



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Geologia

Determinação da razão de Poisson da crosta e manto litosférico sob a linha de refração sísmica profunda NW-SE da Província Borborema

Autor:

Edson Jorge Tavares

Dissertação de Mestrado

Nº 329

Reinhardt A. Fuck

Orientador

José Eduardo P. Soares

Co-orientador:

Brasília

5 de setembro de 2014

Dissertação de Mestrado

Nº 329

Edson Jorge Tavares

**Determinação da razão de Poisson da crosta e manto litosférico sob a linha
de refração sísmica profunda NW-SE da Província Borborema**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito à obtenção do título de Mestre em geologia.

Área de concentração: Geologia regional

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Reinhardt Adolfo Fuck (Orientador)

Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Elton Luiz Dantas

Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Marcus Vinícius Aparecido Gomes de Lima

Universidade Federal do Pampa (Unipampa)

Prof. Dra. Roberta Mary Vidotti (Suplente)

Universidade de Brasília (UnB)

Brasília

5 de setembro de 2014

Agradecimentos

Gostaria de agradecer:

Aos professores e funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília que contribuíram para a minha formação intelectual e científica.

Ao Professor Dr. José Eduardo Pereira Soares, pelas lições de geofísica, principalmente sísmica, pelas sugestões e críticas e prontidão.

Ao Professor Dr. Reinhardt A. Fuck, por quem tenho muita admiração, pela orientação e prontidão.

Ao Professor Dr. Marcus Vinícius Aparecido Gomes de Lima pela ajuda e suporte oferecidos.

Ao Laboratório de Estudos da Litosfera da Universidade de Brasília (LabLitos) pelo suporte e dados disponibilizados.

Aos meus pais, Maria e Manoel, pelo carinho e ajuda em todos os aspectos, mesmo sem entender o que realmente eu estava fazendo, mas sempre prontos a apoiar.

Á minha noiva Flávia por todo apoio, carinho e amor; e por compreender todos os momentos de ausência.

A todos os amigos e colegas que acompanharam o andamento dessa dissertação.

Ao programa Instituto do Milênio por ter financiado o experimento executado no âmbito do projeto “Estudos geofísicos e tectônicos na Província Borborema, Nordeste do Brasil” (MCT/CNPq, 42.0222/2005-7) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Tectônicos (INCT-ET) que deu continuidade através do projeto “Estudo da estrutura da litosfera do Nordeste do Brasil” (MCT/CNPq, 573713/2008-1).

Á CAPES pela bolsa de pesquisa.

Resumo

TAVARES, E. J. **Determinação da razão de Poisson da crosta e manto litosférico sob a linha de refração sísmica profunda NW-SE da Província Borborema.** 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

Em novembro de 2008, foi realizado um levantamento de dados de refração sísmica profunda na Província Borborema, intitulada de Linha NW-SE da Província Borborema. Esse estudo fez parte de um projeto “Estudos geofísicos e tectônicos na Província Borborema, Nordeste do Brasil”, financiado pelo programa Instituto do Milênio do CNPq/MCT. Os objetivos desse trabalho são complementar o modelo de onda P, gerar modelos de onda S, razão V_p/V_s e razão de Poisson, sendo assim, buscar um melhor entendimento da crosta e do manto superior da região de estudo. São descritos os principais métodos utilizados, incluindo a aquisição e processamento, as principais feições identificadas e os modelos adquiridos. O modelo de onda P, o primeiro obtido, fornece a estruturação da crosta e evidencia uma região, onde a crosta se mostra afinada, localizada no Domínio Ceará Central. A partir da estruturação do modelo P, foi obtido o modelo S e com razão desses dois modelos foi possível se obter um modelo de razão V_p/V_s e conseqüentemente um modelo de razão de Poisson. Dessa forma, o que se observa é uma crosta superior com composição, de forma geral, félsica e uma crosta inferior com composição félsica na porção onde se localiza o Domínio Ceará Central e uma porção máfica no Domínio Rio Grande do Norte. Em relação, ao manto superior, a região nordeste da linha apresenta uma composição de intermediária a máfica e na parte sudeste uma composição entre intermediária a félsica. Possivelmente, pode ser explicado pelo retrabalhamento sofrido pela província durante o Cretáceo.

Palavras-chave: refração sísmica profunda, Província Borborema, Razão de Poisson, crosta.

Abstract

TAVARES, E. J. **Determination of Poisson's ratio of the crust and lithospheric mantle beneath the NW-SE line of deep seismic refraction Borborema Province.** 2014. 87f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

Deep seismic refraction experiment carried out in Borborema Province in November 2008, named line NW-SE Borborema Province. This study was part of project "Geophysical and Tectonic Studies in Borborema Province, Northeastern of Brazil", supported by the program *Instituto do Milênio* of CNPq/MCT. The objectives of this work are complementary model of P wave, generate models of S wave, ratio V_p/V_s and Poisson's ratio, for a better understanding of the crust and upper mantle of the study area. The main methods used are described, including the acquisition and processing, the main identified phases and models obtain. The model of the P wave, the first obtained, provides the structure of the crust and shows a region where the crust is shown stretched, located in Ceará Central Domain. Based on the structure of the model P the model of the S wave was obtained and with ratio these two models was possible to obtain a model of ratio V_p/V_s and consequently a model of Poisson's ratio. Thus, the composition of the upper crust, generally, is felsic and the lower crust with felsic composition in the Ceará Central Domain and mafic of the Rio Grande do Norte Domain. Regarding the upper mantle, northeast region of the line has a mafic composition and in the southeastern part a composition between felsic to intermediate which can be explained by reworking occurred in the region during the Cretaceous.

Keywords: Deep Seismic Refraction, Borborema Province, Poisson's ratio, crust.

Sumário

1.	Introdução, objetivos e localização	11
2.	Contexto geológico regional	14
3.	Metodologia	18
3.1.	Método da refração sísmica profunda	18
3.1.1.	Exemplo de aplicabilidade do método de refração sísmica profunda.....	20
3.2.	Método do traçado de raios e o programa RAYINVR.....	21
3.3.	Razão Vp/Vs e Razão de Poisson (σ).....	22
3.4.	Linearização X ² -T ² para as reflexões na Moho das ondas P (PmP).....	24
4.	Banco de dados e processamento.....	25
4.1.	Aquisição e processamento	25
4.2.	Identificação de fases	29
4.3.	Leitura e Classificação das fases nos sismogramas.....	29
5.	Modelagem.....	48
5.1.	Modelagem 2D.....	48
5.2.	Modelo P	68
5.3.	Modelo S	71
5.4.	Razão de Poisson e modelo Vp/Vs.....	73
5.4.1.	Modelo Vp/Vs e Razão de Poisson.....	73
5.5.	Interpretação	77
5.5.1.	Domínio Médio Coreaú	77
5.5.2.	Domínio Ceará Central	77
5.5.3.	Domínio Orós-Jaguaribe	78
5.5.4.	Domínio Rio Grande do Norte.....	79
5.5.5.	Domínio Zona Transversal.....	79
5.5.6.	Domínio Pernambuco-Alagoas	79
6.	Discussão	81
7.	Conclusões	82
8.	Referências Bibliográficas	83
9.	Apêndices.....	87
9.1.	Apêndice A.....	87

Lista de figuras

- Figura 1.1 - Mapa topográfico do nordeste do Brasil com a linha de refração sísmica profunda NW-SE da Província Borborema. Os pontos verdes representam os registradores e as estrelas vermelhas os pontos de tiro. Os tiros 1 ao 10 (porção NW) foram modelados em trabalhos de mestrado e iniciação científica realizados no Laboratório de Estudos da Litosfera do IG/UnB (LabLitos) e os tiros 10 a 19 (porção SE) correspondem à porção da linha modelada por Lima (2011). 13
- Figura 2.1 - Mapa geológico da província Borborema (Modificado de Oliveira, 2008). 15
- Figura 3.1- Sismograma hipotético mostrando as relações das curvas tempo-distância entre as ondas direta, refratada e refletida para um modelo de uma interface. B marca o ponto crítico e C o ponto onde a refração se torna primeira chegada. A onda direta é uma reta passando pela origem dos eixos com coeficiente angular igual ao inverso da velocidade da primeira camada. A onda refletida é uma hipérbole, assíntota à onda direta para grandes distâncias ($x \gg h$), e a onda refratada uma reta com início a partir da incidência crítica da frente de onda. Nesse ponto a refração e a reflexão são tangentes. Notar a grande amplitude das reflexões próximas ao ângulo crítico (Soares, 2005). 19
- Figura 3.2 – Estrutura média crustal para cinco tipos de províncias tectônicas (Mooney e Christensen, 1995). 20
- Figura 3.3 – Exemplo de gráfico gerado pelo software rayinvr. Acima: Traçado de raios. Abaixo: Representação gráfica dos tempos de trânsito reduzido. Linhas são dados calculados e círculos pretos correspondem os dados observados. ... 22
- Figura 3.4 – Gráficos T^2 versus X^2 (direita), depois da linearização e gráfico T versus X (esquerda). Exemplo de linearização da hipérbole de reflexão na Moho para o tiro 3 aplicando o método X^2-T^2 25
- Figura 4.1 - Seções sísmicas P e S do Tiro 1 montadas segundo a relação $V_p/V_s = t_s/t_p = 1,73$. Acima sismograma de onda P, com velocidade de redução de 8 km/s e filtrada na banda passante 1-10Hz, e abaixo sismograma de onda S com velocidade de redução de 4,62 km/s, filtrada na banda passante 2-6Hz, 27
- Figura 4.2 - Modelo genérico mostrando o traçado de raios sísmicos e as curvas tempo-distância da fase Pgranítica (P_g), que trafega pela crosta superior, da refração na crosta inferior (P_i), da refração na Moho (P_n) e da reflexão na Moho (P_mP). Essas são as principais fases utilizadas para a elaboração do modelo proposto. 28
- Figura 4.3 – Sismogramas do tiro 1 – Granja/CE. De cima para baixo: os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s, e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são S_g e P_g (traço vermelho), S_i e P_i (traço verde), S_mS e P_mP (traço azul) e S_n e P_n (traço amarelo). 30
- Figura 4.4–Sismogramas do tiro 2 – Coreau/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são S_g e P_g (traço vermelho), S_i e P_i (traço verde), S_mS e P_mP (traço azul) e P_n (traço amarelo). 31
- Figura 4.5 - Sismogramas do tiro 3 – Forquilha/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são S_g e P_g (traço vermelho), S_i e P_i (traço verde), S_mS e P_mP (traço azul) e P_n (traço amarelo). 32
- Figura 4.6 - Sismogramas do tiro 4 – Taperuaba/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são S_g e P_g (traço vermelho), S_i e P_i (traço verde), S_mS e P_mP (traço azul) e P_n (traço amarelo). 33
- Figura 4.7 - Sismogramas do tiro 5 – Itatira/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são S_g e P_g (traço vermelho), S_i e P_i (traço verde), S_mS e P_mP (traço azul) e P_n (traço amarelo). 34

Figura 4.8 - Sismogramas do tiro 6 – Choró/CE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Sn e Pn (traço amarelo).....	35
Figura 4.9 - Sismogramas do tiro 7 – Quixadá/CE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).....	36
Figura 4.10 - Sismogramas do tiro 8 – Jaguaratama/CE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).....	37
Figura 4.11 - Sismogramas do tiro 9 – Alto Santo/CE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).....	38
Figura 4.12 - Sismogramas do tiro 10 – Tabuleiro Grande/CE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P da distância de 450 a 850 km foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	39
Figura 4.13 - Sismogramas do tiro 11 – Catolé do Rocha/PB.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	40
Figura 4.14 - Sismogramas do tiro 12 – Serra Grande do Norte/RN.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	41
Figura 4.15 - Sismogramas do tiro 13 – Santa Luzia/PB.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	42
Figura 4.16 - Sismogramas do tiro 14 – Santo André/PB.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	43
Figura 4.17 - Sismogramas do tiro 15 – Cabaceiras/PB.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	44
Figura 4.18 - Sismogramas do tiro 16 – Vertentes/PE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).	45
Figura 4.19 - Sismogramas do tiro 17 – Cumaru/PE.De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução	

de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).	46
Figura 4.20 - - Sismogramas do tiro 19 – Serinhaém/PE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Sn e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	47
Figura 5.1 - Tiro 1 - Granja/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	50
Figura 5.2- Tiro 2 - Coreaú/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	51
Figura 5.3 -Tiro 3 - Forquilha/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	52
Figura 5.4- Tiro 4 - Tapuruaba/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	53
Figura 5.5 - Tiro 5 - Itaira/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	54
Figura 5.6 - Tiro 6 - Choró/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	55
Figura 5.7 - Tiro 7 - Quixadá/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	56
Figura 5.8 - Tiro 8 - Jaguaratama/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	57
Figura 5.9 - Tiro 9 - Alto Santo/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.	58
Figura 5.10 - Tiro 10 - Tabuleiro Grande/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P da distância de 450 a 850 km foi modificado de Lima <i>et al.</i> (2014).....	59

Figura 5.11 -Tiro 11 - Catolé do Rocha/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	60
Figura 5.12 - Tiro 12 - Serra Grande do Norte/RN. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	61
Figura 5.13 - Tiro 13 - Santa Luzia/PB. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	62
Figura 5.14 -Tiro 14 – Santo André/PB. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	63
Figura 5.15 - Tiro 15 - Cabaceiras/PB. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	64
Figura 5.16 -Tiro 16 - Vertentes/PE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	65
Figura 5.17 - Tiro 17 - Cumaru/PE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	66
Figura 5.18 -Tiro 19 - Serinhaém/PE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima et al. (2014).....	67
Figura 5.19 - Modelo sísmico de onda P, obtido da linha NW-SE levantada na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.	70
Figura 5.20 - Modelo sísmico de onda S, obtido da linha NW-SE levantada na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.	72
Figura 5.21 – Modelo Vp/Vs da linha NW-SE obtido de dados adquiridos na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.	75
Figura 5.22 — Modelo de Razão de Poisson da linha NW-SE obtido de dados adquiridos na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.	76
Figura 5.23 – Modelos interpretados. De cima para baixo: Modelo P, Modelo S e Modelo da razão Vp/Vs.	80

1. Introdução, objetivos e localização

A Província Borborema, localizada no nordeste brasileiro é um mosaico de faixas de rochas supracrustais neoproterozóicas e maciços arqueanos-paleoproterozóicos separados por zonas de cisalhamento (Brito Neves *et al.*, 2000). É dividida em sub-províncias setentrional, transversal e meridional limitadas pelos lineamentos Patos e Pernambuco, respectivamente (Van Schmus *et al.*, 1995, 2008, 2011).

As principais zonas de cisalhamento identificadas na província são os lineamentos Transbrasiliano (localmente conhecido como Sobral-Pedro II), Senador Pompeu, Portalegre, Patos e Pernambuco. A primeira separa os domínios Médio Coreau e Ceará Central. O lineamento Senador Pompeu separa os domínios Ceará Central e Orós-Jaguaribe, ao passo que a Zona de Cisalhamento Portoalegre separa este último do Domínio Rio Grande do Norte. O Lineamento Patos separa o Domínio Rio Grande do Norte e a Zona Transversal e o Lineamento Pernambuco separa a Zona Transversal e a sub-província meridional (Arthaud *et al.*, 2008; Brito Neves *et al.*, 2000).

A Província Borborema é uma região bastante estudada, com contexto geológico bem conhecido, subsistindo, porém, controvérsias sobre a natureza das zonas de cisalhamento em termos de serem limites litosféricos, além de limitadores de grandes domínios tectônicos.

O estudo da litosfera por métodos de refração sísmica profunda, revolucionou o conhecimento da crosta e manto superior. Além de determinar propriedade física da litosfera permite definir discontinuidades em profundidade. Embora seja um método muito útil no entendimento da estruturação crustal, é pouco utilizado na América do Sul, com exceção da região Andina. Esse tipo de levantamento é mais comum em países da Europa, América do Norte, Japão e Austrália.

No Brasil, experimento pioneiro de refração sísmica profunda foi realizado 1998 na Província Tocantins, região do Brasil central, pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) e pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB) (Berrocal *et al.*, 2004; Soares, 2005 e Soares *et al.*, 2006). Os resultados contribuíram para a determinação da estrutura crustal mais profunda e suas implicações na formação e evolução da Faixa Brasília e terrenos adjacentes.

Trabalhos desse tipo tiveram continuidade no nordeste do Brasil, na Província Borborema, em experimento executado no âmbito do projeto “Estudos geofísicos e tectônicos na Província Borborema, Nordeste do Brasil” (MCT/CNPq, 42.0222/2005-7), financiado pelo programa Instituto do Milênio, que teve continuidade no “Estudo da estrutura da litosfera do Nordeste do Brasil” (MCT/CNPq, 573713/2008-1) do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Tectônicos (INCT-ET).

Os projetos incluíram estudos geofísicos de gravimetria, magnetotélúrico, sismologia e refração sísmica profunda, além de investigações geológicas e neotectônicas, tendo como foco a Província Borborema e o Cráton do São Francisco com a finalidade de determinar a estrutura da litosfera e aprofundar o conhecimento sobre a história tectônica da região.

O levantamento de refração sísmica profunda foi realizado em novembro de 2008, ao longo de perfil NW-SE de aproximadamente 880 km de extensão, estendendo-se de Granja, Ceará até Serinhaém, Pernambuco cruzando as principais descontinuidades da Província Borborema. A linha de refração foi levantada com sensores distribuídos a cada 2,2 km e tiros a cada 50 km ao longo do perfil, totalizando 19 pontos de tiros (Figura 1.1). Os tiros internos tiveram carga de 1,4 tonelada; e os tiros extremos carregados com 4,0 toneladas. De NW para SE a linha cruza os domínios: i) Domínio Médio Coreaú, ii) Domínio Ceará Central, iii) Domínio Orós-Jaguaribe; iv) Domínio Rio Grande do Norte e v) Zona Transversal (Figura 2.1).

A pesquisa proposta neste trabalho inclui: i) integrar os modelos de onda P dos diferentes domínios tectônicos obtidos em trabalhos de mestrado e iniciação científica realizados no Laboratório de Estudos da Litosfera do IG/UnB (LabLitos) e no trabalho de doutoramento de Lima (2011), que realizou a modelagem de onda P dos domínios Rio Grande do Norte e Zona Transversal (Figura 2.1); ii) ler as fases S e modelar a distribuição de velocidades das onda S ao longo do perfil; iii) calcular a razão das velocidades de onda P e das velocidades de onda S (V_p/V_s) e razão de Poisson da crosta e manto litosférico, e iv) interpretar os resultados.

Portanto, pretende-se discutir o comportamento em profundidade das principais interfaces encontradas, relacionar a estrutura profunda da litosfera com os domínios geológicas de superfície, e conseqüentemente aprimorar o entendimento da evolução tectônica

da Província Borborema. Espera-se, particularmente, determinar a composição da crosta inferior ao longo do perfil.

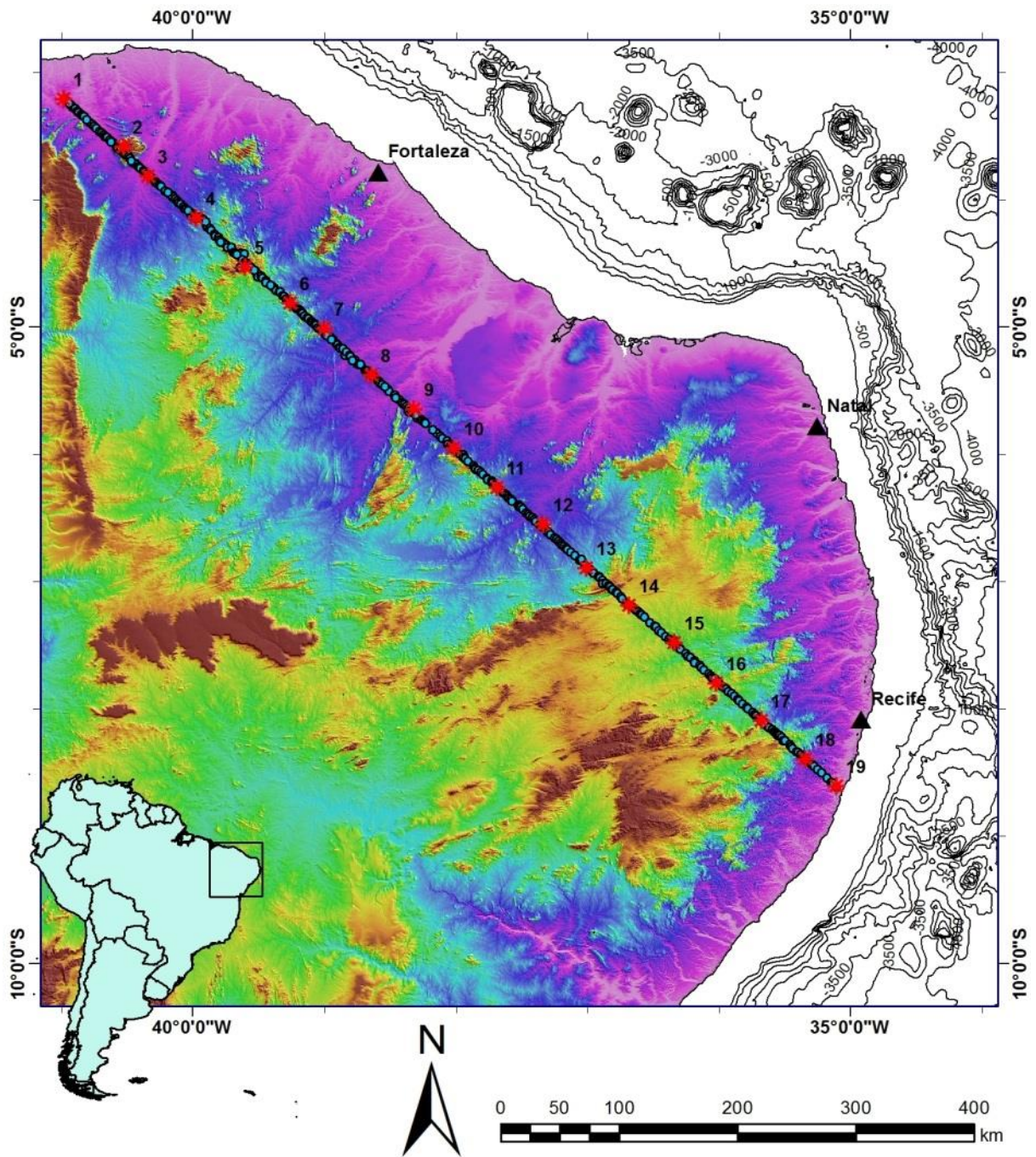


Figura 1.1 - Mapa topográfico do nordeste do Brasil com a linha de refração sísmica profunda NW-SE da Província Borborema. Os pontos verdes representam os registradores e as estrelas vermelhas os pontos de tiro. Os tiros 1 a 10 (porção NW) foram modelados em trabalhos de mestrado e iniciação científica realizados no Laboratório de Estudos da Litosfera do IG/UnB (LabLitos) e os tiros 10 a 19 (porção SE) correspondem à porção da linha modelada por Lima (2011).

