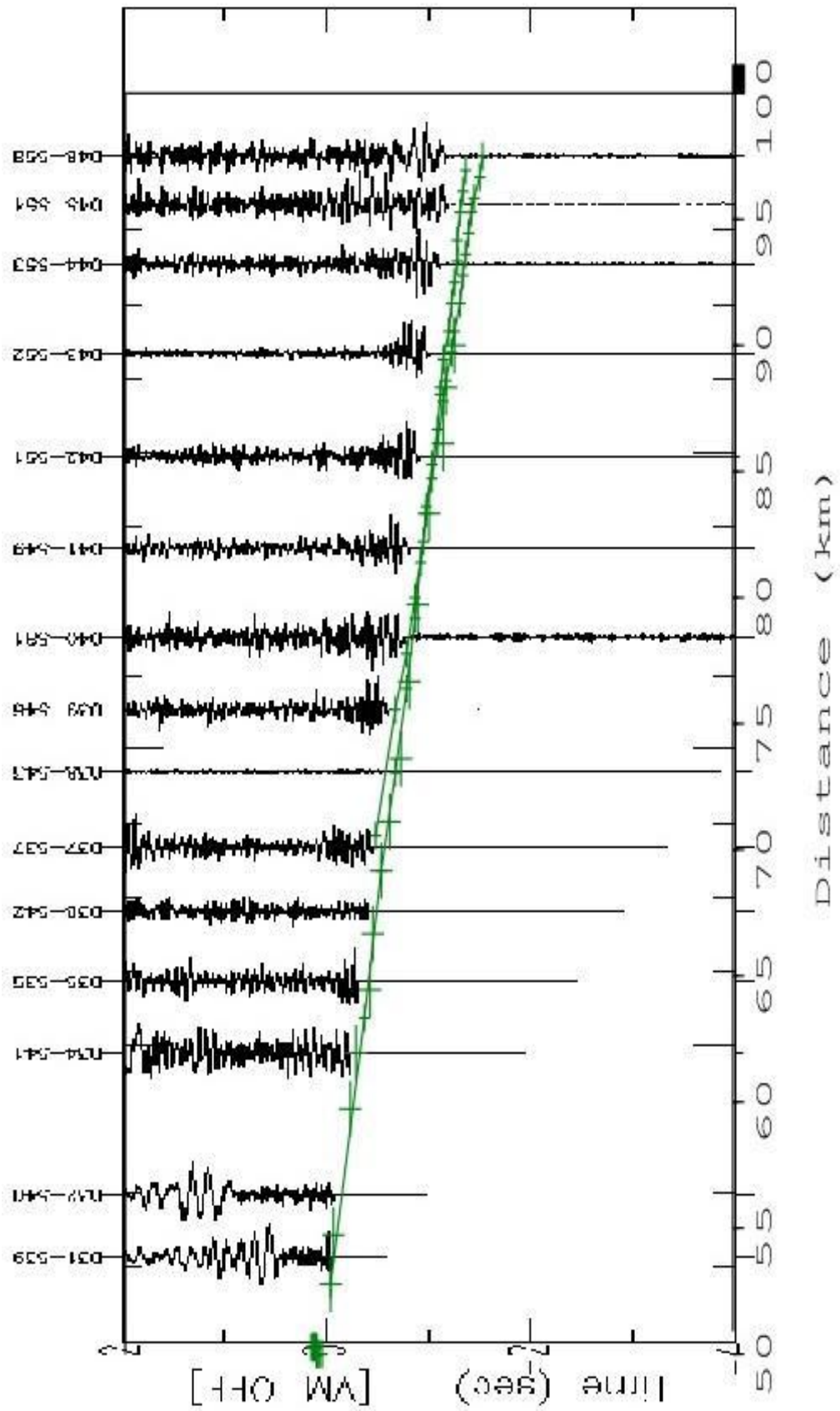


Figura 27 - Sobreposição da seção sísmica do tiro direto ex12 - curva caminho-tempo.