2. Contexto geológico regional

Como o Brasil é um país de dimensões continentais, o conceito de províncias estruturais foi aplicado por Almeida *et al.* (1977, 1981), identificando 10 províncias maiores, considerando como grandes regiões geológicas que mostram feições estratigráficas, tectônicas, magmáticas e metamórficas próprias. Sendo assim, a Província Borborema é uma dessas regiões maiores caracterizada por apresentar uma grande variedade estrutural que vai além dos seus limites formais, encobertas a oeste pelos depósitos fanerozóicos da Bacia do Parnaíba, a norte e leste pelas bacias meso-cenozóicas costeiras e da margem continental e a sul pelo Cráton São Francisco.

No contexto da tectônica global, essas estruturas encontram sua contraparte no Continente Africano. A província é constituída por unidades do Arqueano e principalmente do Paleoproterozóico e Neoproterozóico. Embora, tenha uma grande diversidade estrutural, foi formada predominantemente durante a Orogenia Brasiliana, conforme é indicado pelo magmatismo associado a zonas de cisalhamento dispostas em leque, datado do Neoproterozóico (Britos Neves *et al.*, 2000; Schobbenhaus & Brito Neves, 2003).

A Província Borborema pode ser dividida em três sub-províncias, setentrional, transversal e meridional, separadas pelos Lineamentos Patos e Pernambuco (Van Schmus *et al.*, 1995, 2011; Brito Neves *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2010) (Figura 2.1). O presente trabalho tem o foco nas sub-províncias setentrional e na zona transversal, por sua vez subdivididas em domínios e subdomínios (Figura 2.1), com base em características litoestratigráficas, feições estruturais, dados geocronológicos e aspectos geofísicos (Delgado *et al.*, 2003).

Na parte setentrional, a Província Borborema é subdividida nos domínios Médio-Coreaú, Ceará Central, Orós-Jaguaribe e Rio Grande do Norte, limitados pelas zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II, Senador Pompéu, Portalegre e Patos (Brito Neves *et al.*, 2000; Arthud *et al.*, 2008; Oliveira, 2008; Santos *et al.*, 2010).

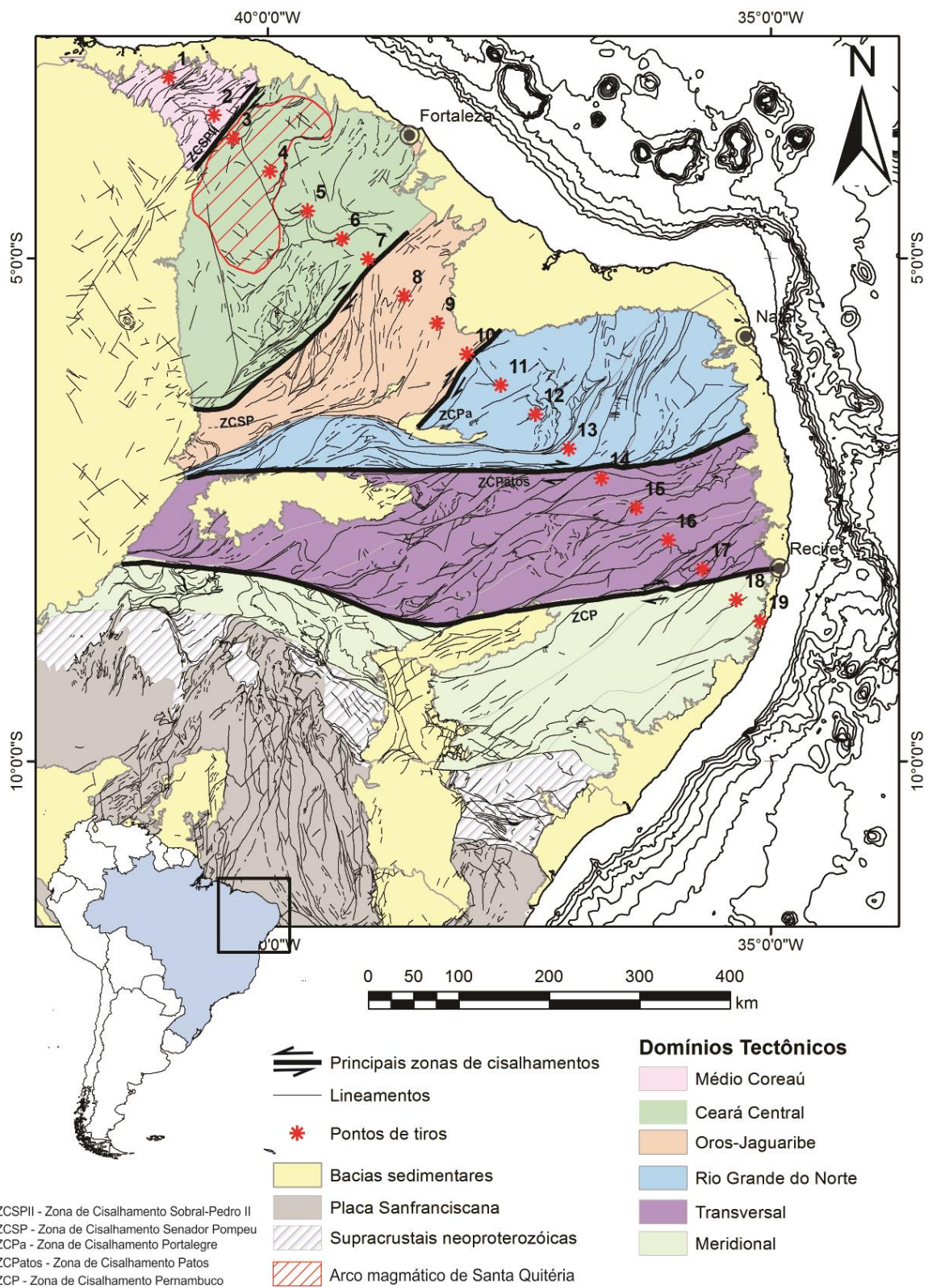


Figura 2.1 - Mapa geológico da província Borborema (Modificado de Oliveira, 2008).

O Domínio Médio-Coreaú se situa entre a margem do Cráton São Luiz e o Lineamento Transbrasiliano (localmente conhecido como Sobral-Pedro II). Consiste em rochas de alto grau metamórfico e segmentos vulcano-sedimentares (Grupo Martinópolis) e rochas pelito-carbonatadas (Grupo Ubajara). Ao longo do lineamento Sobral-Pedro II ocorre a bacia transtensional do Jaibaras e intrusões pós-orogênicas. A oeste o domínio é encoberto por rochas sedimentares fanerozóicas da Bacia do Parnaíba (Brito-Neves *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2008).

O Domínio Ceará Central, limitado pelas zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II e Senador Pompeu, consiste em rochas ortognaissicas formadas durante o Riáciano, que incluem importante núcleo arqueano (Maciço Tróia-Pedra Branca), que constituem embasamento para o Grupo Ceará, compreendendo pilha de *nappes* de rochas supracrustais neoproterozóicas, o arco magmático neoproterozóico Santa Quitéria e grande número de intrusões graníticas tardi- a pós- orogênicos e anorogênicos (Brito-Neves *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2008; Fetter *et al.*, 2000, 2003; Arthaud *et al.*, 2008).

O Domínio Orós-Jaguaribe é constituído por duas faixas metavulcano-sedimentares do Paleoproterozóico tardio, associadas a ortognaisses, geralmente porfiríticos, sub-alcálicos a alcálicos (Sá *et al.*, 1995). As faixas são separadas por gnaisses do embasamento que pode ser subdividido em dois blocos, o bloco Jaguaribama a leste e o bloco São Nicolau na porção oeste. São faixas contínuas de direção NNE que, próximo às cidades de Icó e Iguatu, assumem direção ENE (virgação de Icó), ajustando-se ao lineamento Patos e estabelecendo formato sigmoidal para o cinturão Orós-Jaguaribe (Parente e Arthaud, 1995; Campelo, 1999). Brito Neves *et al.* (2000) incluem o domínio no Domínio Rio Grande do Norte.

O Domínio Rio Grande do Norte é limitado pelas zonas de cisalhamento Portalegre e Patos, a noroeste e sul, respectivamente. É constituído principalmente pelos Maciços Rio Piranhas e São José do Campestre, sendo seu limite encoberto pela Faixa Seridó.

Maciço São José do Campestre é caracterizado por diversos episódios de acreção crustal e magmatismo datados do paleoarqueano e neoarqueano, composto essencialmente por ortognaisses, com afinidade geoquímica tonalito-trondjemito-granodiorito (TTG) e composição peraluminosa a metaluminosa (Dantas *et al.*, 2004, 1998).

Maciço Rio Piranhas é composto principalmente por ortognaisses cálcio-alcálicos do Complexo Caicó datados em 2,20 Ga a 2,15 Ga, e compreende também exposições de rochas metassedimentares da Faixa Seridó e magmatismo neoproterozóico (Jardim de Sá, 1994; Souza *et al.*, 2007).

Faixa Seridó compreende sequência vulcano-sedimentar pertencente ao Grupo Seridó, alongada preferencialmente na direção NE-SW e intrusões graníticas do Neoproterozóico (Jardim de Sá, 1994; Van Schmus *et al.*, 2003).

A Zona Transversal é limitada pelas zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco a norte e a sul, respectivamente. Esse domínio é composto, de oeste para leste, pelos terrenos Pianco-Alto Brígida, Alto Pajeú, Alto Moxotó e Rio Capibaribe (Brito Neves *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2010; Van Schmus *et al.*, 2011).

O Terreno Pianco-Alto Brígida compreende o Grupo Cachoeirinha, que inclui filitos e xistos, metaconglomerados e raramente formações ferríferas, mármore e metavulcânicas associados a formações ferríferas (Brito Neves *et al.*, 2005; Van Schmus *et al.*, 2011).

Terreno Alto Pajeú compreende rochas metassedimentares, metavulcânicas e metaplutônicas pertencentes a Suíte Cariri Velhos de idades eoneoproterozóicas. Ocorrem também plútons relacionados ao evento brasileiro. Esse terreno possui associação vulcano-sedimentar denominada de Complexo São Caetano caracterizado como uma sequência metassedimentar e metavulcanoclástica predominantemente félsica-intermediária (Rodrigues e Brito Neves, 2008).

O Terreno Alto Moxotó tem predomínio de rochas paleoproterozóicas, raras intrusões graníticas de idades neoproterozóicas. Este terreno compreende uma série de ortognaisses e paragnaisses aluminosos. Os paragnaisses aluminosos constituem a unidade litoestratigráfica denominada de Complexo Sertânia (Rodrigues e Brito Neves, 2008).

Terreno Rio Capibaribe compreende embasamento Paleoproterozóico, intrusões anorogênicas Mesoproterozóicas e Paleoproterozóicas, rochas supracrustais e intrusões graníticas Neoproterozóicas (Brito Neves *et al.*, 2000, Sá *et al.*, 2002).

3. Metodologia

3.1. Método da refração sísmica profunda

O método da refração sísmica profunda é baseado no tempo de propagação de ondas elásticas refratadas e reflexões de grande ângulo e trabalha com fonte controlada. Permite caracterizar a crosta e manto litosférico a partir da distribuição de velocidades das ondas sísmicas compressivas (V_p) e cisalhantes (V_s) e, conseqüentemente, do posicionamento das discontinuidades em profundidade. Possibilita ainda inferir a composição das rochas pela determinação da razão dessas velocidades.

Os levantamentos de refração sísmica profunda são realizados com arranjos de sensores sete a dez vezes maiores que a profundidade alvo, e tiros regulares ao longo dos perfis. No estudo da crosta continental os arranjos são de aproximadamente 250 km a 400 km de comprimento, com tiros a cada 20-100 km. Esses arranjos visam registrar a refração da Moho como primeira chegada e, também, porções significativas das curvas de refração e reflexão, aprimorando a estimativa da velocidade. Os tiros regulares permitem o controle das variações laterais do meio (Green, 1974; Soares, 2005).

Refração sísmica profunda trabalha com os ajustes de fases das ondas direta, refratadas e refletidas no ângulo crítico e acima deste (Figura 3.1). As fases mais proeminentes são as primeiras chegadas e as reflexões próximas ao ângulo crítico. As primeiras chegadas representam a onda direta e a refração da Moho, enquanto as reflexões de grande ângulo marcam as discontinuidades internas da crosta e, principalmente, a Moho (Green, 1974; Soares, 2005). A refração da crosta inferior normalmente não aparece como primeira quebra, mas pode ser identificada nas partes internas de sismograma, em *offsets* acima do ponto de cruzamento (*crossover*).

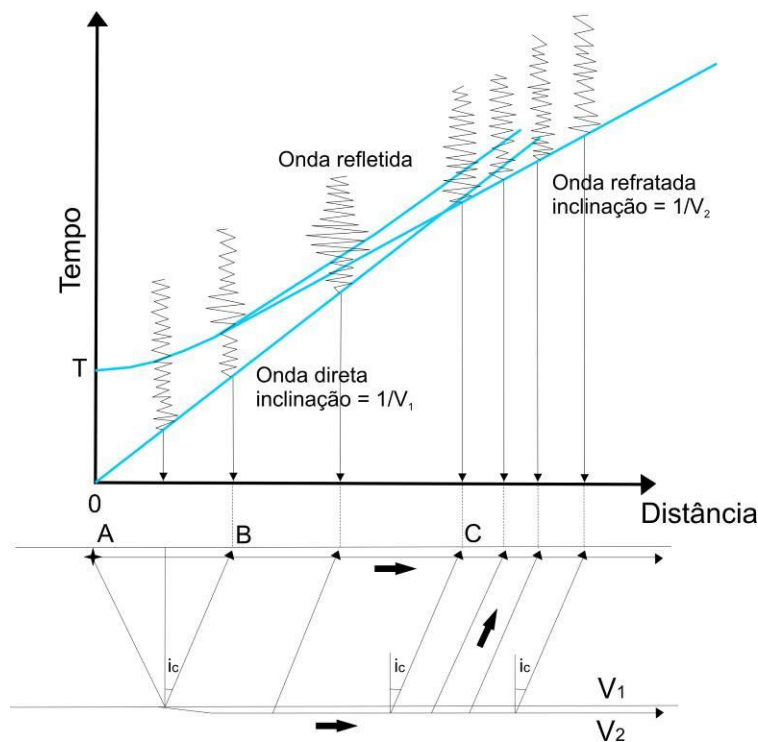


Figura 3.1- Sismograma hipotético mostrando as relações das curvas tempo-distância entre as ondas direta, refratada e refletida para um modelo de uma interface. B marca o ponto crítico e C o ponto onde a refração se torna primeira chegada. A onda direta é uma reta passando pela origem dos eixos com coeficiente angular igual ao inverso da velocidade da primeira camada. A onda refletida é uma hipérbole, assíntota à onda direta para grandes distâncias ($x \gg h$), e a onda refratada uma reta com início a partir da incidência crítica da frente de onda. Nesse ponto a refração e a reflexão são tangentes. Notar a grande amplitude das reflexões próximas ao ângulo crítico (Soares, 2005).

Reflexões são usadas na determinação dos contrastes positivos de velocidade do meio. Quanto maior o gradiente de velocidade, mais distante da fonte se situa o ponto crítico e vice-versa. Por vezes, as reflexões revelam detalhes da estrutura da crosta e do manto superior, não identificados pelas fases refratadas. Em reconhecimento à importância da reflexão de grande ângulo na interpretação dos dados de refração sísmica profunda, é comum o termo refração/reflexão de grande ângulo na literatura (Soares, 2005).

As fases da onda direta, assim como as ondas refratadas no meio, se alinham nas seções sísmicas, formando retas traduzidas matematicamente em equações de primeiro grau, nas quais a inclinação do segmento de reta é o inverso da velocidade (Equação 1 e 2). O alinhamento de fases da onda direta e refratada na Moho é marcado como as primeiras chegadas nas seções sísmicas. As reflexões de alto ângulo na Moho formam hipérboles

assíntotas à onda direta e tangente à onda refratada no ponto crítico traduzidas matematicamente em equações do segundo grau (Equação 3).

$$t = \frac{x}{V_1} \quad (1);$$

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h \cos \theta_c}{V_1} \quad (2) \text{ e}$$

$$t^2 = \frac{x^2}{(\bar{V})^2} + \frac{(2h)^2}{(\bar{V})^2} \quad (3),$$

onde t é o tempo de trânsito, x é a distância ao ponto de tiro, θ_c é o ângulo crítico, h é espessura da camada, V_1 é a velocidade da onda direta e V_2 é a velocidade da camada subjacente, \bar{V} é velocidade média do pacote acima do refletor. Sendo que $V_2 > V_1$.

3.1.1. Exemplo de aplicabilidade do método de refração sísmica profunda

O trabalho de Christensen e Mooney (1995) organizou dados de velocidades de ondas sísmicas compressivas (V_p), baseado em dados de laboratório e dados de perfis de refração sísmica profunda realizados em várias regiões do mundo. O objetivo era correlacionar províncias tectônicas a tipos de crostas continentais. Esse estudo permitiu propor cinco tipos de crostas baseadas em distribuição de velocidade de ondas compressivas (V_p): Orógenos, escudos e plataformas, arcos continentais, riftes e crosta estendida.

A figura 3.2 sumariza a classificação proposta por Christensen e Mooney (1995).

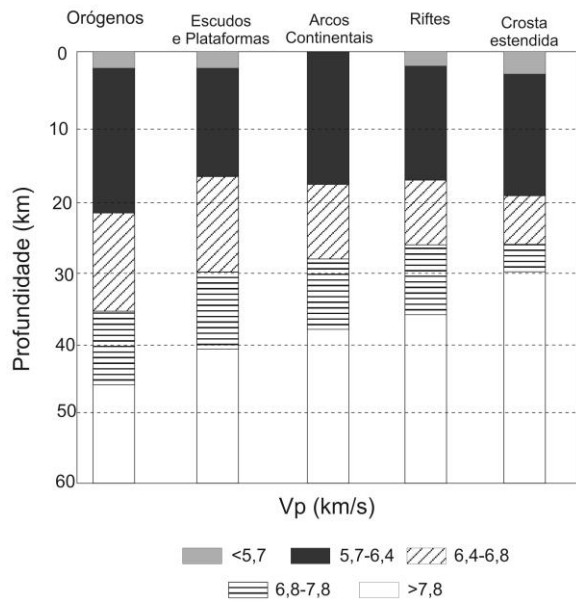


Figura 3.2 – Estrutura média crustal para cinco tipos de províncias tectônicas (Mooney e Christensen, 1995).

3.2. Método do traçado de raios e o programa RAYINVR

O método do traçado de raio tem sido amplamente utilizado para a realização de modelagens de estrutura crustal por ser um método computacionalmente rápido de simulação de propagação de ondas sísmicas e eficiente a medida que proporciona cálculo de tempo de trânsito, amplitudes reais e fases, ângulo de incidência, entre outros (Cerveny, 2001).

O método consiste da solução numérica de um par de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem que formam as equações do método do raio para meios 2-D. O tamanho do passo do raio é automaticamente ajustado em cada interação para maximizar a eficiência dos cálculos enquanto mantém a precisão. Os tempos de trânsito são calculados por integração ao longo da trajetória dos raios usando a regra trapezoidal (Zelt e Ellis, 1988).

O programa RAYINVR (Zelt e Smith, 1992) assume meio isotrópico 2-D (x,z). O modelo de velocidades é composto de sequências de camadas separadas por interfaces consistindo de segmentos de linha com inclinação arbitrária. A velocidade dentro de uma camada é definida por valores de velocidade especificados em coordenadas arbitrarias no eixo x ao longo do topo e da base da camada. As coordenadas no eixo x dos contornos das camadas e suas velocidades, superior e inferior, podem ser gerais e independentes dentro e entre as camadas. O modelo é automaticamente dividido numa rede irregular de trapezóides, cada um com contornos superior e inferior inclinados e lados verticais. As velocidades nos quatro cantos do trapezóide são usadas para interpolar um campo de velocidade no interior do trapezóide de modo que a velocidade varia linearmente ao longo dos seus quatro lados. Portanto, gradientes de velocidade horizontal e vertical podem existir dentro do trapezóide. As fontes podem ser posicionadas em qualquer lugar do modelo e os raios podem ser traçados em qualquer ângulo. Os receptores são sempre posicionados no topo do modelo. As propagações de ondas P e S, podem ser consideradas. As fases refletidas e refratadas (*head waves* e/ou *diving waves*) podem ser traçadas.

Um gráfico do modelo com todos os raios traçados pode ser produzido, juntamente com a representação gráfica dos tempos de trânsito reduzido pela distância para os dados calculados e observados (Figura 3.3)

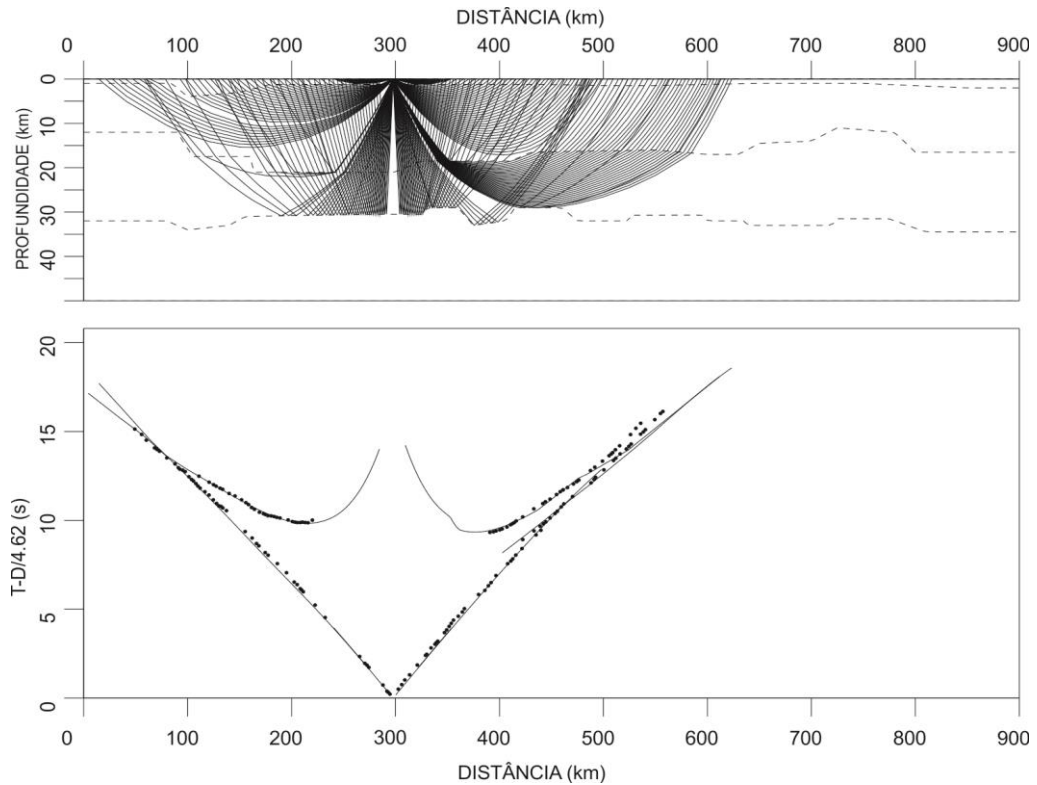


Figura 3.3 – Exemplo de gráfico gerado pelo software rayinvr. Acima: Traçado de raios. Abaixo: Representação gráfica dos tempos de trânsito reduzido. Linhas são dados calculados e círculos pretos correspondem os dados observados.

3.3. Razão V_p/V_s e Razão de Poisson (σ)

A razão de velocidades (V_p/V_s) das ondas compressivas (ondas P) e cisalhantes (ondas S) é uma medida adimensional particularmente sensível ao conteúdo de sílica das rochas, o que permite classificá-las segundo composição félsica, intermediária ou máfica. A razão V_p/V_s ressalta variações reológicas e de composição da crosta não observadas com o imageamento V_p e/ou V_s separadamente. (Zandt e Ammon, 1995; Mussachio *et al.*, 1997). Segundo Lowry e Pérez-Gussinyé (2011), quanto maior o conteúdo de sílica das rochas menor a resistência ao estiramento.

Considerando que a V_p/V_s média e T_s/T_p são aproximadamente 1,73, para a confecção dos sismogramas das ondas S foi seguida a relação:

$$\frac{V_p}{V_s} \text{ média} = \frac{t_s}{t_p} = 1,73 \Leftrightarrow t_s = 1,73 t_p; V_s = V_p/1,73 \quad (4)$$

onde t_s é valor máximo da janela de tempo das seções S (estabelecido em 20,76 segundos), t_p é o valor da janela de tempo das seções P (estabelecido em 12 segundos), V_p é o valor de velocidade de redução para os sismogramas P (estabelecido em 8,0 km/s) e V_s o valor de velocidade de redução para os sismogramas S (estabelecido em 4,62 km/s). Dessa forma os sismogramas S e P apresentam aspecto similar facilitando a identificação das fases.

Em Mussachio *et al.* (1997), valores de V_p/V_s próximos de 1,73-1,75, indicaram uma composição félsica e valores maiores ou iguais a 1,80, indicaram composição máfica. O aumento no valor da razão V_p/V_s é devido principalmente a minerais como plagioclásio, anfibólio, piroxênio e Fe-olivina.

Através da razão V_p/V_s é possível obter a razão de Poisson (σ). Essa razão é uma constante elástica definida pela relação entre a deformação transversa e longitudinal sofrida por um corpo quando aplicada uma tensão unidirecional, compressiva ou distensiva, e seu valor médio para os sólidos é 0,25. A equação 5 (Christensen, 1996) representa a razão de Poisson em função da razão V_p/V_s .

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \right] \quad (5)$$

Os valores da razão de Poisson variam entre 0 e 0,5. O valor de σ igual a 0,5 é encontrado em material sem rigidez (líquido), casos em que a razão V_p/V_s tenderia a infinito (Christensen, 1996). Para as rochas os valores da razão de Poisson em média estão em torno de 0,25. O valor da razão de Poisson nas rochas é dependente da composição, anisotropia e pressão de poro (Zandt & Ammon, 1995).

As rochas em geral apresentam valor de σ baseado na associação de minerais que a compõem e na trama ou textura. Quartzo apresenta σ em torno de 0,077, enquanto minerais máficos, como hornblenda e forsterita, mostram σ próximo a 0,287 e 0,240, respectivamente.

As rochas com alto teor de quartzo penderão para σ mais baixo, como granito com 0,237 e quartzito com 0,077 (Christensen, 1996).

Zandt e Ammon (1995) estabelecem que uma região com σ menor que 0,26 pode ser caracterizada como félsica. Para valores maiores que 0,26 e menores que 0,28 se enquadraria

em uma composição intermediária e para uma razão de Poisson maior que 0,28 pode ser classificada como máfica.

A obtenção da razão V_p/V_s , e por consequência a razão de Poisson, seguirá os procedimentos utilizados por Melo (2006) e Ventura (2010). Os dados para as ondas P já foram analisados e o modelo para a linha NW-SE da Província Borborema foi obtido em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Estudos da Litosfera do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (LabLitos/IG/UnB) e no trabalho de Lima (2011). Para as ondas S foram montadas as seções sísmicas de todos os tiros.

Os alinhamentos das fases S nas seções sísmicas tendem a ser iguais aos alinhamentos de fases das seções P. A partir das fases sísmicas identificadas e lidas, foi realizada modelagem 2D do tempo de trânsito das ondas S, variando a distribuição de velocidades do modelo e mantendo a geometria obtida a partir da análise das ondas P.

Com a utilização do Programa RAYINVR (Zelt & Smith, 1992) foram realizadas mudanças na distribuição de velocidades S, até que as curvas teóricas (geradas pelo RAYINVR) se ajustassem às fases de referência lidas nas seções. Dividindo o grid de velocidades das ondas P pelo grid de velocidade das ondas S foi obtida imagem da razão V_p/V_s da crosta e manto litosférico sob o perfil sísmico.

3.4. Linearização X^2-T^2 para as reflexões na Moho das ondas P (PmP)

A linearização X^2-T^2 é utilizada nas reflexões para obtenção de modelos prévios da crosta. Em estudos crustais a utilização do método permite a aproximação da espessura e da velocidade média da crosta da região estudada.

Os resultados podem ser obtidos a partir de gráfico T^2 versus X^2 , onde T é o tempo de trânsito da reflexão e X é a distância em relação a fonte-receptor. Nesse gráfico a distribuição dos pontos é aproximada a uma reta, onde o ponto de intersecção é igual a $(2Z)^2/\bar{V}^2$ e a inclinação é igual a $1/\bar{V}^2$. V representa velocidade média e Z a profundidade. A partir desses valores é possível estimar a profundidade da Moho e velocidade média da crosta (Figura 3.4).

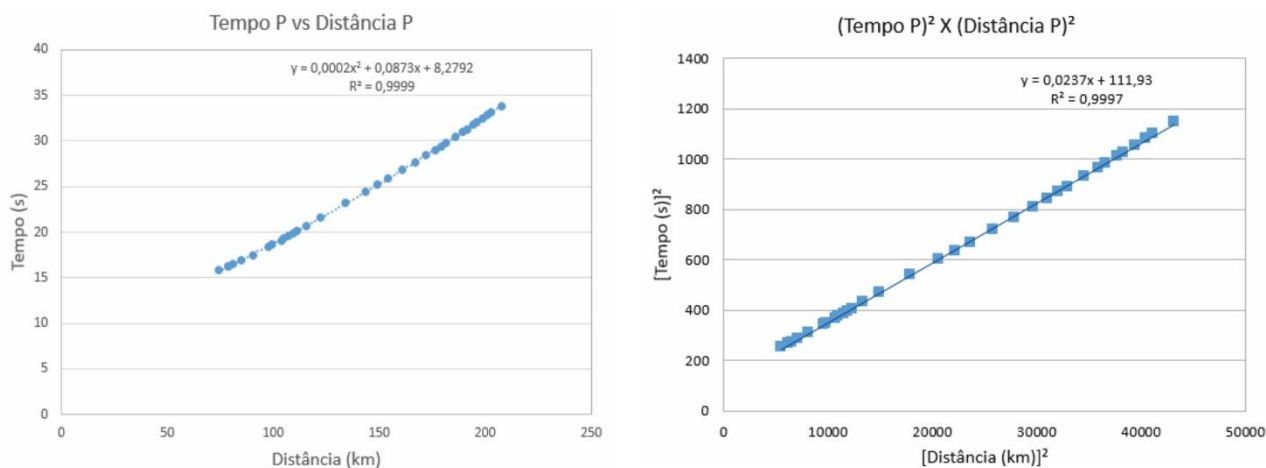


Figura 3.4 – Gráficos T^2 versus X^2 (direita), depois da linearização e gráfico T versus X (esquerda). Exemplo de linearização da hipérbole de reflexão na Moho para o tiro 3 aplicando o método X^2-T^2 .

4. Banco de dados e processamento

4.1. Aquisição e processamento

Os dados sísmicos foram adquiridos em experimento realizado nos meses de outubro e novembro de 2008, ao longo de perfil de 880 km de extensão na direção NW-SE, do município de Granja, no Ceará até Serinhaém, em Pernambuco. Foram utilizados 330 estações verticais e 40 estações triaxiais, um a cada 2,2 km e 19 pontos de tiro, um a cada 50 km ao longo do perfil.

Os tiros foram realizados em furos de 10 polegadas de diâmetro e 45 m de profundidade com o explosivo, em forma de gel, acomodado nos dois terços inferiores do furo e a porção superior tamponada com brita. Os tiros extremos foram detonados com carga de 4,0 toneladas de explosivo e os tiros intermediários com carga de 1,4 toneladas.

O detalhamento das instalações, das características dos instrumentos de campo utilizados e detalhes das explosões podem ser consultados no capítulo 3 da tese de Lima (2011).

Após a coleta, os dados foram submetidos a etapas de pré-processamento e processamento, que podem ser resumidas em:

- I. Conversão dos dados do formato original dos equipamentos (Texan-SEGYSAC e Reftek-MSEED-SAC) para o formato SAC, conversão necessária para o processamento com a utilização do programa Seismic Analysis Code (Tapley e Tull, 1991);
- II. Correção da deriva de tempo dos registradores Texans, realizada antes da conversão do formato Texan para SEGYS. Como os registradores Texans trabalham sem GPS, faz-se necessário a correção de deriva de tempo.
- III. Edição dos cabeçalhos dos traços incluindo hora origem do evento; latitude e longitude da estação; elevação da estação; latitude, longitude e profundidade da explosão.
- IV. Corte dos registros em janelas de 150 s com início na hora origem do evento.
- V. Construção das seções sísmicas de refração das ondas P e S reduzidas com velocidade de 8,0 km/s e 4,62 km/s, respectivamente, e filtradas na banda passante de 1-10 Hz para onda P e de 2-6 Hz para onda S (Figura 4.1). Os filtros foram determinados por tentativa e erro.

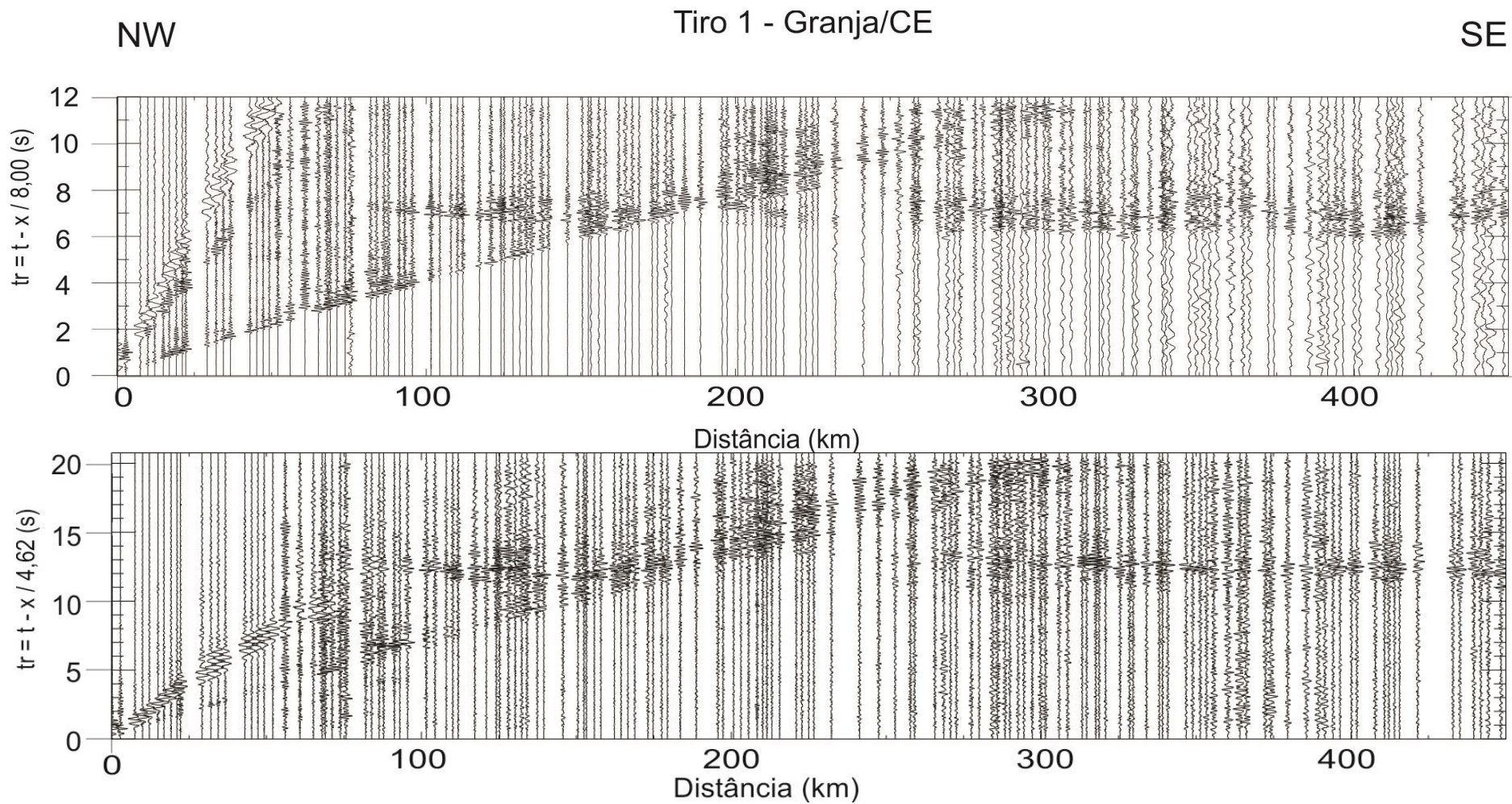


Figura 4.1 - Seções sísmicas P e S do Tiro 1 montadas segundo a relação $V_p/V_s = t_s/t_p = 1,73$. Acima sismograma de onda P, com velocidade de redução de 8 km/s e filtrada na banda passante 1-10Hz, e abaixo sismograma de onda S com velocidade de redução de 4,62 km/s, filtrada na banda passante 2-6 Hz.

O processamento dos dados de refração profunda consistiu basicamente em preparar as seções sísmicas, identificar as fases primárias e secundárias e classificá-las em onda direta (Pg/Sg), refratada (Pi/Si e Pn/Sn) e refletida (PmP/SmS) (Figura 4.2), e a partir do tempo de trânsito dessas fases gerar modelo para cada seção.

Compor os modelos individuais para a obtenção de modelo único e realizar a modelagem direta utilizando método do traçado de raio para obtenção do modelo final, que deve acomodar o tempo de trânsito de todas as fases das seções sísmicas simultaneamente. O modelo final deve satisfazer os dados de refração sísmica, acomodando de forma geral as informações geofísicas e geológicas existentes (Soares *et al.*,2006).

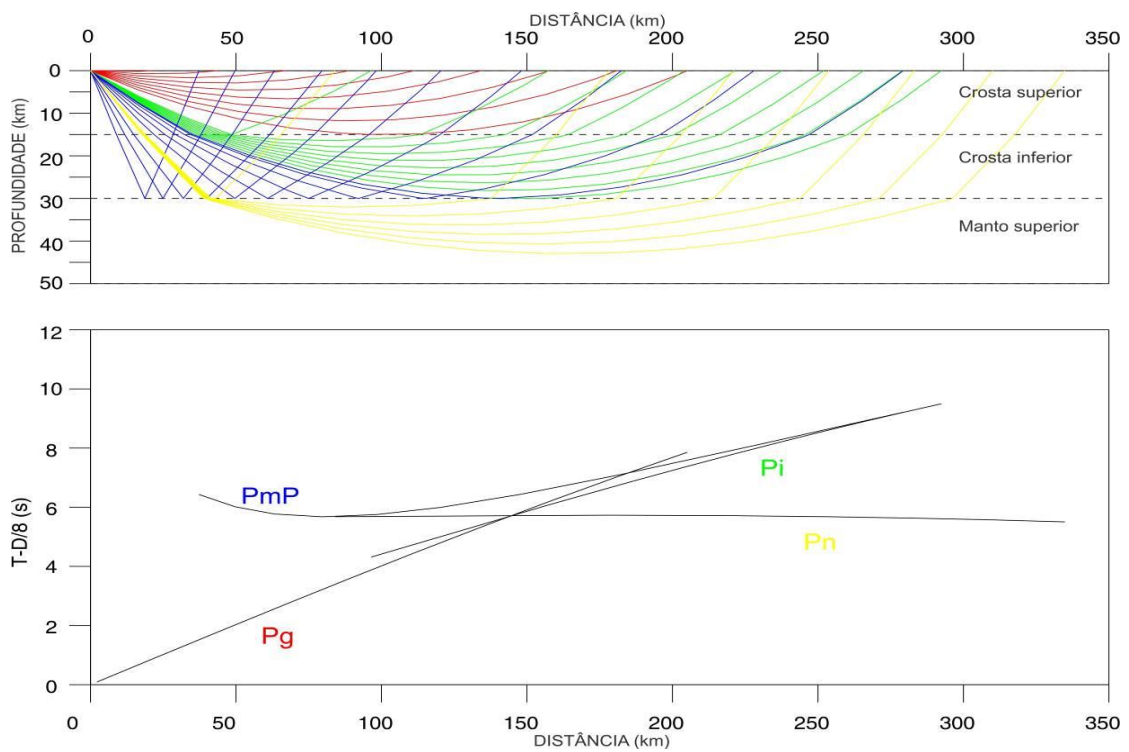


Figura 4.2 - Modelo genérico mostrando o traçado de raios sísmicos e as curvas tempo-distância da fase Pgranítica (Pg), que trafega pela crosta superior, da refração na crosta inferior (Pi), da refração na Moho (Pn) e da reflexão na Moho (PmP). Essas são as principais fases utilizadas para a elaboração do modelo proposto.

Com a identificação e classificação dos alinhamentos de fases, primários e secundários mais evidentes nos sismogramas de onda P e S foi realizada a leitura do tempo de chegada das fases, e em seguida realizada a modelagem 2D do tempo de chegada das fases para os

diferentes domínios utilizando o programa de traçado de raio RAYINVR (Zelt e Smith, 1992).

4.2. Identificação de fases

Como mencionado, em estudos de refração sísmica profunda são observadas três fases principais para ondas P e S (Figura 4.2):

Pg e Sg: Trafegam na crosta superior;

PmP e SmS: São reflexões na descontinuidade de Moho;

Pn e Sn: Refração na descontinuidade de Moho;

Pi e Si: Fases internas dos sismogramas, refração na crosta inferior

O formato das curvas (tempo x distância) pode variar de acordo com a distribuição das velocidades das ondas sísmicas, com variação da espessura das camadas e com o tipo de descontinuidades encontradas ao longo do percurso.

4.3. Leitura e Classificação das fases nos sismogramas

A acurácia do modelo de refração sísmica/reflexão de grande ângulo é consequência da interpretação e marcação correta das fases nos sismogramas, e da qualidade dos dados sísmicos, o que permite uma boa identificação das fases primárias e secundárias presentes.

Os sismogramas de onda P são de alta qualidade com o alinhamento de fases primárias e secundárias bem nítidos.

Nos sismogramas de onda S foram bem identificadas as fases Sg, Si e SmS. As fases Sn só foram identificadas nos tiros 1, 6 e 19, sendo que os tiros 1 e 19 foram realizados com carga de 4 toneladas. Mesmo com a dificuldade em relação as fases Sn, foi obtido modelo Vp/Vs robusto sob a linha sísmica.

As figuras 4.3 a 4.20 a seguir mostram os sismogramas com as marcações das principais fases utilizadas na modelagem.