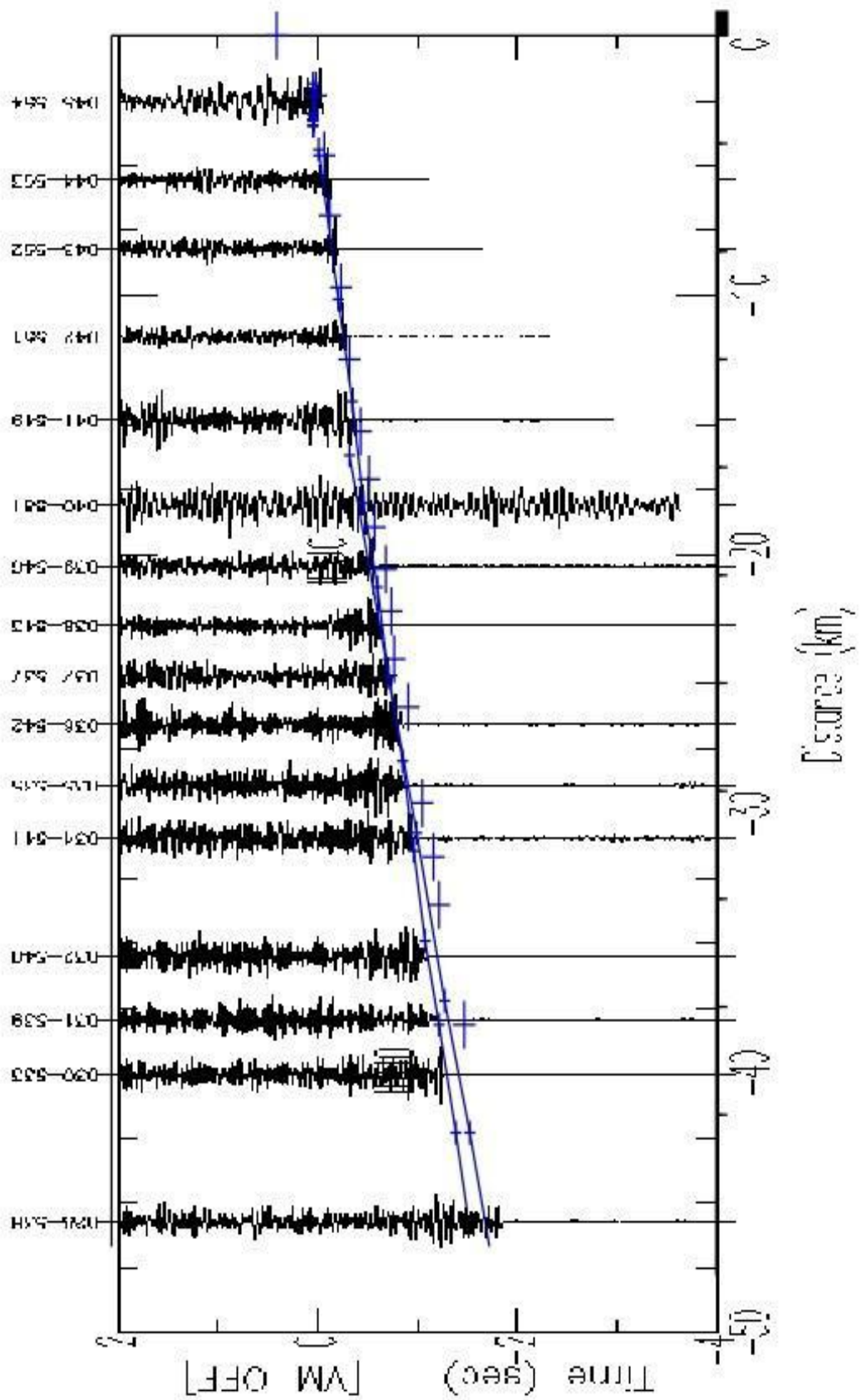


Figura 28 - Sobreposição da seção sísmica do tiro reverso ex13 - curva caminho-tempo.