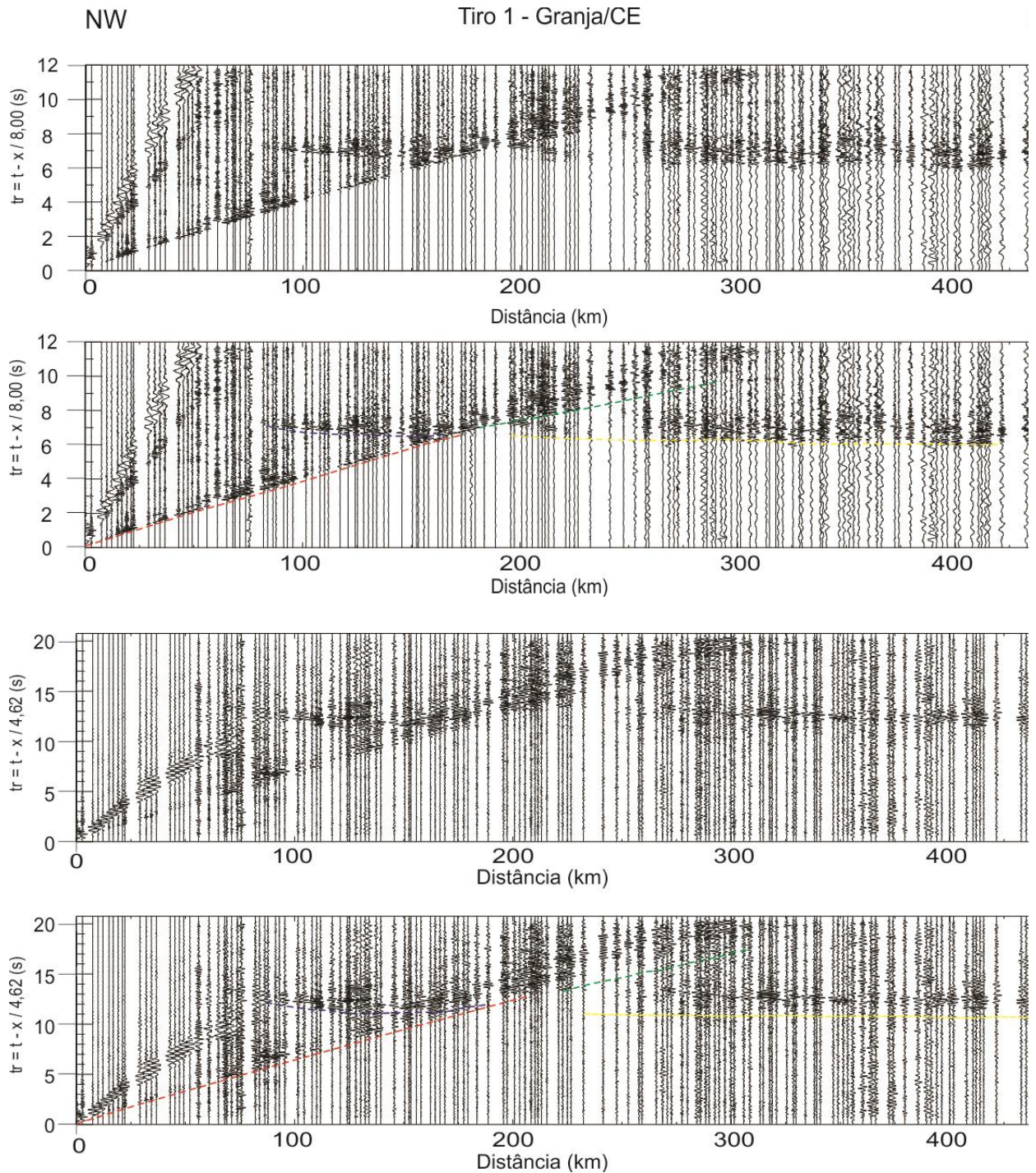


Figura 4.3 – Sismogramas do tiro 1 – Granja/CE. De cima para baixo: os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s, e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Sn e Pn (traço amarelo).

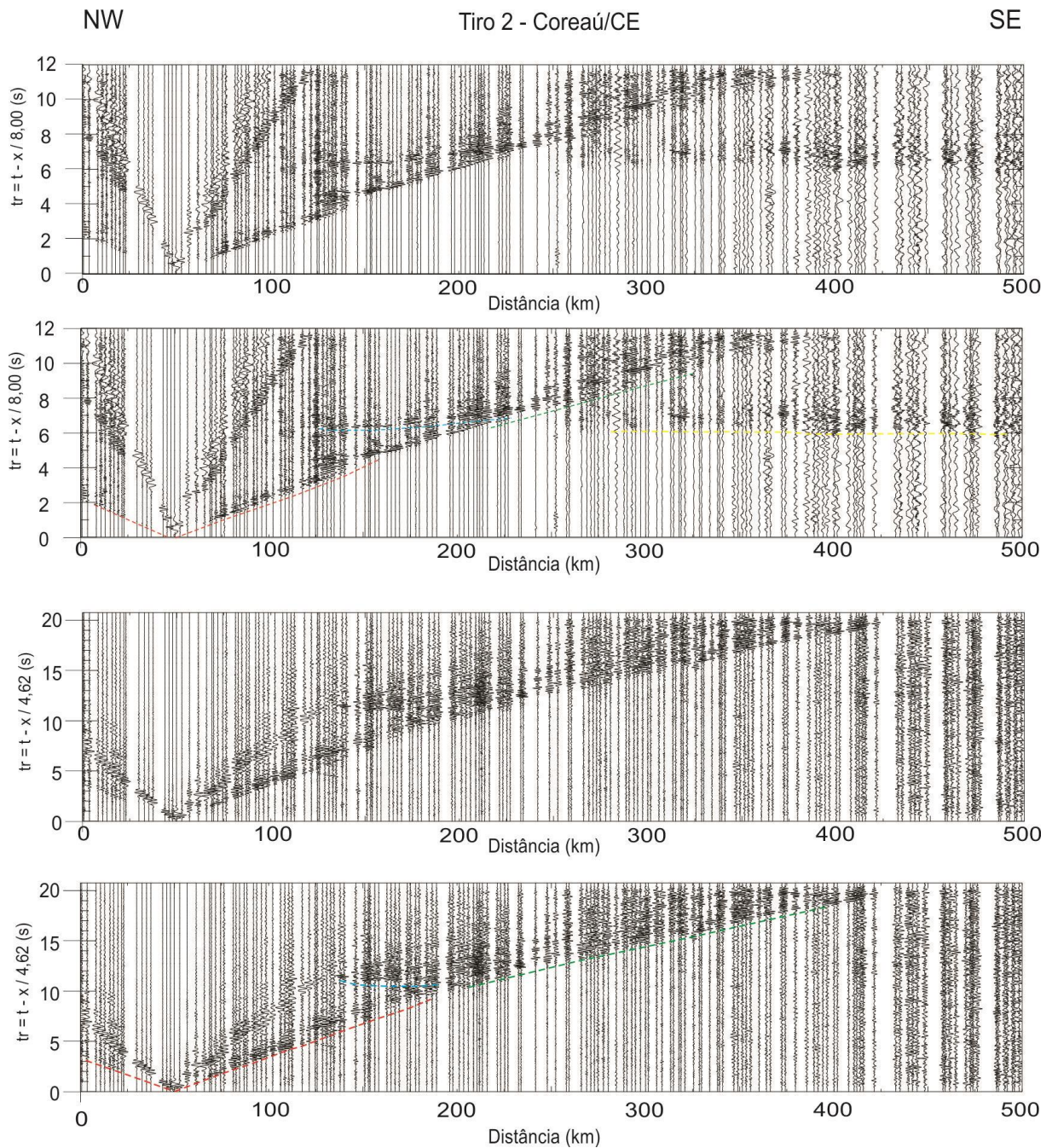


Figura 4.4—Sismogramas do tiro 2 – Coreaú/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

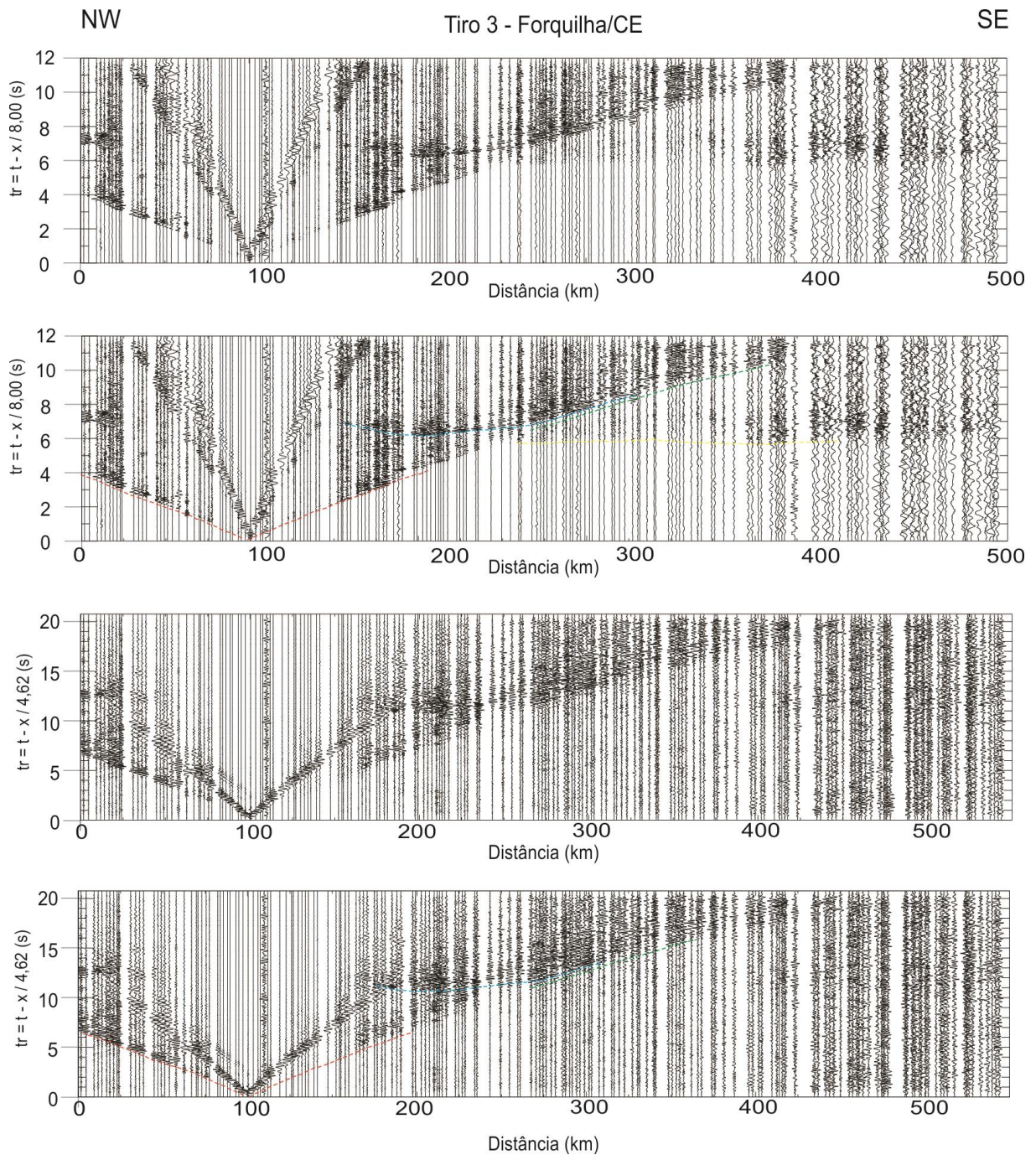


Figura 4.5 - Sismogramas do tiro 3 – Forquilha/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

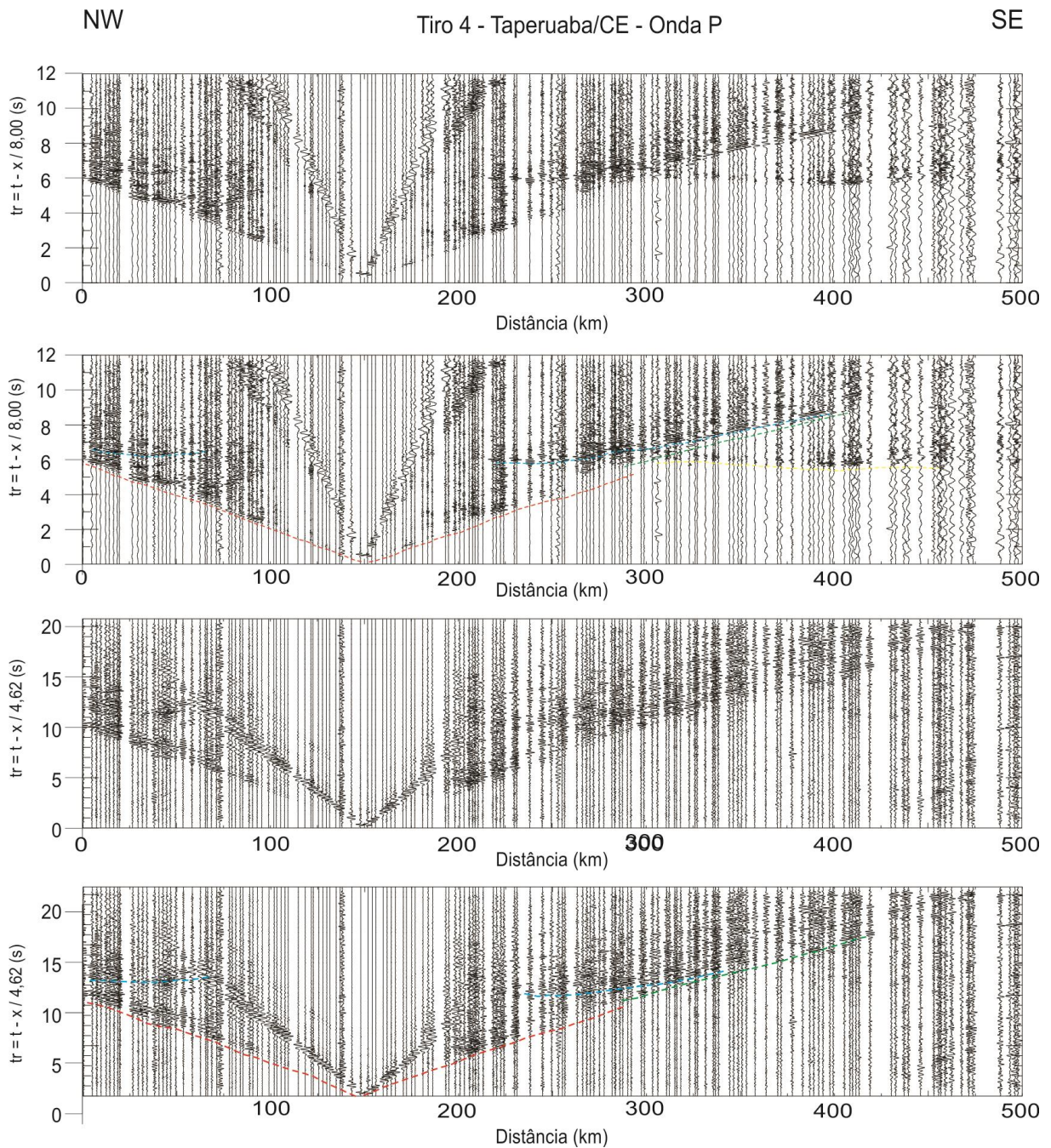


Figura 4.6 - Sismogramas do tiro 4 – Taparuaba/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

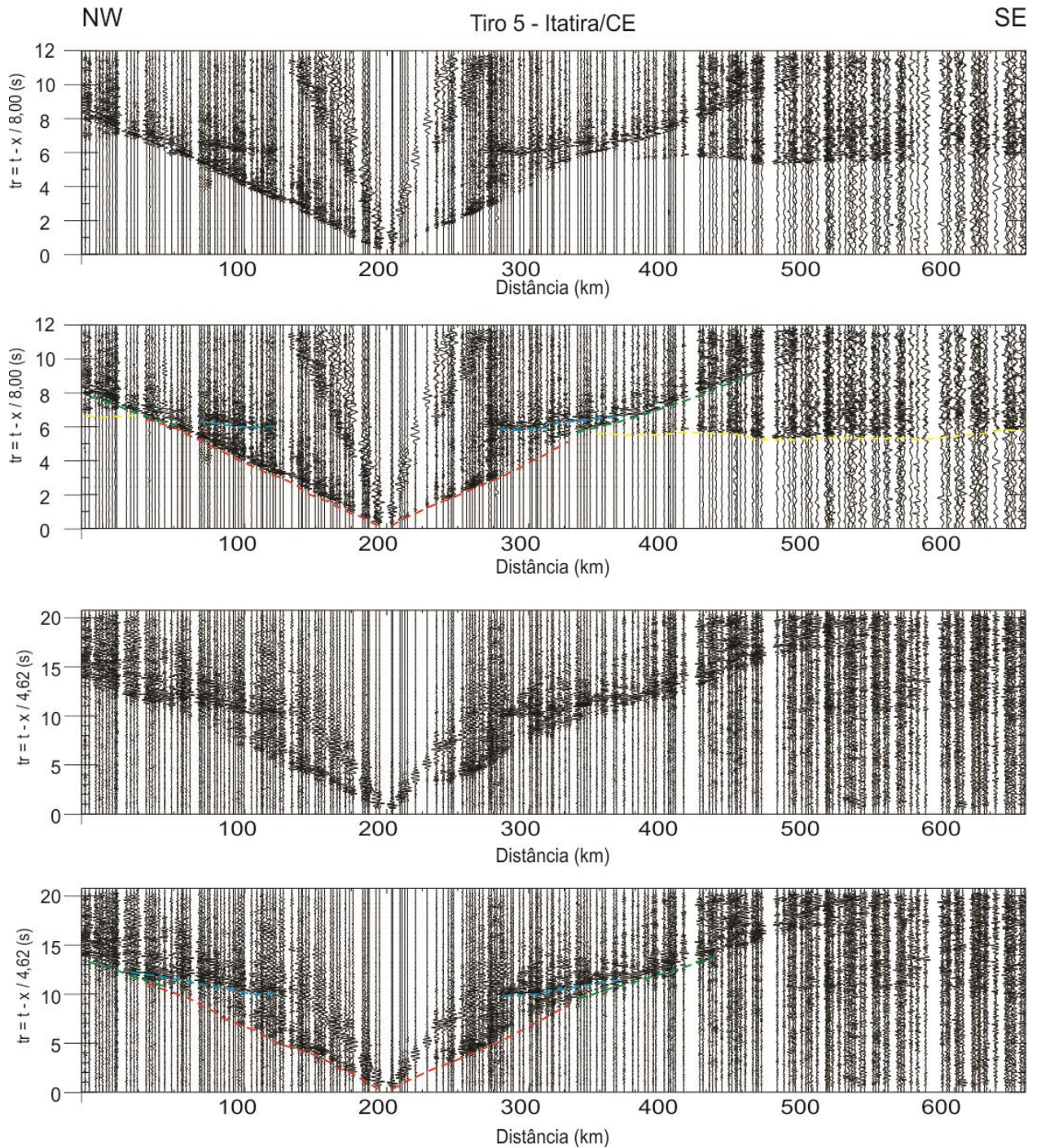


Figura 4.7 - Sismogramas do tiro 5 – Itatira/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

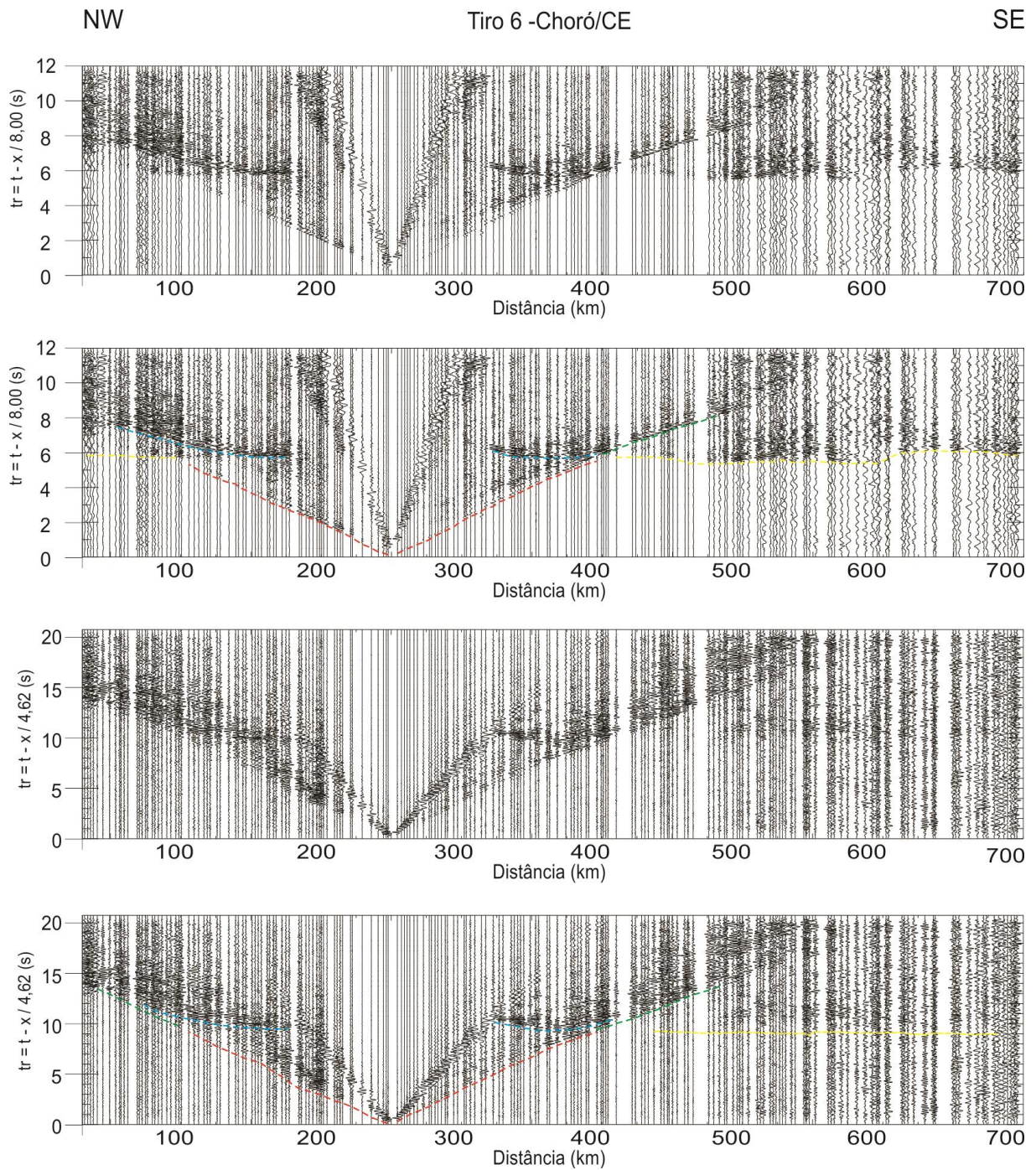


Figura 4.8 - Sismogramas do tiro 6 – Choró/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Sn e Pn (traço amarelo).

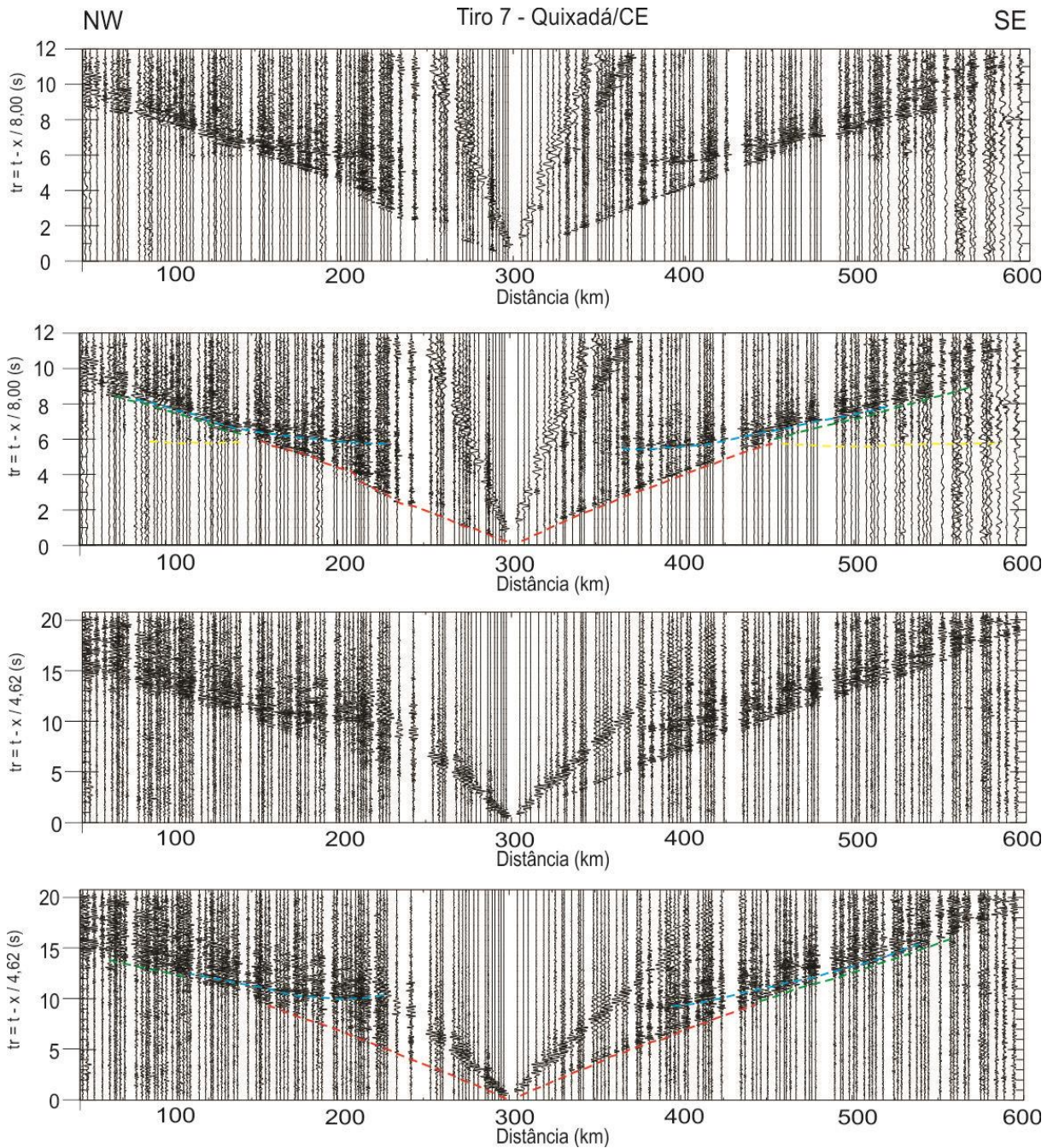


Figura 4.9 - Sismogramas do tiro 7 – Quixadá/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

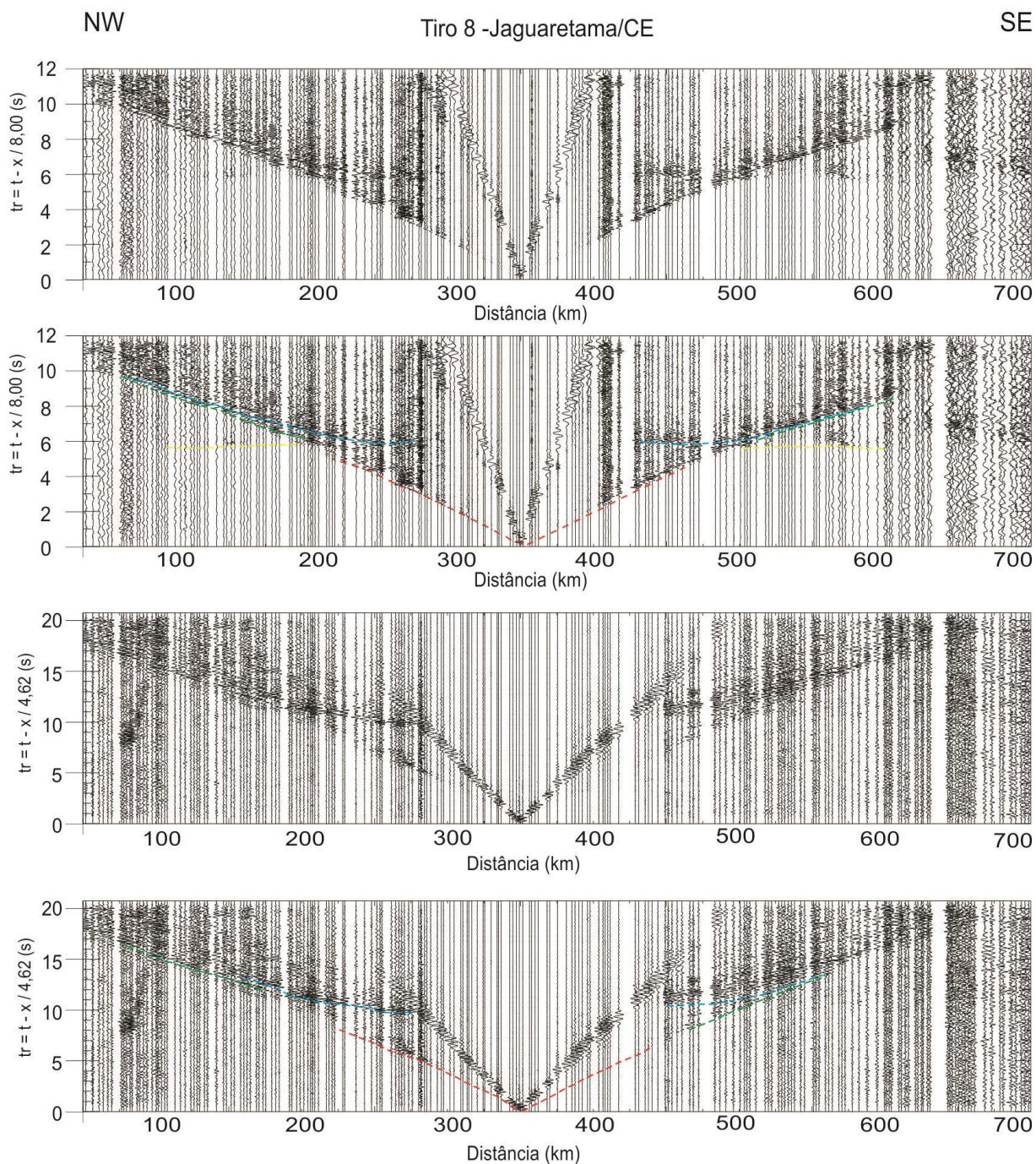


Figura 4.10 - Sismogramas do tiro 8 – Jaguaretama/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

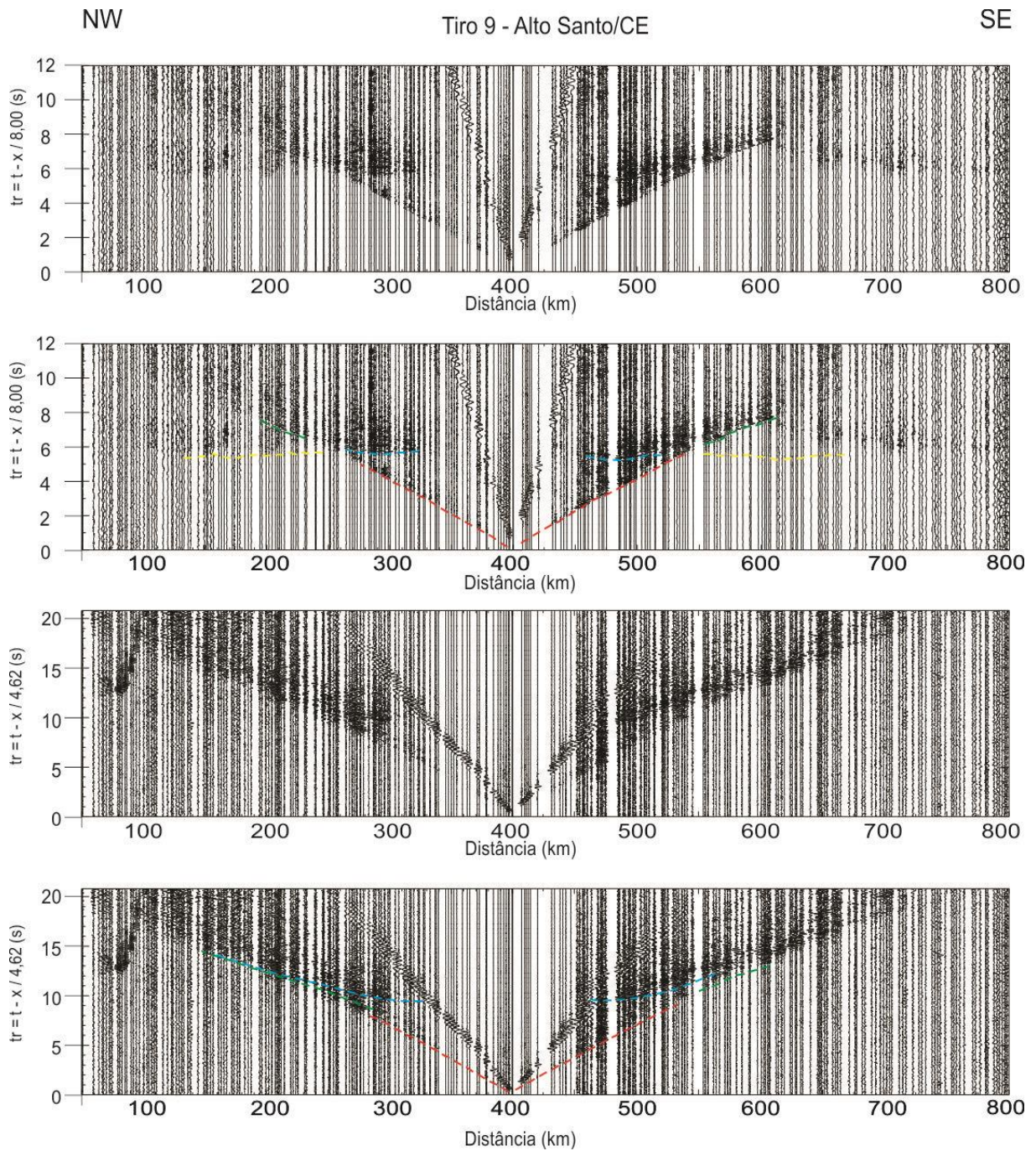


Figura 4.11 - Sismogramas do tiro 9 – Alto Santo/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo).

NW

Tiro 10 - Tabuleiro Grande/RN

SE

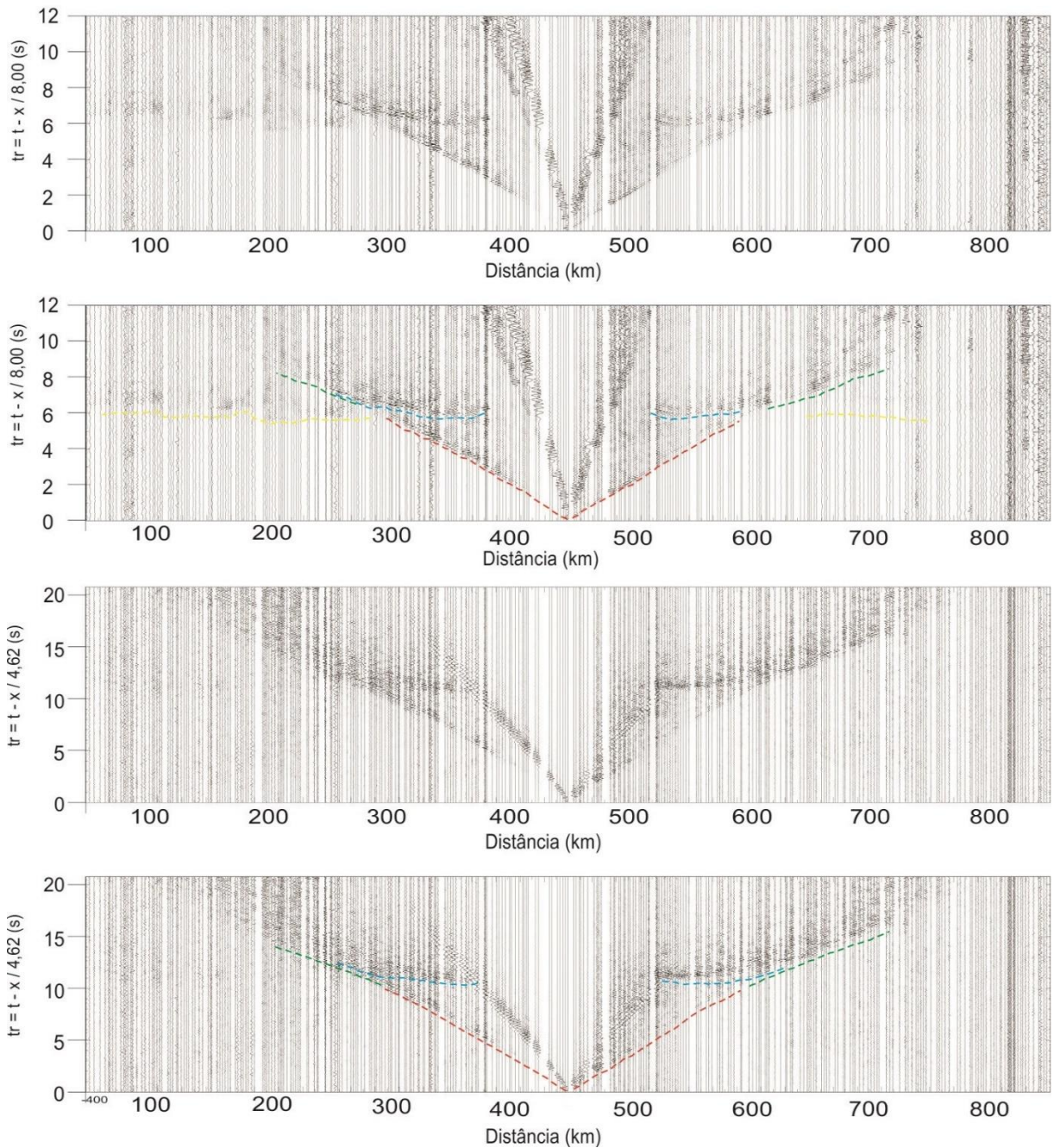


Figura 4.12 - Sismogramas do tiro 10 – Tabuleiro Grande/CE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P da distância de 450 a 850 km foi modificado de Lima *et al.* (2014).

NW

Tiro 11 - Catolé do Rocha/PB

SE

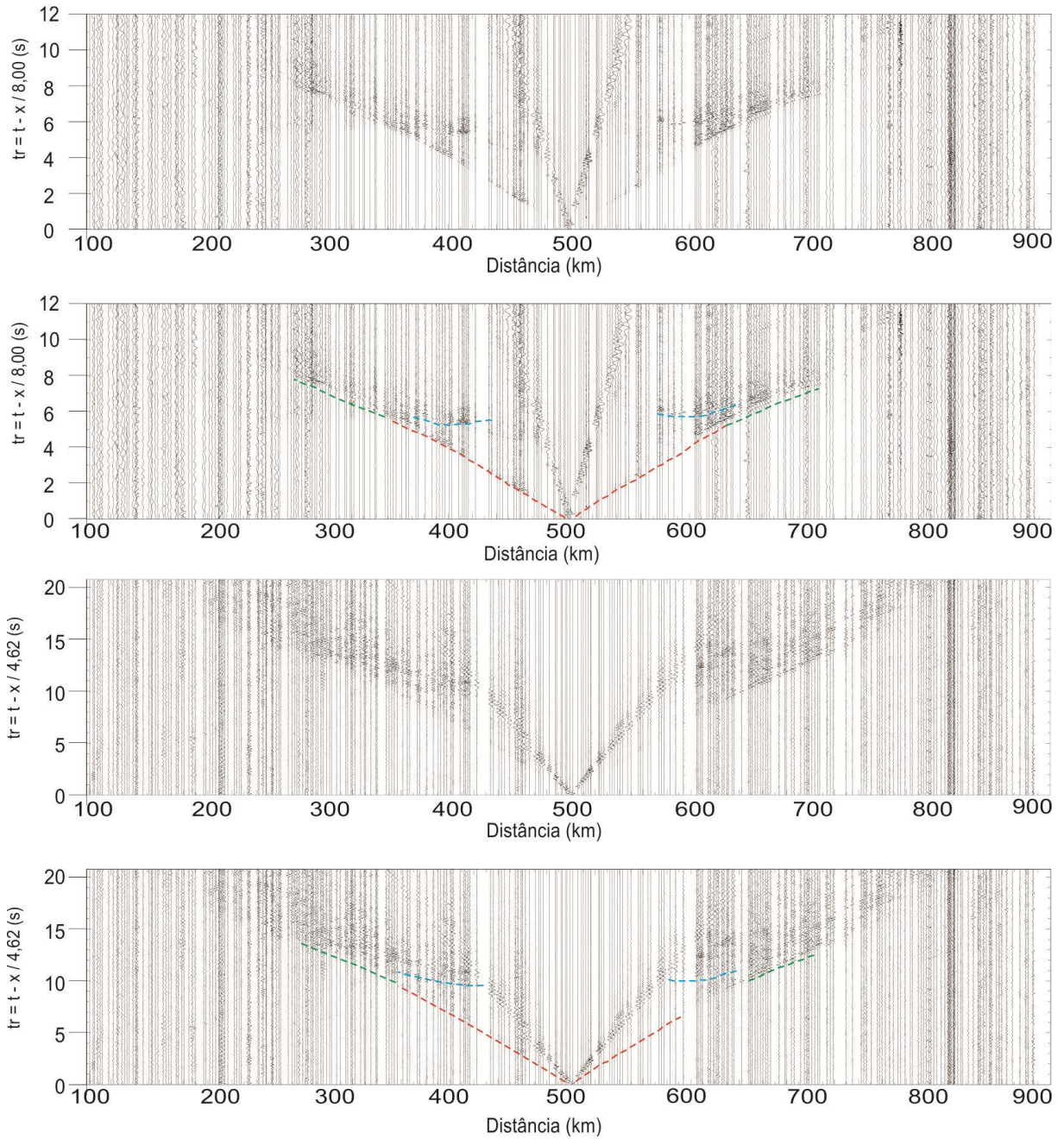


Figura 4.13 - Sismogramas do tiro 11 – Catolé do Rocha/PB. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

NW

Tiro 12 - Serra Grande do Norte/RN

SE

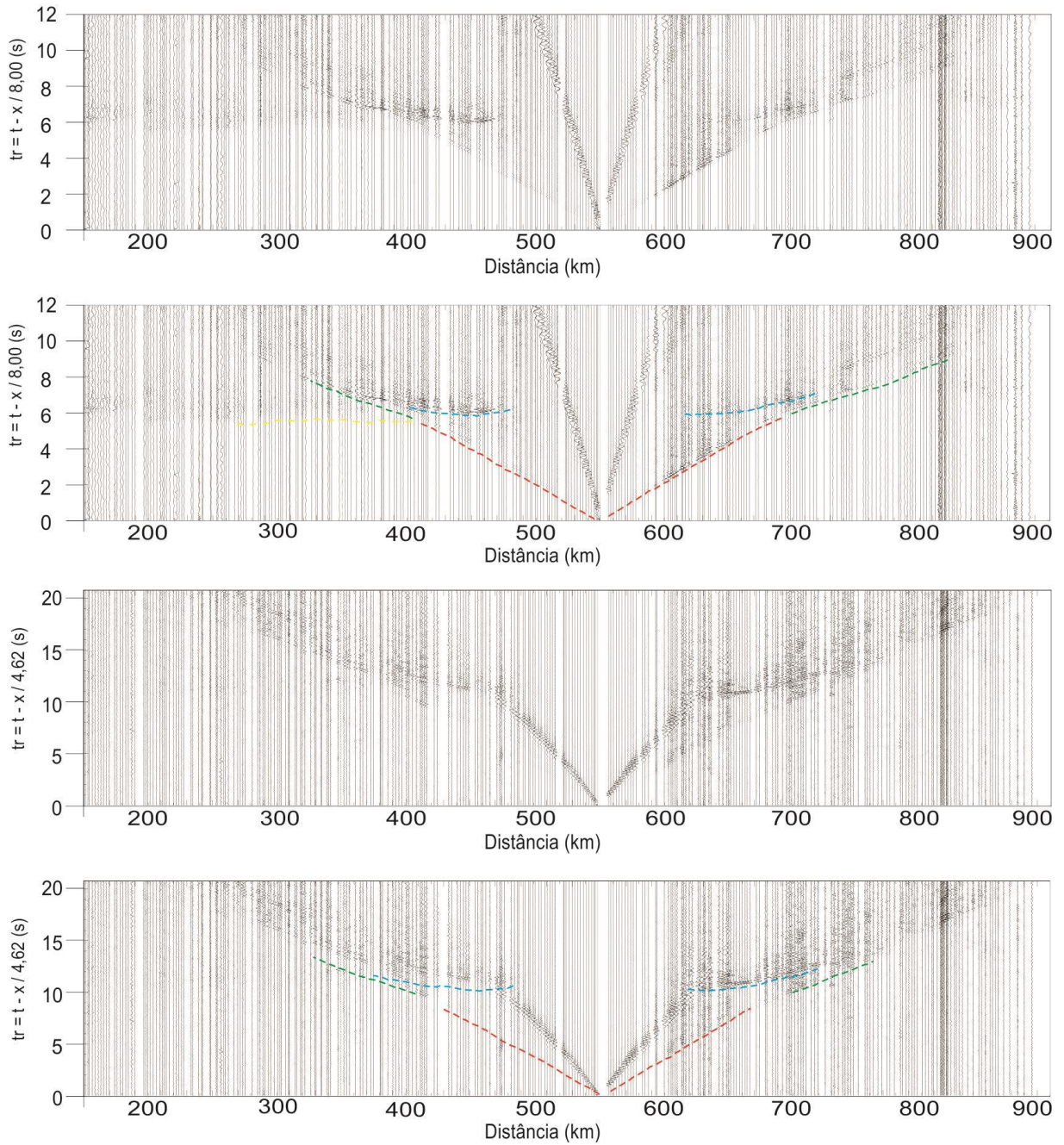


Figura 4.14 - Sismogramas do tiro 12 – Serra Grande do Norte/RN. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