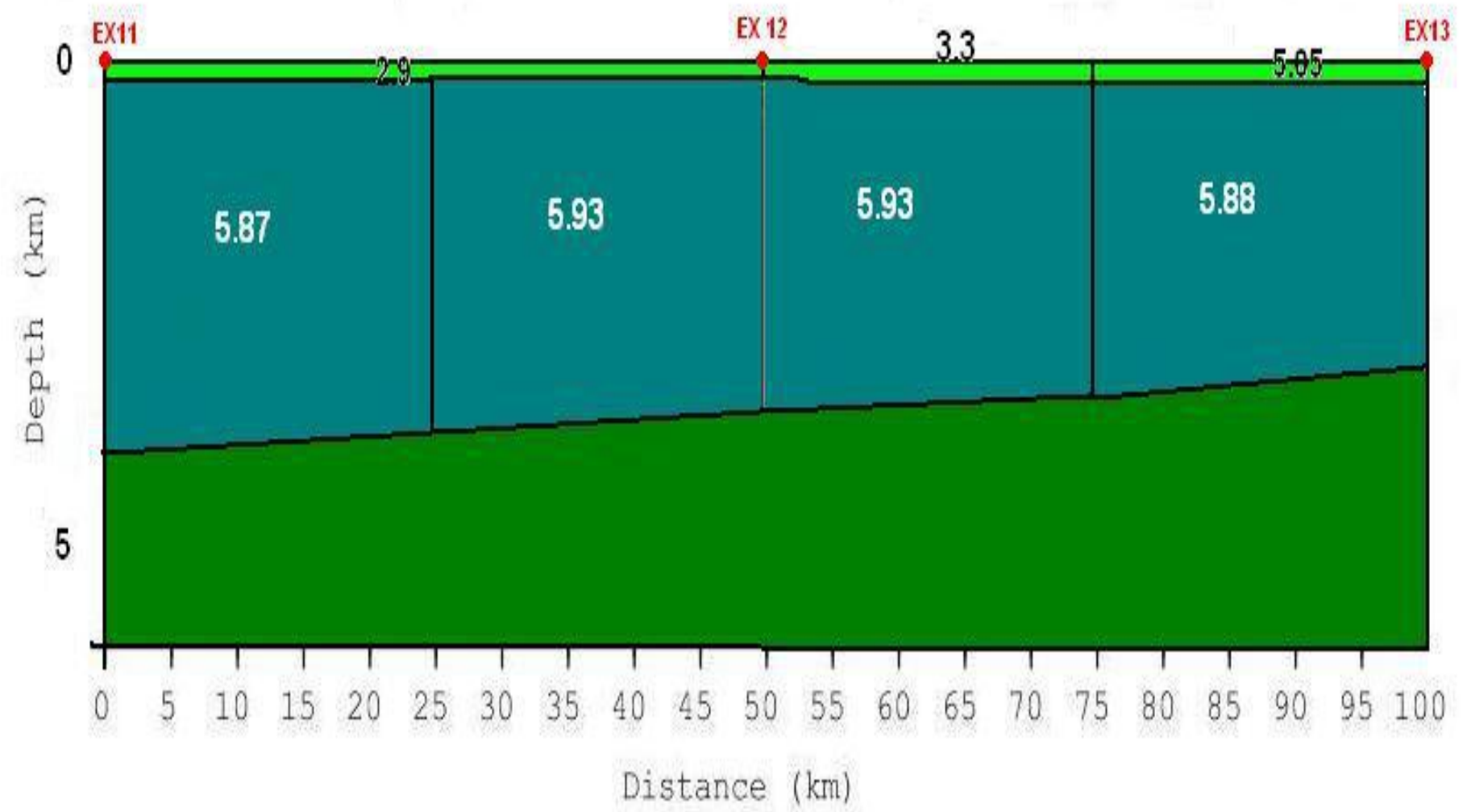


Figura 29 – Modelo de Velocidades Sísmicas Final. Os valores em preto e branco representam a velocidades das ondas P.

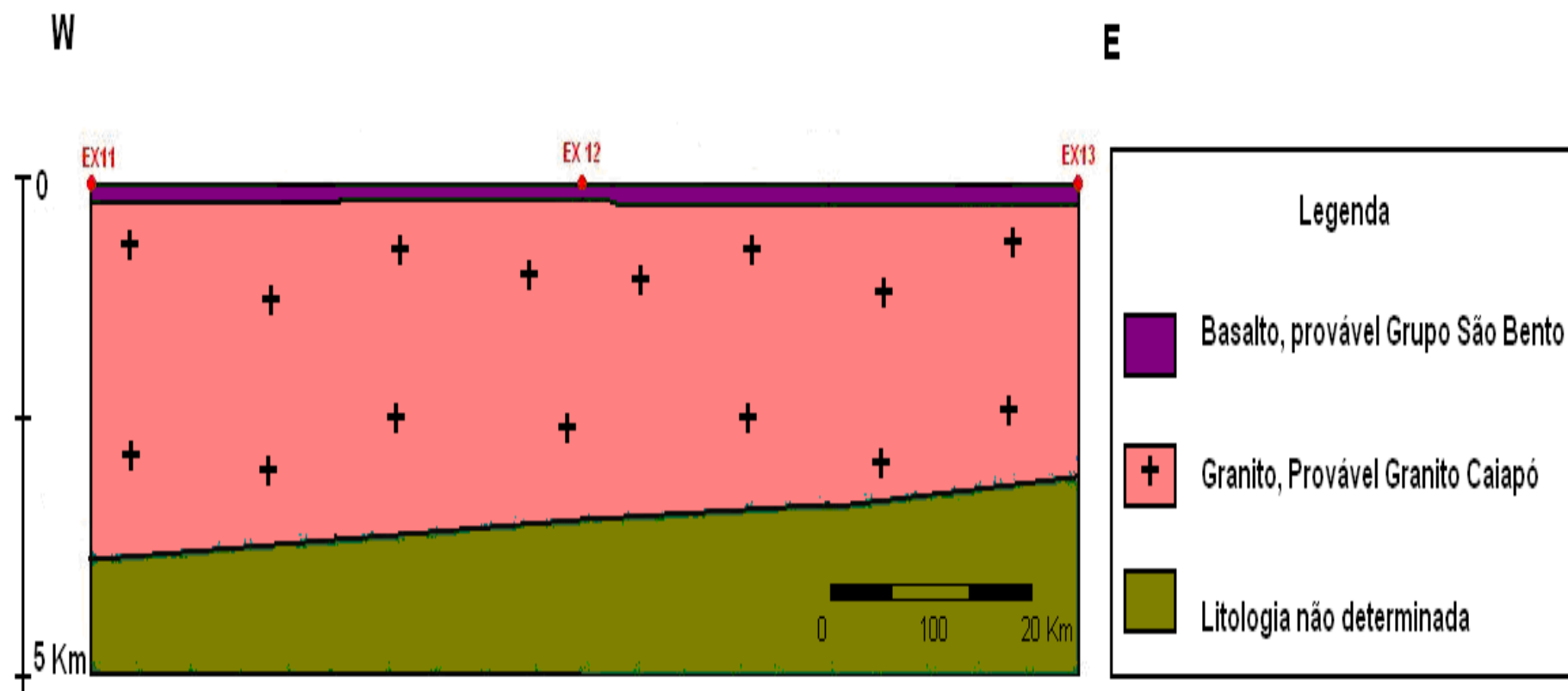


Figura 30 – Modelo geológico Final..

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o que foi apresentado nos Capítulos 5 e 6, alcançou-se o objetivo proposto, de maneira que o trabalho resultou em um modelo de velocidades sísmicas (Figura 23). Considerando a análise feita nos dados de refração sísmica no programa SAC, juntamente com o uso de método de Tempo Reduzido para melhorar a leitura das velocidades e a visualização nos perfis e seções sísmicas gerados, somados com diversas interações para gerar um modelo que demonstrasse coerência entre os dados reais e os modelados. A utilização do programa MacRay facilita o modo de realizar as interações e o seu controle de qualidade, pois permite a visualização imediata do resultado depois de feita qualquer alteração no modelo.

Relacionando a velocidade das ondas P registradas e com a Litologia local, ao analisar a Tabela 2, onde encontramos velocidades de onda P para basaltos similares (variando de 2,9 a 3,3 localmente chegando a 5,05) com as velocidades obtidas na porção mais rasa do nosso modelo. Assim a correlação dos dados pode estar indicando a ocorrência de Basalto, possivelmente do Grupo São Bento, nos primeiros refratores do nosso modelo. E segundo o levantamento de dados no Arcabouço Tectônico, na região do nosso modelo onde se encontra o segundo refrator foram obtidas velocidades de onda P variando de 5,87 km/s (nos extremos) até 5,93 km/s (na porção central), que podem vir a ser correlacionadas com granitos, possivelmente os granitos Caiapó, de idade Neoproterozóico, na ocasião em que se amalgamou o supercontinente do Gondwana (Unrug, 1992; Tromperre, 1994) no ciclo orogênico Pan-Africano/Brasiliano, situados na região mais profunda.