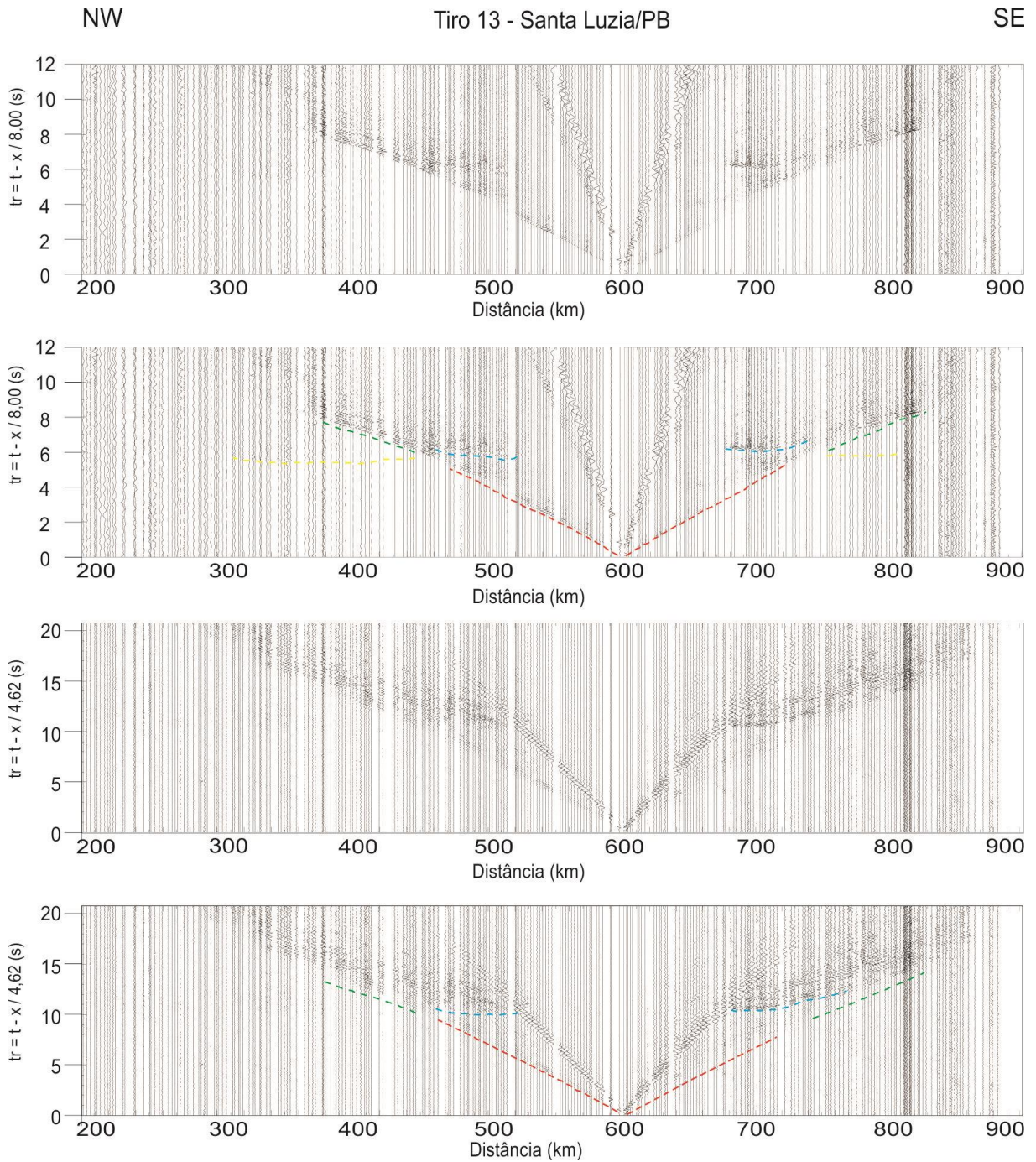


Figura 4.15 - Sismogramas do tiro 13 – Santa Luzia/PB. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

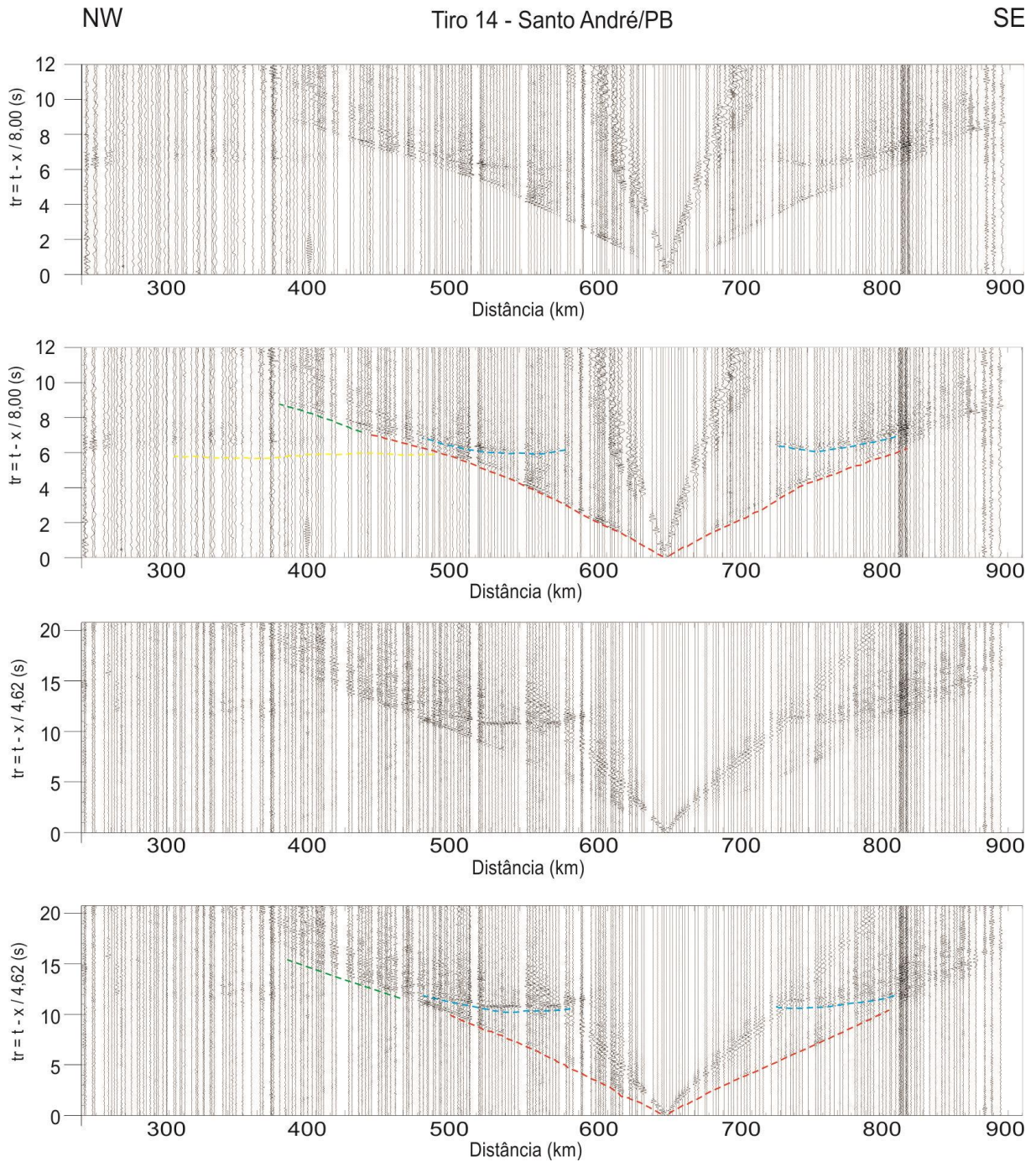


Figura 4.16 - Sismogramas do tiro 14 – Santo André/PB. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

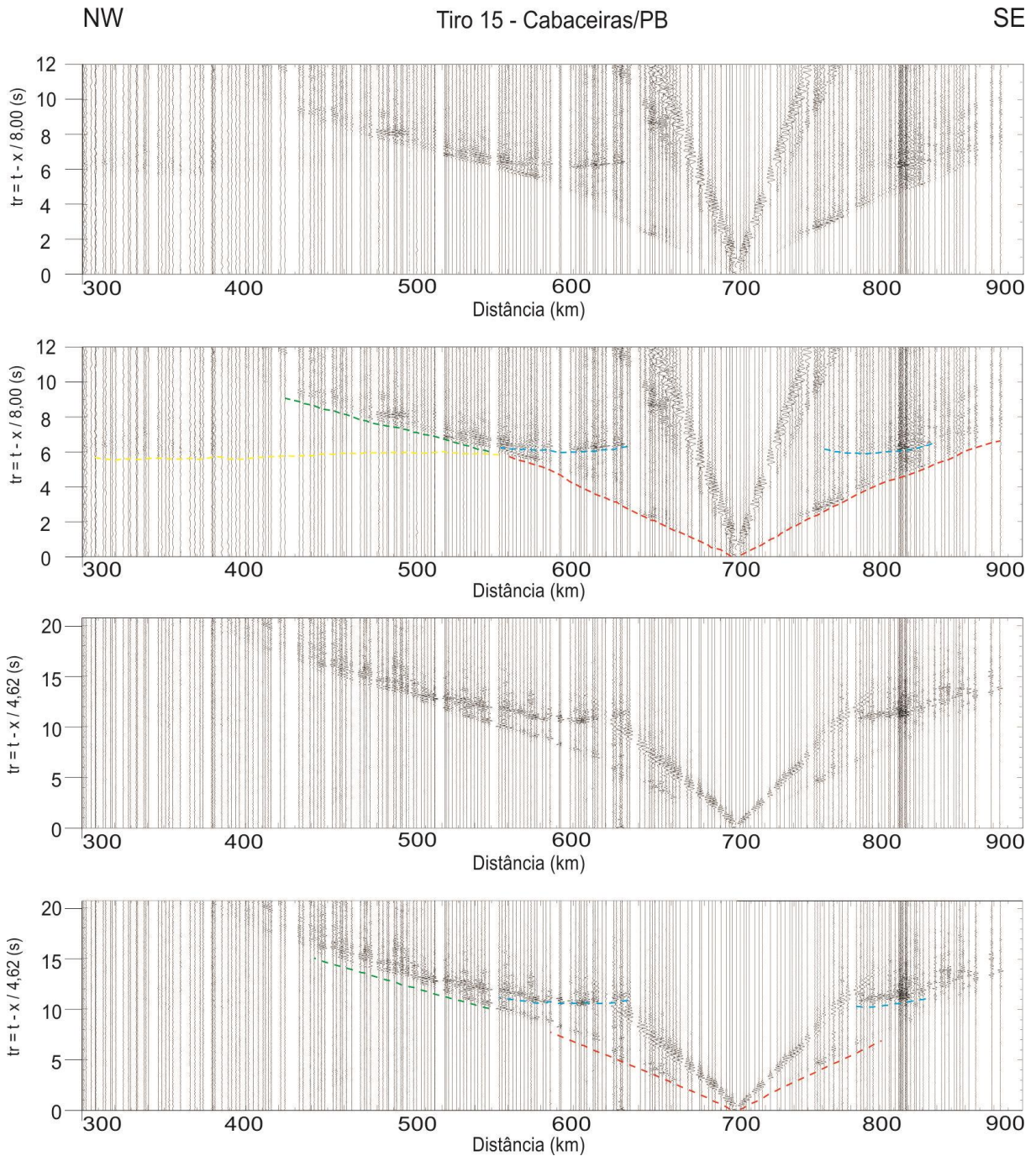


Figura 4.17 - Sismogramas do tiro 15 – Cabaceiras/PB. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

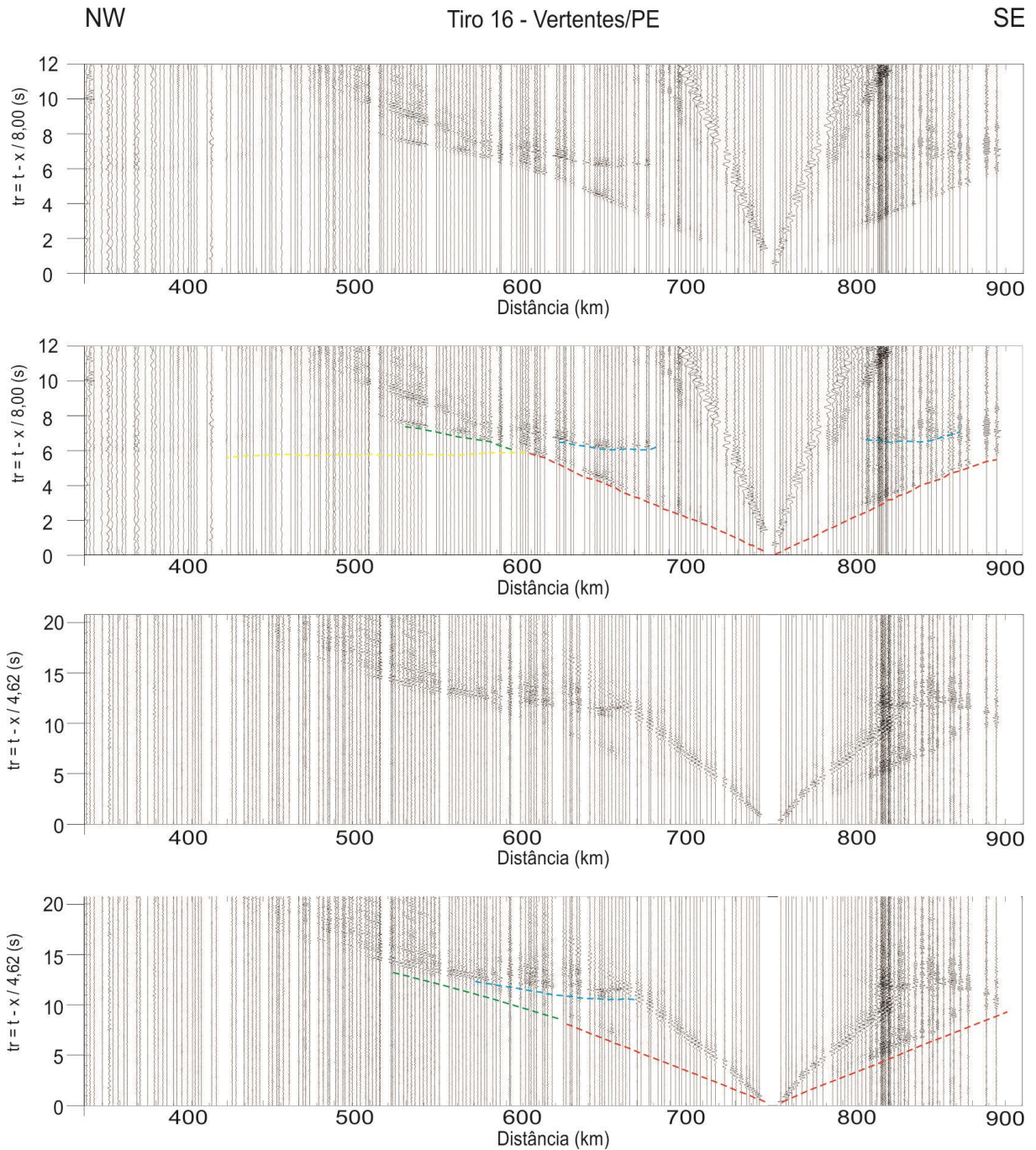


Figura 4.18 - Sismogramas do tiro 16 – Vertentes/PE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

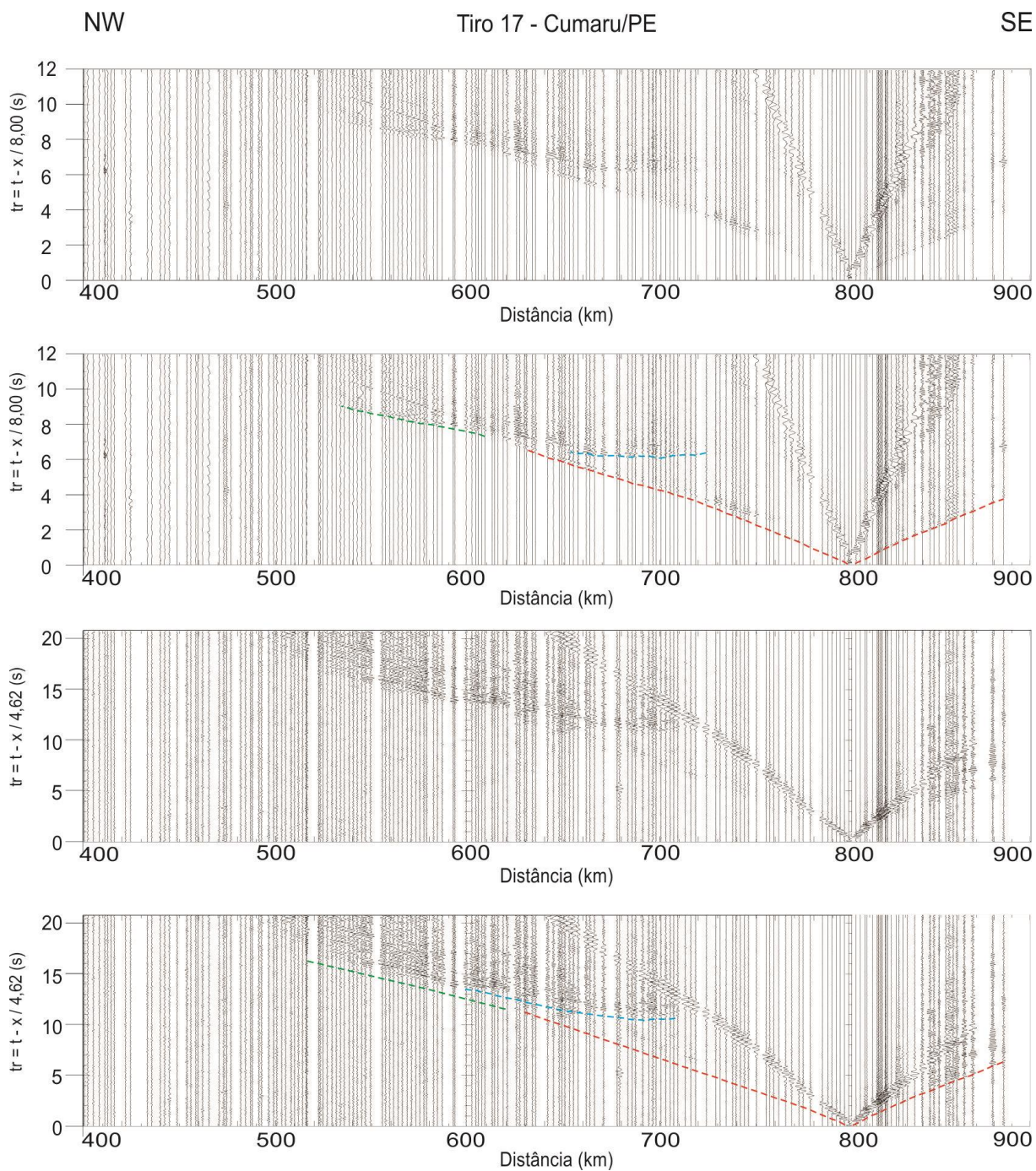


Figura 4.19 - Sismogramas do tiro 17 – Cumaru/PE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

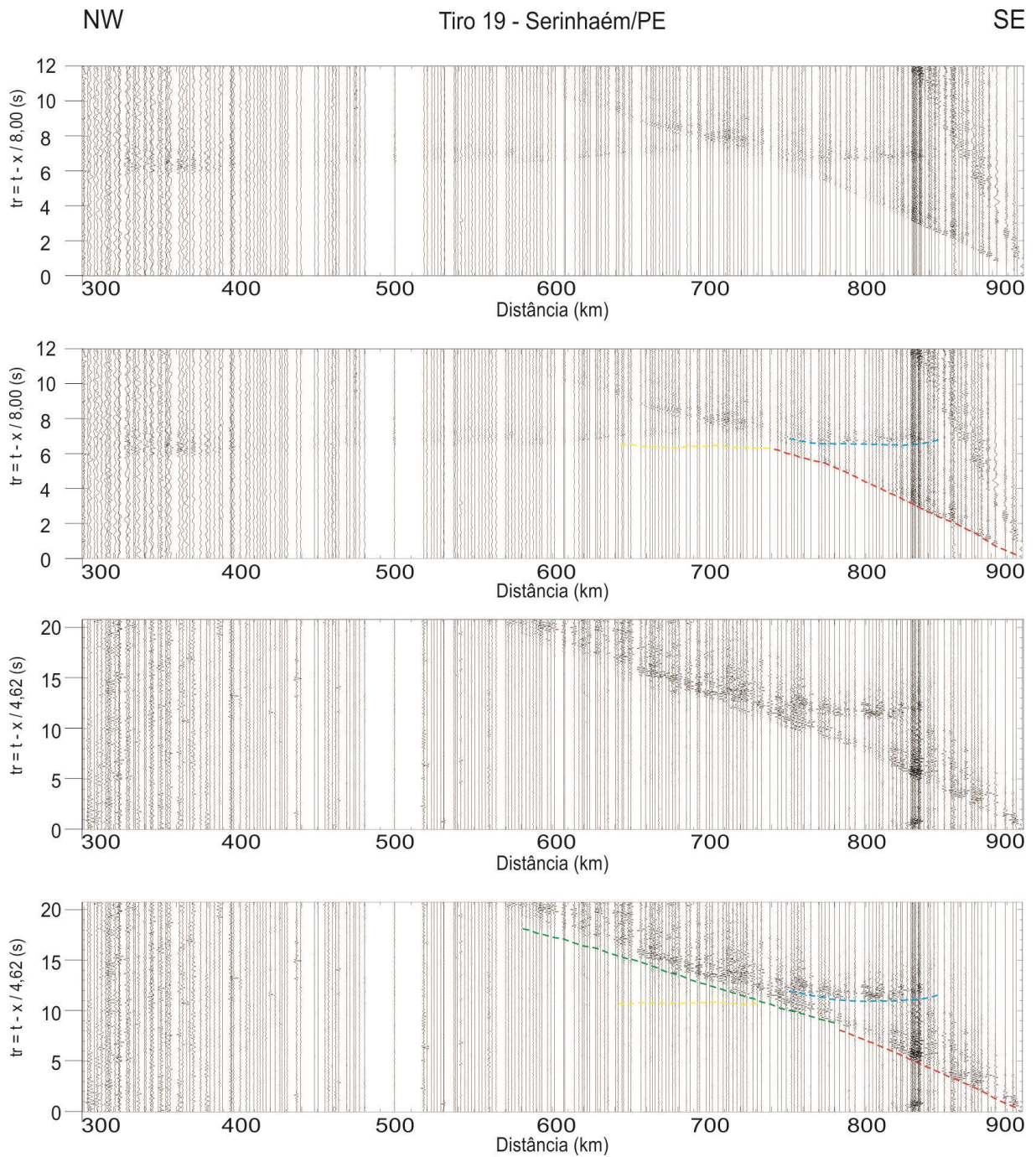


Figura 4.20 - - Sismogramas do tiro 19 – Serinhaém/PE. De cima para baixo: Os dois primeiros sismogramas são de ondas P, com velocidade de redução de 8,0 km/s e os dois sismogramas de baixo são de ondas S, com velocidade de redução de 4,62 km/s. As fases marcadas são Sg e Pg (traço vermelho), Si e Pi (traço verde), SmS e PmP (traço azul) e Sn e Pn (traço amarelo). O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

Como pode ser observado nos sismogramas acima as fases Sn nem sempre são nítidas, muito provavelmente devido ao baixo conteúdo de energia associado a essas fases. Nos sismogramas 1 e 19, com tiros de quatro toneladas, as fases Sn foram identificadas e marcadas.