As figuras geradas a partir da sobreposição das seções sísmicas dos tiros diretos e reversos com as curvas caminho-tempo serviram para provar a exatidão dos resultados e demonstrar que as leituras dos tempos de chegada das ondas P realizadas no programa SAC e a modelagem efetuada no programa MacRay foram satisfatórias; podendo ser recomendados como uma boa opção gratuita para trabalhar com dados de refração sísmica, possibilitando também a integração com dados gravimétricos.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA DE, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B DE; FUCK, R. A., Brazilian Structural Provinces: an introduction, Earth Sciences Review, Special Issue, 17, 1-29, Amsterdam, 1981
- ANDRÉ L. ROMANELLI ROSA; Análise do Sinal Sísmico. Rio de Janeiro: SBGf, 2010. 668 pp
- FONSECA, M. A.. Estilos Estruturais e Arcabouço Tectônico do Segmento Setentrional da Faixa. 1996 - Tese de doutorado. Universidade de Brasília / Instituto de Geociências.
- LUERTGERT, J. MacRay is a general purpose two-dimensional seismic ray-tracer for Macintosh. [S.l.], March 2004. Disponível em: <<http://quake.wr.usgs.gov/research/software/index.html#3Ray>>.
- PAIXÃO, M. A. P.; NILSON, A. A.; ARAÚJO FILHO, J. O.; BLUM, M. L. B. 2001. Evidências de Colisão Continental (Linhas de Escorregamento) na Faixa Araguaia. In: Simpósio de Geologia da Amazonia, 7, 2001, Belém, Pará, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte. Anais.
- PEROSI, F. A.. Estrutura Crustal do Setor Central da Província Tocantins utilizando ondas P,E e Fases Refletidas com dados de Refração Sísmica Profunda. 2006. 138p Dissertação de Doutorado. Universidade de São Paulo/Instituto Astronômico e Geofísico/Departamento de Geofísica.
- PEROSI, F. A.. Refração Sísmica Profunda no Setor Sudeste da Província Tocantins. 2000. 115p Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo/Instituto Astronômico e Geofísico/Departamento de Geofísica.
- SCHUTESKY, M.E.. Sequência vulcano-sedimentar Campinorte e do Complexo Uruaçu, Província Tocantins. 2007, 83p. Dissertação, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília.
- TAPLEY, W. C.; TULL, J. E. SAC – Seismic Analysis Code – User Manual. Mail Stop L-205, Livermore, CA, 94550, July 1991.
- URUNG, R. The supercontinent cycle and Gondwanaland assembly: Component cratons and the timing of suturing events. Journal of Geodynamics, 1992.

APÊNDICE A – Dados das leituras no programa SAC.

Tabela 3 – Leituras realizadas a partir do programa SAC. Ex11 até Ex12 (Tiro direto) e Ex12 até Ex11 (tiro reverso).

Dados	kstnm	Dist (km)	tP (s)	tS (s)	VaP(km/s)	T red
ex11_214.sacl	007-512	0,79072	0,19131	0,46515	4,13	0,0332
ex11_215.sacl	008-513	4,51434	0,80153	1,92650	5,63	-0,1013
ex11_216.sacl	010-515	10,11813	1,71470	3,00950	5,90	-0,3089
ex11_217.sacl	011-517	12,84639	2,14820	3,70970	5,98	-0,4211
ex11_218.sacl	013-518	18,29365	3,11130	5,37520	5,88	-0,5474
ex11_220.sacl	017-521	28,64926	4,91320	8,50320	5,83	-0,8167
ex11_221.sacl	018-522	31,00405	5,27760	9,10860	5,87	-0,9232
ex11_222.sacl	019-523	33,65154	5,74440	9,94510	5,86	-0,9859
ex11_223.sacl	020-525	36,31820	6,13770	10,63100	5,92	-1,1259
ex11_224.sacl	021-526	38,85873	6,58160	11,30700	5,90	-1,1901
ex11_226.sacl	024-534	46,26157	7,75790	13,44100	5,96	-1,4944
ex11_227.sacl	026-536	51,07101	8,53460	14,73000	5,98	-1,6796
ex11_228.sacl	028-538	55,99193	9,33020	16,10500	6,00	-1,8682
ex11_229.sacl	030-533	58,89232	9,82250	17,11100	6,00	-1,9560
ex11_230.sacl	031-539	61,49422	10,20600	17,65500	6,03	-2,0928
ex11_231.sacl	032-540	63,87794	10,62800	18,45100	6,01	-2,1476
ex11_232.sacl	034-541	68,69479	11,42100	19,70600	6,01	-2,3180
ex11_241.sacl	043-552	92,24148	15,22600	26,32900	6,06	-3,2223
ex11_242.sacl	044-553	95,20715	15,72400	26,97300	6,05	-3,3174
ex11_243.sacl	045-554	97,00914	16,09600	27,66300	6,03	-3,3058
ex11_244.sacl	046-558	98,38993	16,34600	28,51600	6,02	-3,3320
ex12_435.sacl	030-533	0,13942	0,36547	0,56898	0,38	0,3376
ex12_434.sacl	028-538	5,77863	1,24270	2,14470	4,65	0,0870
ex12_433.sacl	026-536	10,58272	2,12190	3,71110	4,99	0,0054
ex12_432.sacl	024-534	15,25879	2,60390	4,51990	5,86	-0,4479
ex12_430.sacl	021-526	20,29140	3,41580	5,90120	5,94	-0,6425
ex12_429.sacl	020-525	22,85999	3,79740	6,53190	6,02	-0,7746
ex12_428.sacl	019-523	25,42732	4,24860	7,65590	5,98	-0,8369
ex12_427.sacl	018-522	28,00988	4,62180	8,00120	6,06	-0,9802
ex12_426.sacl	017-521	30,44817	5,09510	8,98780	5,98	-0,9945
ex12_424.sacl	013-518	41,14824	6,97690	10,31900	5,90	-1,2527
ex12_423.sacl	011-517	46,76162	7,94700	13,75200	5,88	-1,4053
ex12_421.sacl	008-513	54,72338	9,13680	15,83300	5,99	-1,8079
ex12_420.sacl	007-512	59,14899	9,92700	17,12300	5,96	-1,9028

Tabela 4 – Leituras realizadas a partir do programa SAC. Ex12 até Ex13 (Tiro direto) e Ex13 até Ex12 (tiro reverso).

Dados	kstnm	Dist (km)	tP (s)	tS (s)	VaP(km/s)	T red
ex12_436.sacl	031-539	2,84924	0,51952	0,87605	5,48	-0,0503
ex12_437.sacl	032-540	4,95297	0,91363	1,58970	5,42	-0,0770
ex12_438.sacl	034-541	9,74205	1,71630	2,96510	5,68	-0,2321
ex12_439.sacl	035-535	12,16059	2,12960	3,67380	5,71	-0,3025
ex12_440.sacl	036-542	14,52110	2,48230	4,28270	5,85	-0,4219
ex12_441.sacl	037-537	16,69433	2,87100	4,93960	5,81	-0,4679
ex12_442.sacl	038-543	19,24412	3,30000	5,73390	5,83	-0,5488
ex12_443.sacl	039-546	21,33551	3,65290	6,33040	5,84	-0,6142
ex12_444.sacl	040-581	23,76676	4,00850	6,30300	5,93	-0,7449
ex12_445.sacl	041-549	26,78290	4,53050	6,94930	5,91	-0,8261
ex12_446.sacl	042-551	29,87963	5,06310	8,76540	5,90	-0,9128
ex12_447.sacl	043-552	33,35138	5,66640	9,67390	5,89	-1,0039
ex12_448.sacl	044-553	36,37922	6,13000	10,63000	5,93	-1,1458
ex12_449.sacl	045-554	38,39937	6,50090	11,11300	5,91	-1,1790
ex12_450.sacl	046-558	40,03020	6,72840	11,84600	5,95	-1,2776
ex13_624.sacl	005-510	104,98540	17,34100	29,96600	6,05	-3,6561
ex13_627.sacl	008-513	94,19054	15,63000	26,95500	6,03	-3,2081
ex13_632.sacl	017-521	70,14310	11,66100	20,11200	6,02	-2,3676
ex13_634.sacl	019-523	65,16031	10,86500	18,81200	6,00	-2,1671
ex13_635.sacl	020-525	62,69314	10,41900	18,04100	6,02	-2,1196
ex13_636.sacl	021-526	60,13606	10,07500	17,51100	5,97	-1,9522
ex13_638.sacl	024-534	55,10435	9,20520	16,17900	5,99	-1,8157
ex13_640.sacl	028-538	45,72451	7,63270	13,07900	5,99	-1,5122
ex13_641.sacl	030-533	40,04633	6,75550	11,70200	5,93	-1,2538
ex13_642.sacl	031-539	37,92487	6,36310	11,00500	5,96	-1,2219
ex13_643.sacl	032-540	35,48097	5,99700	10,36400	5,92	-1,0992
ex13_644.sacl	034-541	30,93778	5,22580	9,03450	5,92	-0,9618
ex13_645.sacl	035-535	28,88717	4,95150	8,53440	5,83	-0,8259
ex13_646.sacl	036-542	26,56052	4,52950	7,64390	5,86	-0,7826
ex13_647.sacl	037-537	24,69136	4,20320	7,21920	5,87	-0,7351
ex13_648.sacl	038-543	22,74641	3,91800	6,81560	5,81	-0,6313
ex13_649.sacl	039-546	20,42703	3,52320	6,04460	5,80	-0,5622
ex13_650.sacl	040-581	18,10055	3,13460	5,42580	5,77	-0,4855
ex13_651.sacl	041-549	14,80161	2,57870	4,36110	5,74	-0,3816
ex13_652.sacl	042-551	11,59606	2,03600	3,51160	5,70	-0,2832
ex13_653.sacl	043-552	8,20166	1,44940	2,49270	5,66	-0,1909
ex13_654.sacl	044-553	5,53317	0,97931	1,72380	5,65	-0,1273
ex13_655.sacl	045-554	2,52839	0,45437	0,78096	5,56	-0,0513