5. Modelagem

O processo de modelagem de dados de refração sísmica profunda e reflexão de alto ângulo de onda P e S é feito por tentativa e erro com utilização de método de traçado de raios. A resposta teórica é repetidamente comparada com os dados observados até que o modelo de velocidade se ajuste entre a resposta calculada e a resposta observada. Para experimentos sísmicos com vários tiros em uma única linha, como é o caso do presente trabalho, o modelo é alcançado quando todos os dados se ajustam, simultaneamente, a todos os tiros (Lima, 2011).

O programa utilizado para a modelagem foi RAYINVR (Zelt e Smith, 1992), que tem a finalidade de obter as estruturas e velocidade para o perfil estudado. O *software* VMED foi utilizado para editar interativamente o modelo (código-fonte, documentação e exemplos disponíveis em: <http://imina.soest.hawaii.edu/~bzelt/vmed/vmed.html>) (Lima, 2011).

5.1. Modelagem 2D

Como a modelagem é feita por tentativa e erro, antes de iniciar a utilização dos programas de traçado de raio é criado um modelo inicial com o auxílio do método do tempo de intercessão e x^2-t^2 (fórmulas 1, 2 e 3 – capítulo 3), que permitem obter uma aproximação de valores de velocidade e espessura das camadas da crosta. Com as fases Pg/Sg e Pi/Si é gerada uma estimativa da estruturação das camadas internas da crosta e com as fases Pn/Sn a velocidade do manto superior

O modelo inicial é inserido no programa e a modelagem é realizada por tentativa e erro ajustando as fases das camadas mais superficiais em primeiro momento e depois as fases das camadas mais profundas, utilizando tiros individuais ou pares de tiros (tiros direto e reverso, por exemplo). Durante a modelagem, sempre que possível, as feições adicionais (informações a priori) oriundas de estudos geológicos e/ou geofísicos são consideradas e acomodadas no modelo sísmico. As descontinuidades e geometria das camadas do modelo são obtidas através

da modelagem das ondas P, na modelagem das ondas S mantêm-se a geometria e modela-se somente o campo de velocidades.

A seguir são apresentados os sismogramas das ondas P e ondas S, e para cada um deles é apresentado o modelo com o traçado de raios e os tempos teóricos superpostos as fases lidas e ao sismograma. (Figuras 5.1 a 5.18). Os tiros 11 a 19 de onda P foram retirados do trabalho de Lima (2011).

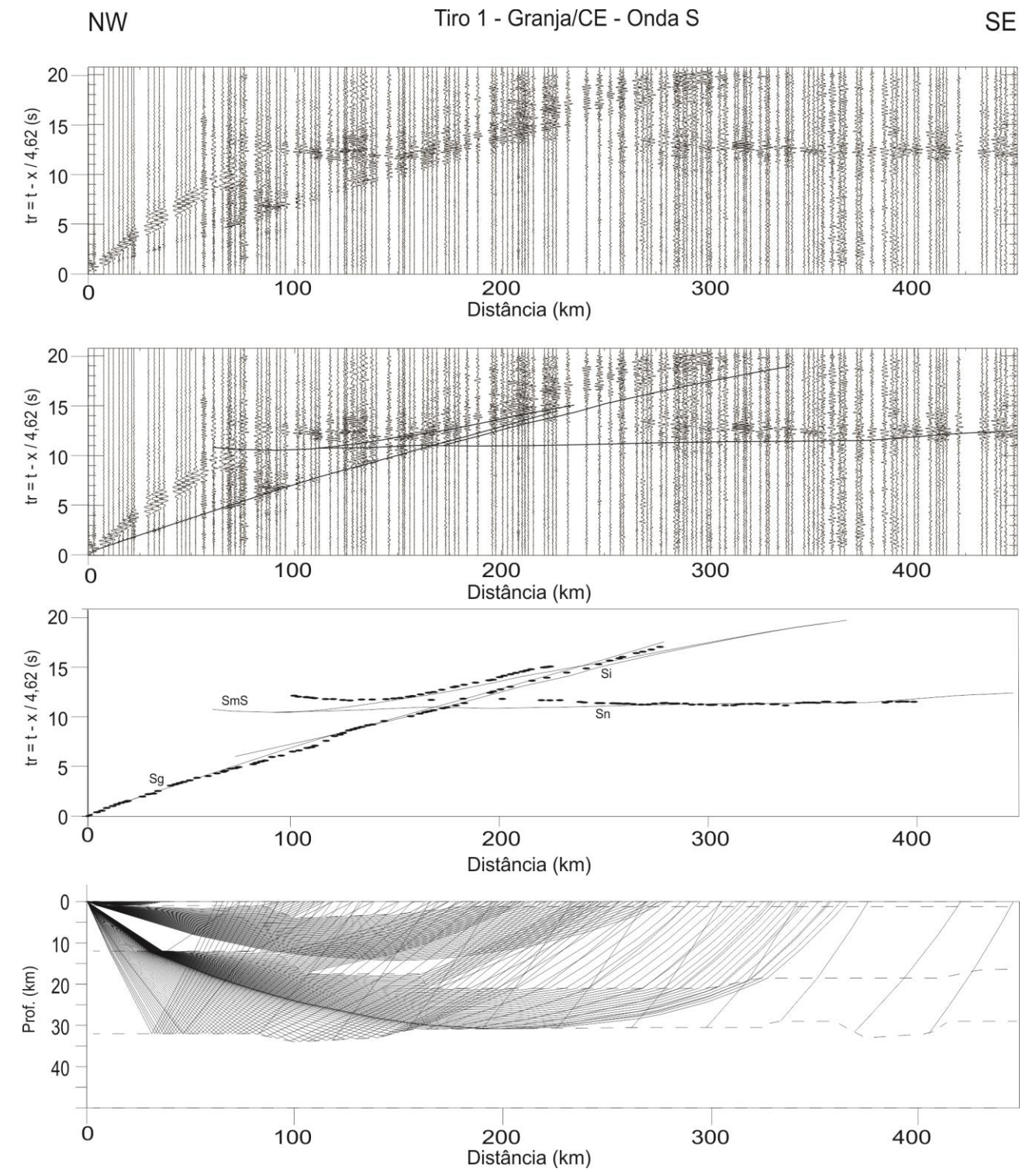
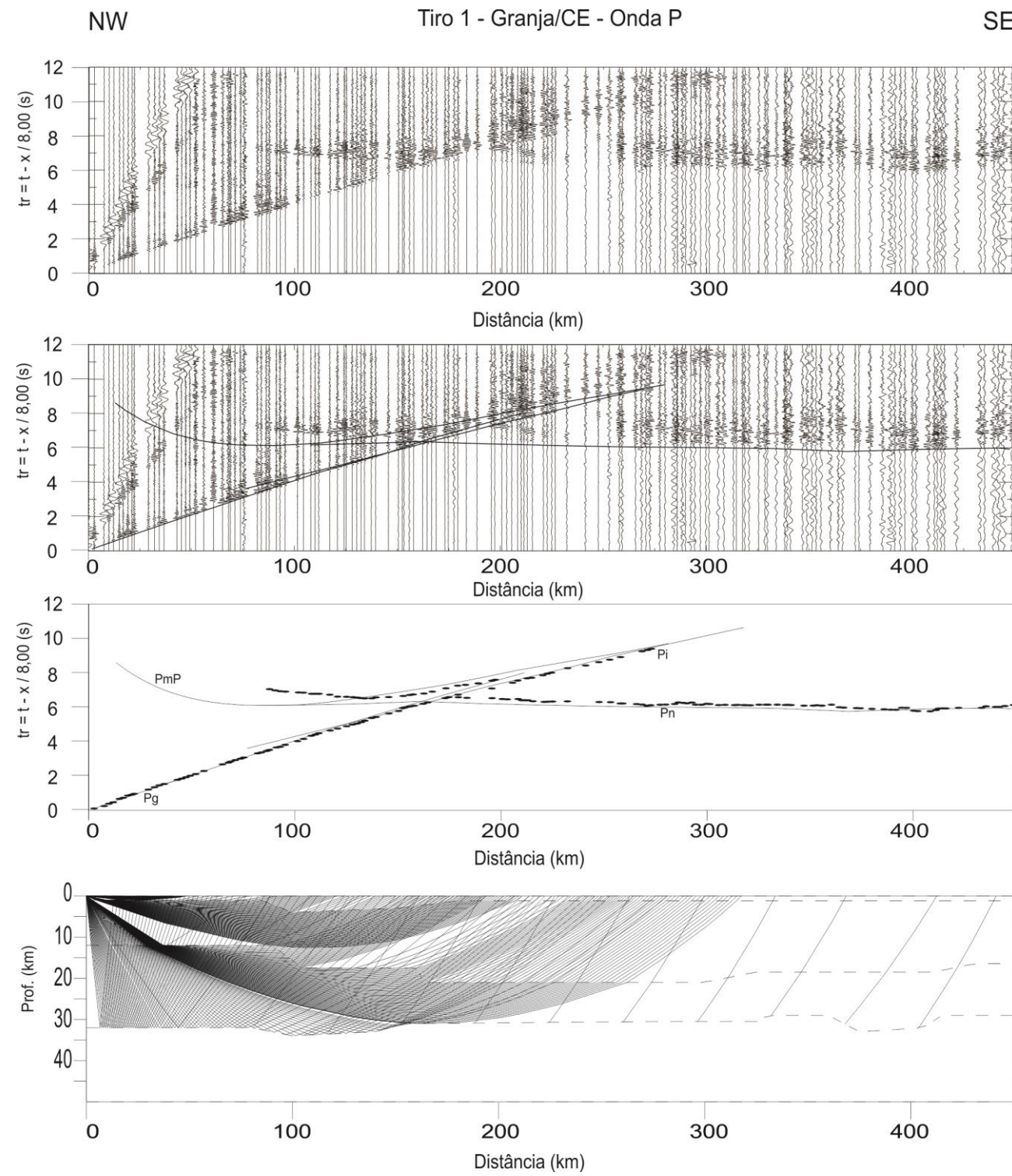


Figura 5.1 - Tiro 1 - Granja/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

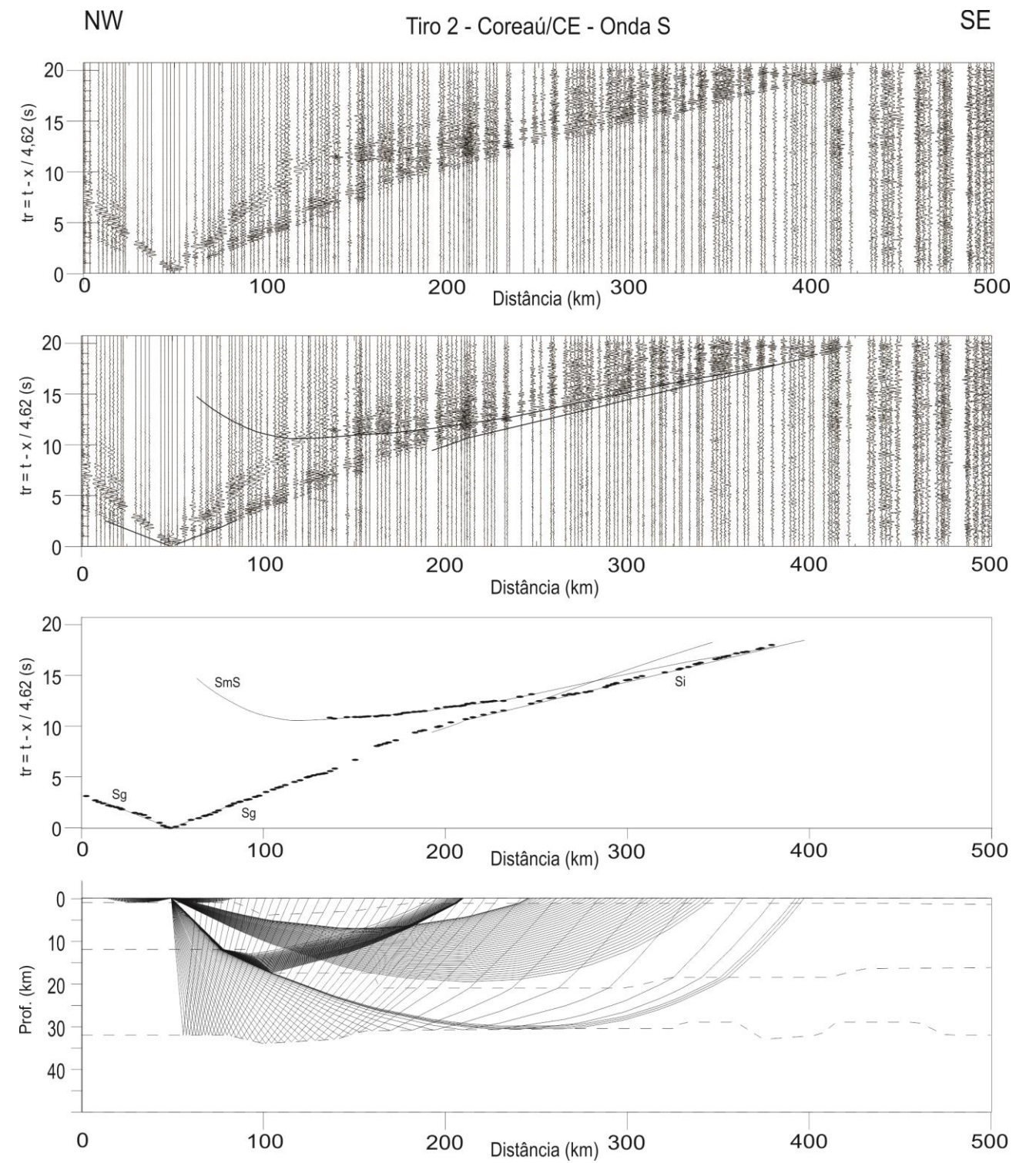
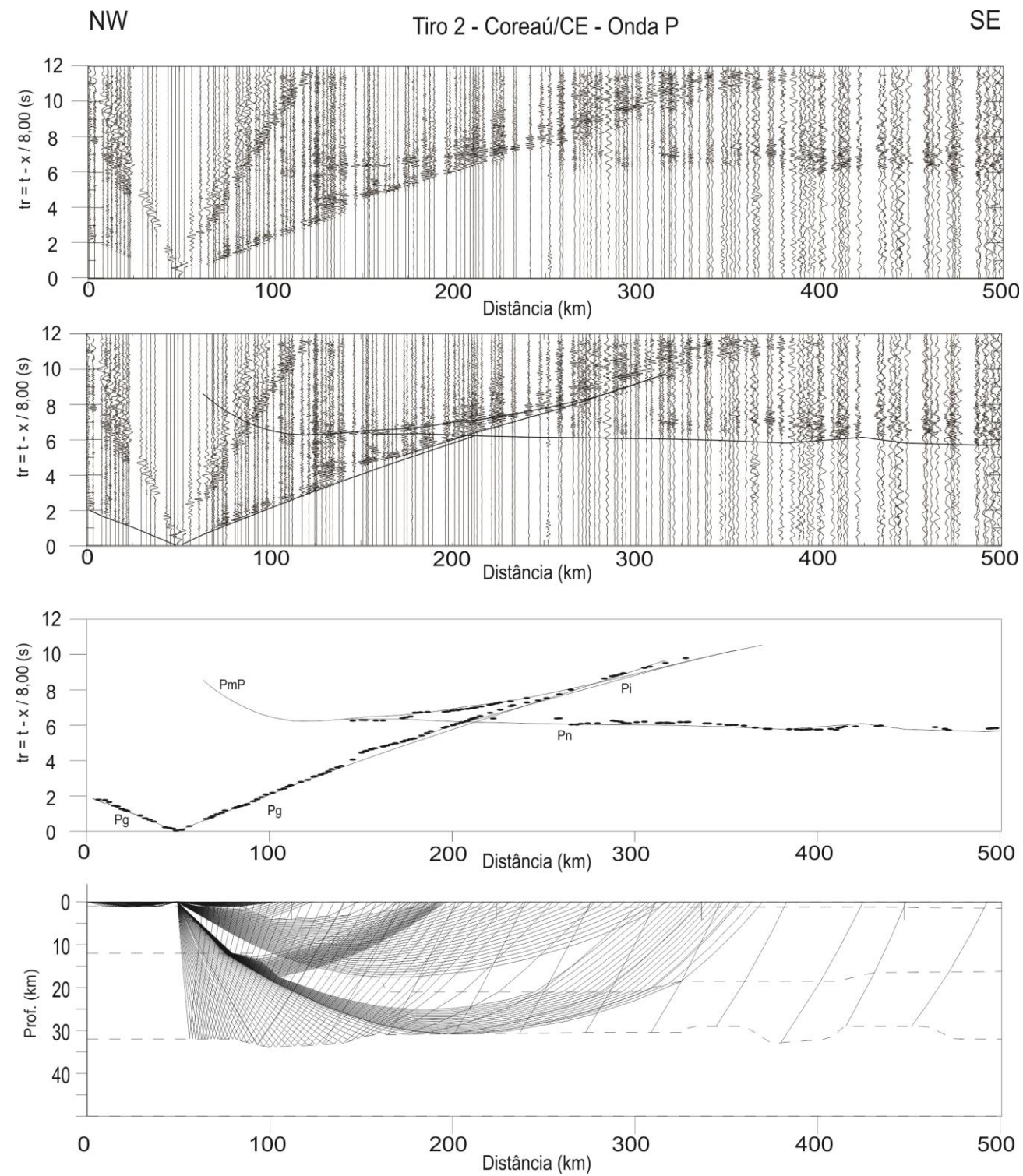


Figura 5.2- Tiro 2 - Coreaú/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

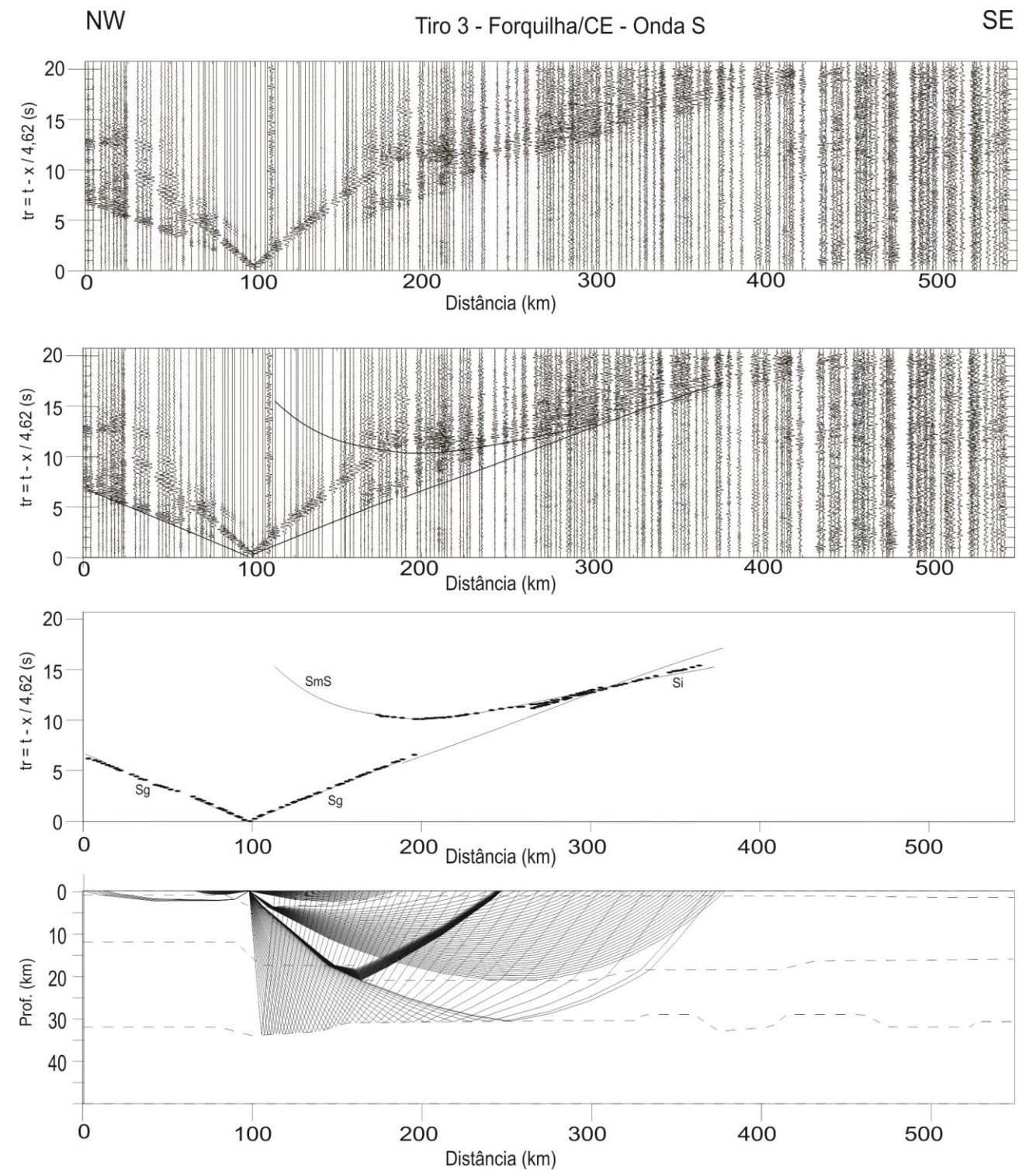
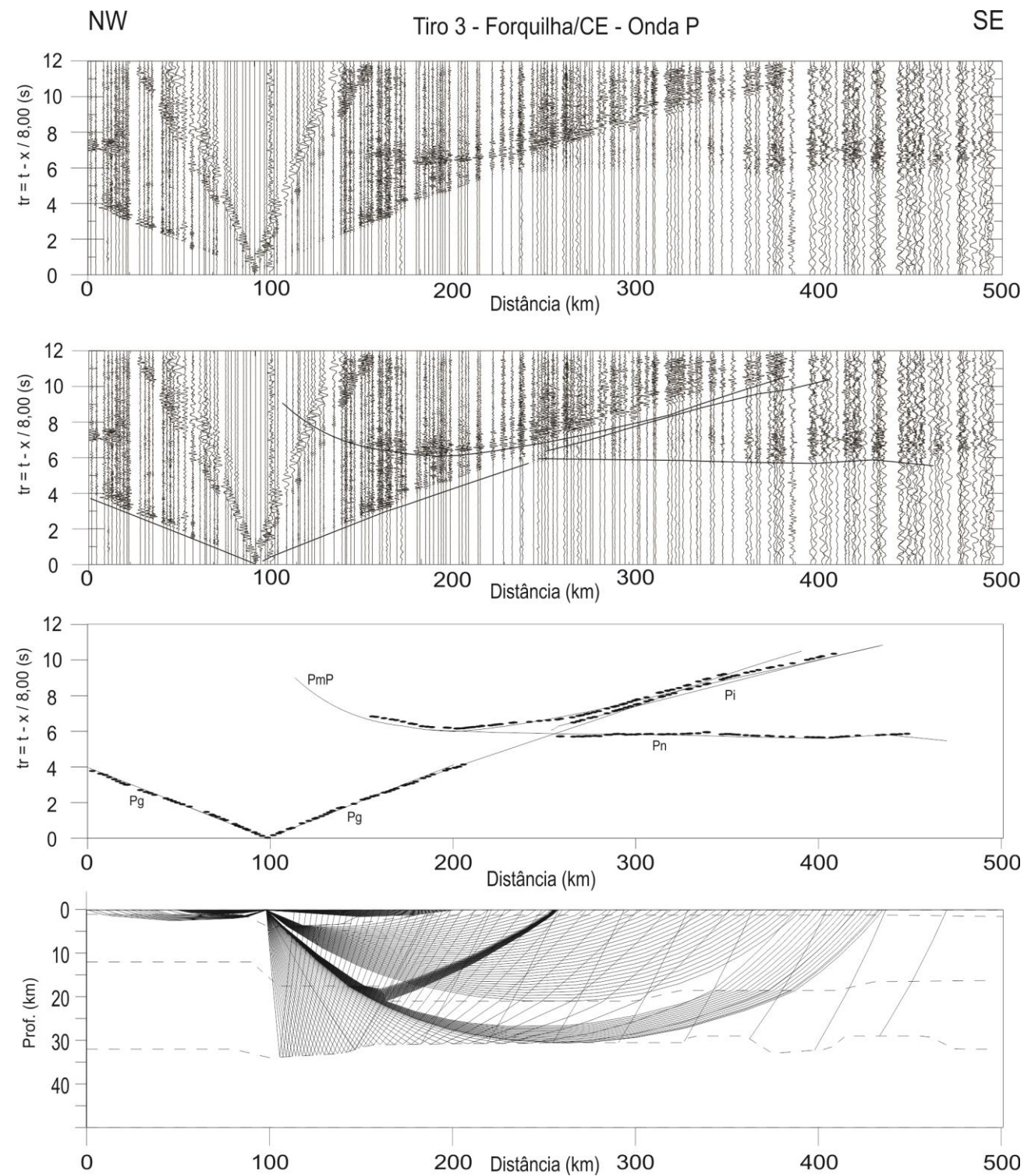