Tabela 5 – Leituras realizadas a partir do programa SAC. Ex11 até Ex13 (Tiro direto) e Ex13 até Ex11 (tiro reverso).

Dados	kstnm	Dist (km)	tP (s)	tS (s)	VaP(km/s)	T red
ex11_214.sacl	007-512	0,79072	0,19131	0,46515	4,13	0,0332
ex11_215.sacl	008-513	4,51434	0,80153	1,92650	5,63	-0,1013
ex11_216.sacl	010-515	10,11813	1,71470	3,00950	5,90	-0,3089
ex11_217.sacl	011-517	12,84639	2,14820	3,70970	5,98	-0,4211
ex11_218.sacl	013-518	18,29365	3,11130	5,37520	5,88	-0,5474
ex11_220.sacl	017-521	28,64926	4,91320	8,50320	5,83	-0,8167
ex11_221.sacl	018-522	31,00405	5,27760	9,10860	5,87	-0,9232
ex11_222.sacl	019-523	33,65154	5,74440	9,94510	5,86	-0,9859
ex11_223.sacl	020-525	36,31820	6,13770	10,63100	5,92	-1,1259
ex11_224.sacl	021-526	38,85873	6,58160	11,30700	5,90	-1,1901
ex11_226.sacl	024-534	46,26157	7,75790	13,44100	5,96	-1,4944
ex11_227.sacl	026-536	51,07101	8,53460	14,73000	5,98	-1,6796
ex11_228.sacl	028-538	55,99193	9,33020	16,10500	6,00	-1,8682
ex11_229.sacl	030-533	58,89232	9,82250	17,11100	6,00	-1,9560
ex11_230.sacl	031-539	61,49422	10,20600	17,65500	6,03	-2,0928
ex11_231.sacl	032-540	63,87794	10,62800	18,45100	6,01	-2,1476
ex11_232.sacl	034-541	68,69479	11,42100	19,70600	6,01	-2,3180
ex11_241.sacl	043-552	92,24148	15,22600	26,32900	6,06	-3,2223
ex11_242.sacl	044-553	95,20715	15,72400	26,97300	6,05	-3,3174
ex11_243.sacl	045-554	97,00914	16,09600	27,66300	6,03	-3,3058
ex11_244.sacl	046-558	98,38993	16,35000	28,51600	6,02	-3,3280
ex12_436.sacl	031-539	2,84924	0,51952	0,87605	5,48	-0,0503
ex12_437.sacl	032-540	4,95297	0,91363	1,58970	5,42	-0,0770
ex12_438.sacl	034-541	9,74205	1,71630	2,96510	5,68	-0,2321
ex12_439.sacl	035-535	12,16059	2,12960	3,67380	5,71	-0,3025
ex12_440.sacl	036-542	14,52110	2,48230	4,28270	5,85	-0,4219
ex12_441.sacl	037-537	16,69433	2,87100	4,93960	5,81	-0,4679
ex12_442.sacl	038-543	19,24412	3,30000	5,73390	5,83	-0,5488
ex12_443.sacl	039-546	21,33551	3,65290	6,33040	5,84	-0,6142
ex12_444.sacl	040-581	23,76676	4,00850	6,30300	5,93	-0,7449
ex12_445.sacl	041-549	26,78290	4,53050	6,94930	5,91	-0,8261
ex12_446.sacl	042-551	29,87963	5,06310	8,76540	5,90	-0,9128
ex12_447.sacl	043-552	33,35138	5,66640	9,67390	5,89	-1,0039
ex12_448.sacl	044-553	36,37922	6,13000	10,63000	5,93	-1,1458
ex12_449.sacl	045-554	38,39937	6,50090	11,11300	5,91	-1,1790
ex12_450.sacl	046-558	40,03020	6,72840	11,84600	5,95	-1,2776
ex13_624.sacl	005-510	104,98540	17,34100	29,96600	6,05	-3,6561
ex13_627.sacl	008-513	94,19054	15,63000	26,95500	6,03	-3,2081
ex13_632.sacl	017-521	70,14310	11,66100	20,11200	6,02	-2,3676
ex13_634.sacl	019-523	65,16031	10,86500	18,81200	6,00	-2,1671
ex13_635.sacl	020-525	62,69314	10,41900	18,04100	6,02	-2,1196
ex13_636.sacl	021-526	60,13606	10,07500	17,51100	5,97	-1,9522

ex13_638.sacl	024-534	55,10435	9,20520	16,17900	5,99	-1,8157
ex13_640.sacl	028-538	45,72451	7,63270	13,07900	5,99	-1,5122
ex13_641.sacl	030-533	40,04633	6,75550	11,70200	5,93	-1,2538
ex13_642.sacl	031-539	37,92487	6,36310	11,00500	5,96	-1,2219
ex13_643.sacl	032-540	35,48097	5,99700	10,36400	5,92	-1,0992
ex13_644.sacl	034-541	30,93778	5,22580	9,03450	5,92	-0,9618
ex13_645.sacl	035-535	28,88717	4,95150	8,53440	5,83	-0,8259
ex13_646.sacl	036-542	26,56052	4,52950	7,64390	5,86	-0,7826
ex13_647.sacl	037-537	24,69136	4,20320	7,21920	5,87	-0,7351
ex13_648.sacl	038-543	22,74641	3,91800	6,81560	5,81	-0,6313
ex13_649.sacl	039-546	20,42703	3,52320	6,04460	5,80	-0,5622
ex13_650.sacl	040-581	18,10055	3,13460	5,42580	5,77	-0,4855
ex13_651.sacl	041-549	14,80161	2,57870	4,36110	5,74	-0,3816
ex13_652.sacl	042-551	11,59606	2,03600	3,51160	5,70	-0,2832
ex13_653.sacl	043-552	8,20166	1,44940	2,49270	5,66	-0,1909
ex13_654.sacl	044-553	5,53317	0,97931	1,72380	5,65	-0,1273
ex13_655.sacl	045-554	2,52839	0,45437	0,78096	5,56	-0,0513
ex12_435.sacl	030-533	0,13942	0,36547	0,56898	0,38	0,3376
ex12_434.sacl	028-538	5,77863	1,24270	2,14470	4,65	0,0870
ex12_433.sacl	026-536	10,58272	2,12190	3,71110	4,99	0,0054
ex12_432.sacl	024-534	15,25879	2,60390	4,51990	5,86	-0,4479
ex12_430.sacl	021-526	20,29140	3,41580	5,90120	5,94	-0,6425
ex12_429.sacl	020-525	22,85999	3,79740	6,53190	6,02	-0,7746
ex12_428.sacl	019-523	25,42732	4,24860	7,65590	5,98	-0,8369
ex12_427.sacl	018-522	28,00988	4,62180	8,00120	6,06	-0,9802
ex12_426.sacl	017-521	30,44817	5,09510	8,98780	5,98	-0,9945
ex12_424.sacl	013-518	41,14824	6,97690	10,31900	5,90	-1,2527
ex12_423.sacl	011-517	46,76162	7,94700	13,75200	5,88	-1,4053
ex12_421.sacl	008-513	54,72338	9,13680	15,83300	5,99	-1,8079
ex12_420.sacl	007-512	59,14899	9,92700	17,12300	5,96	-1,9028