Figura 5.3 - Tiro 3 - Forquilha/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

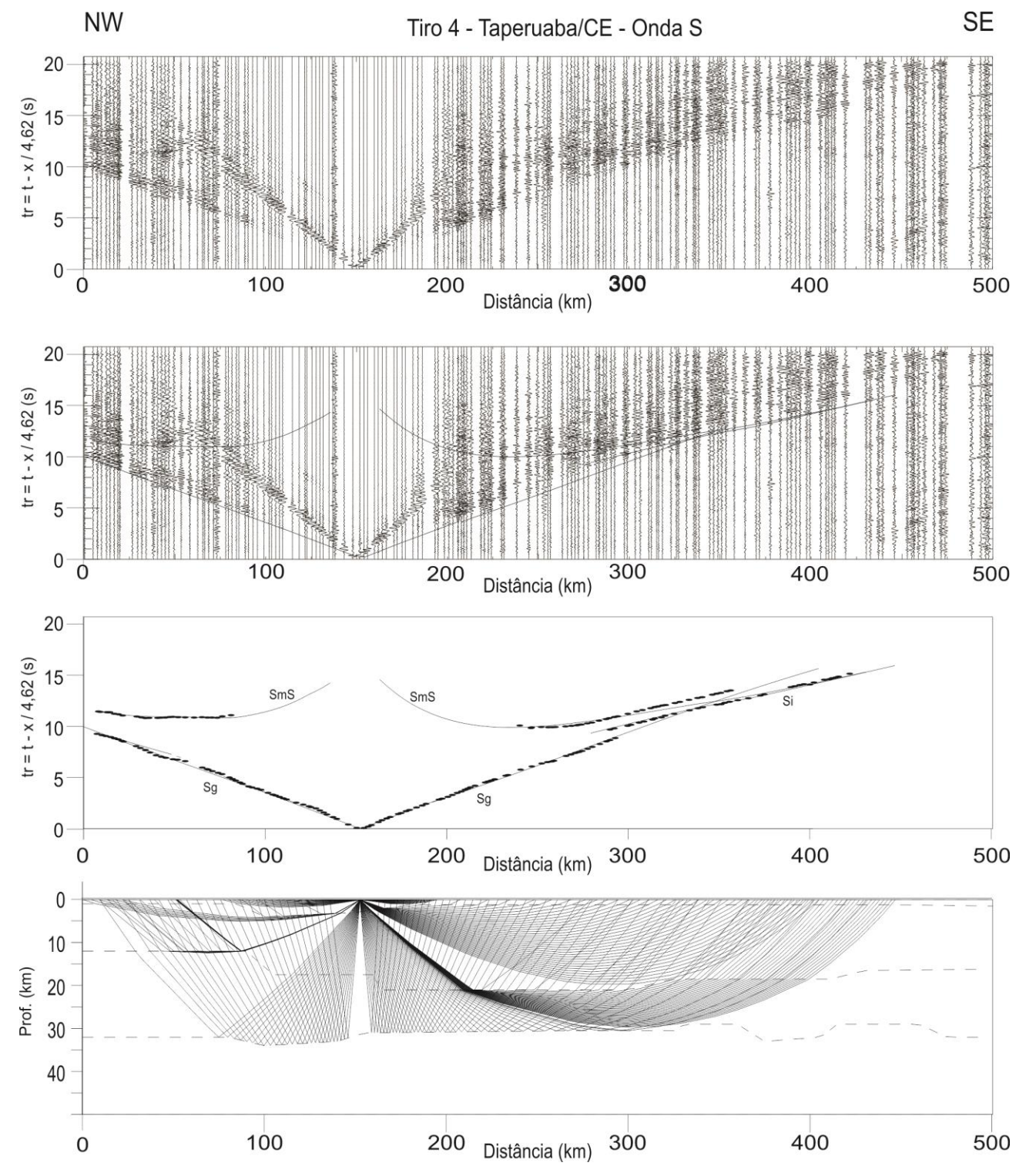
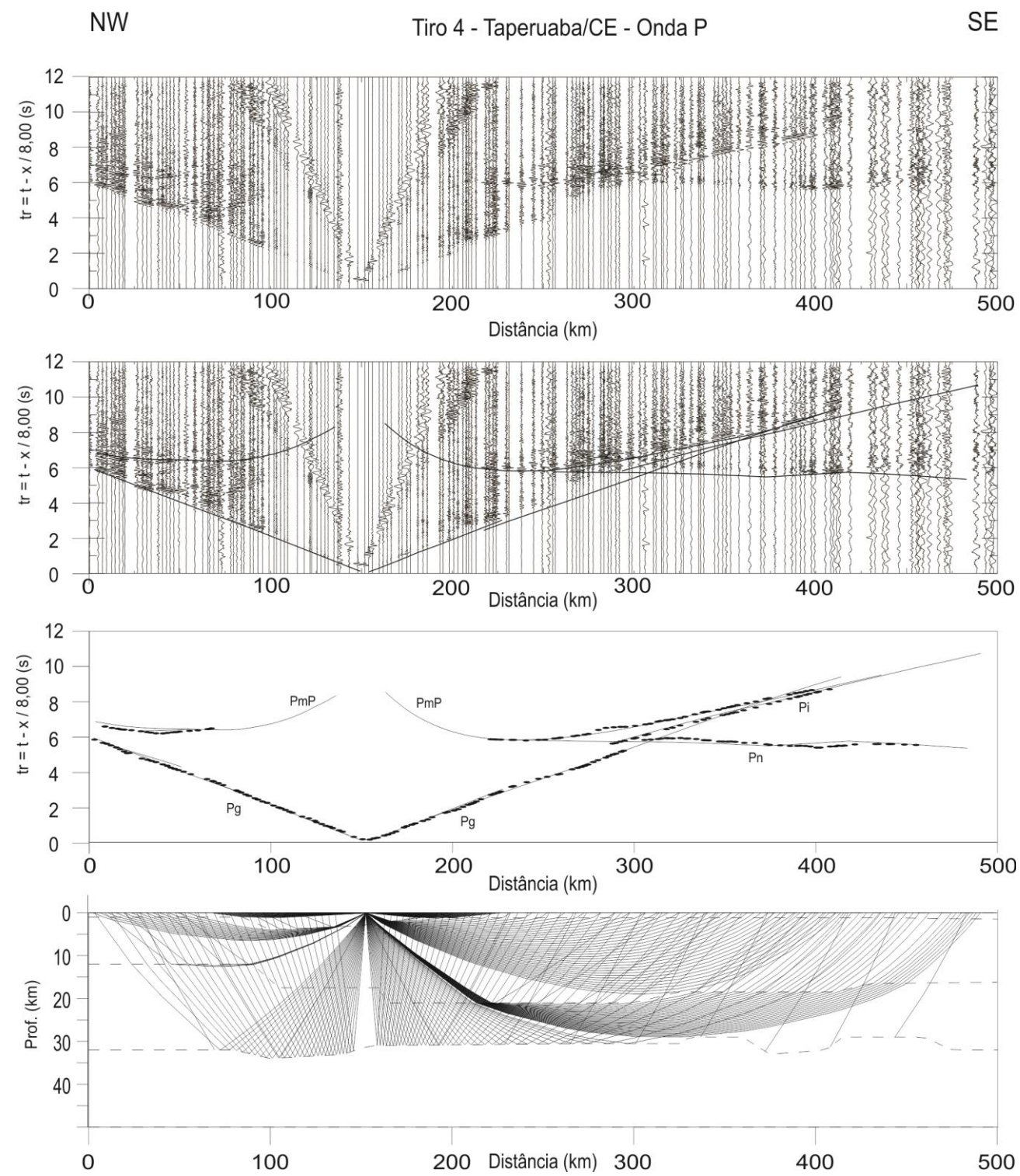


Figura 5.4 - Tiro 4 - Taperuaba/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

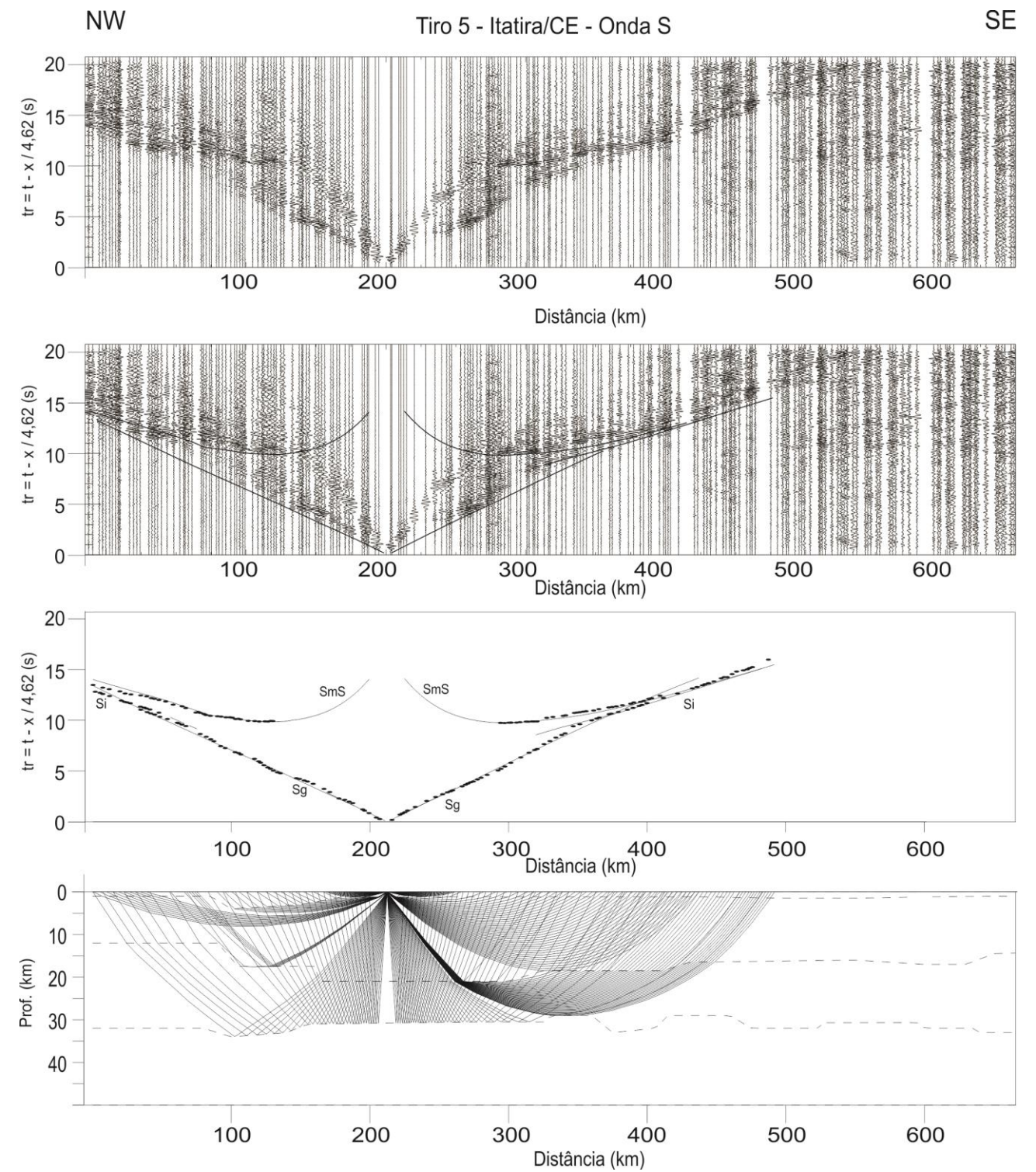
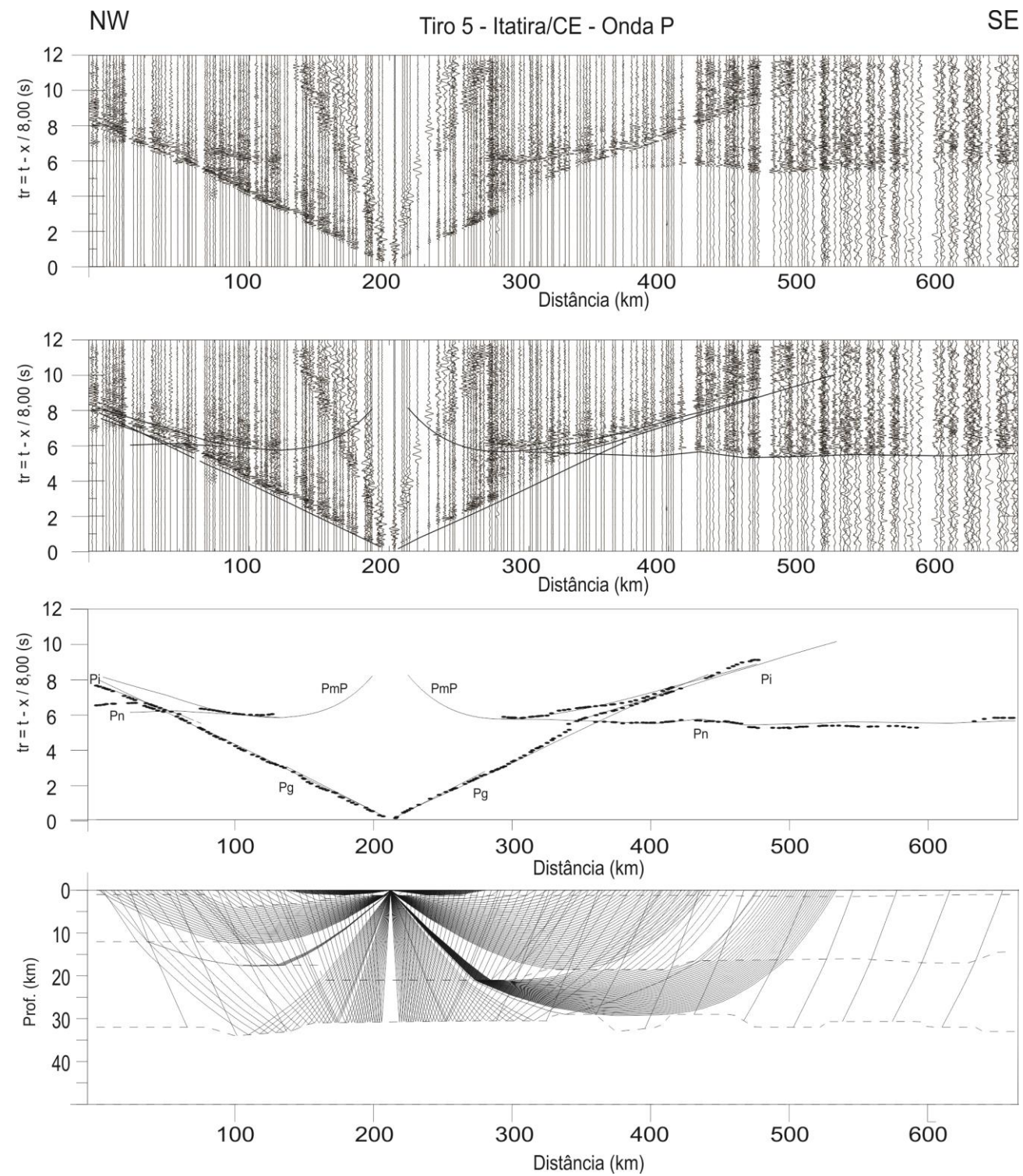


Figura 5.5 - Tiro 5 - Itatira/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

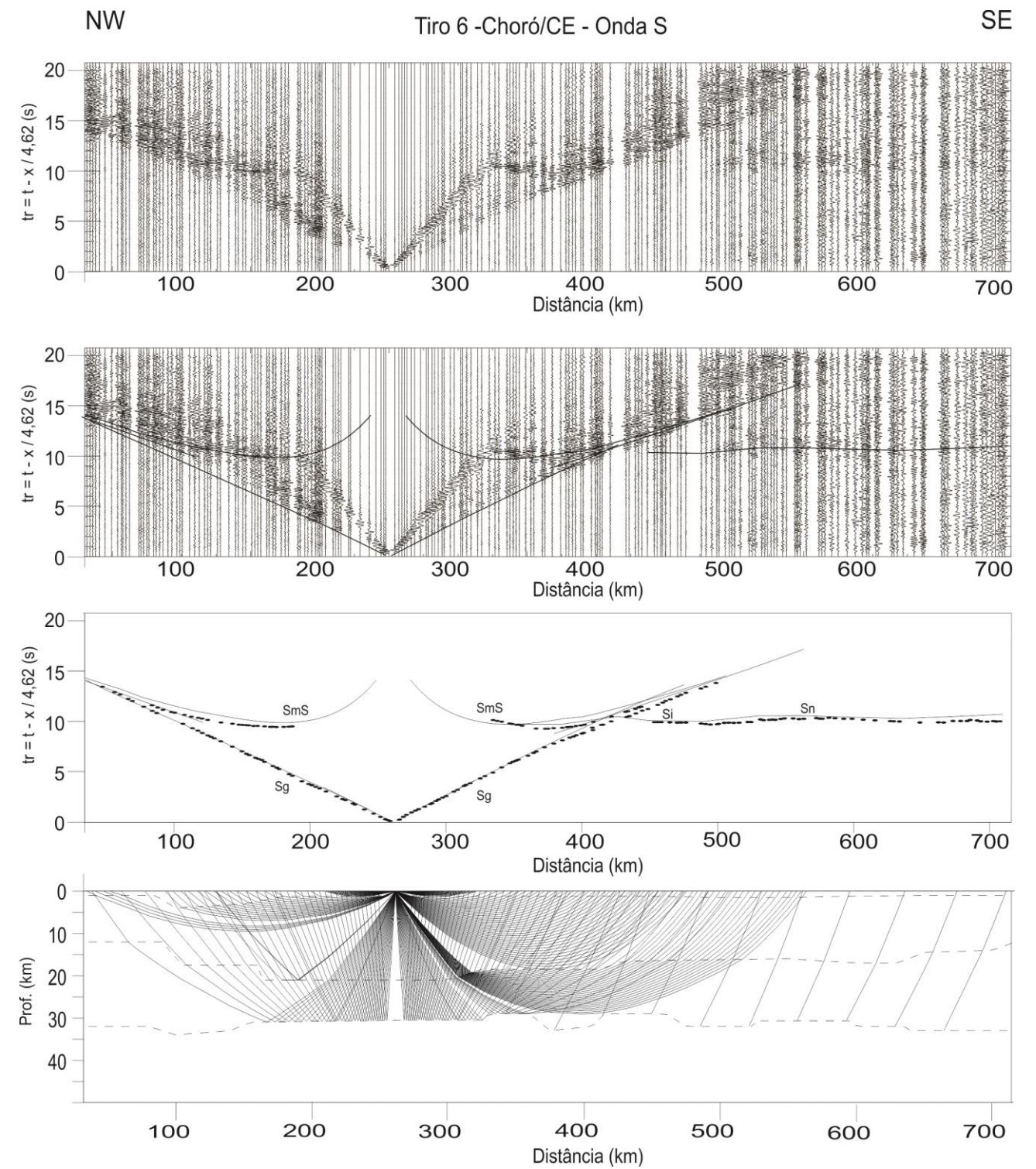
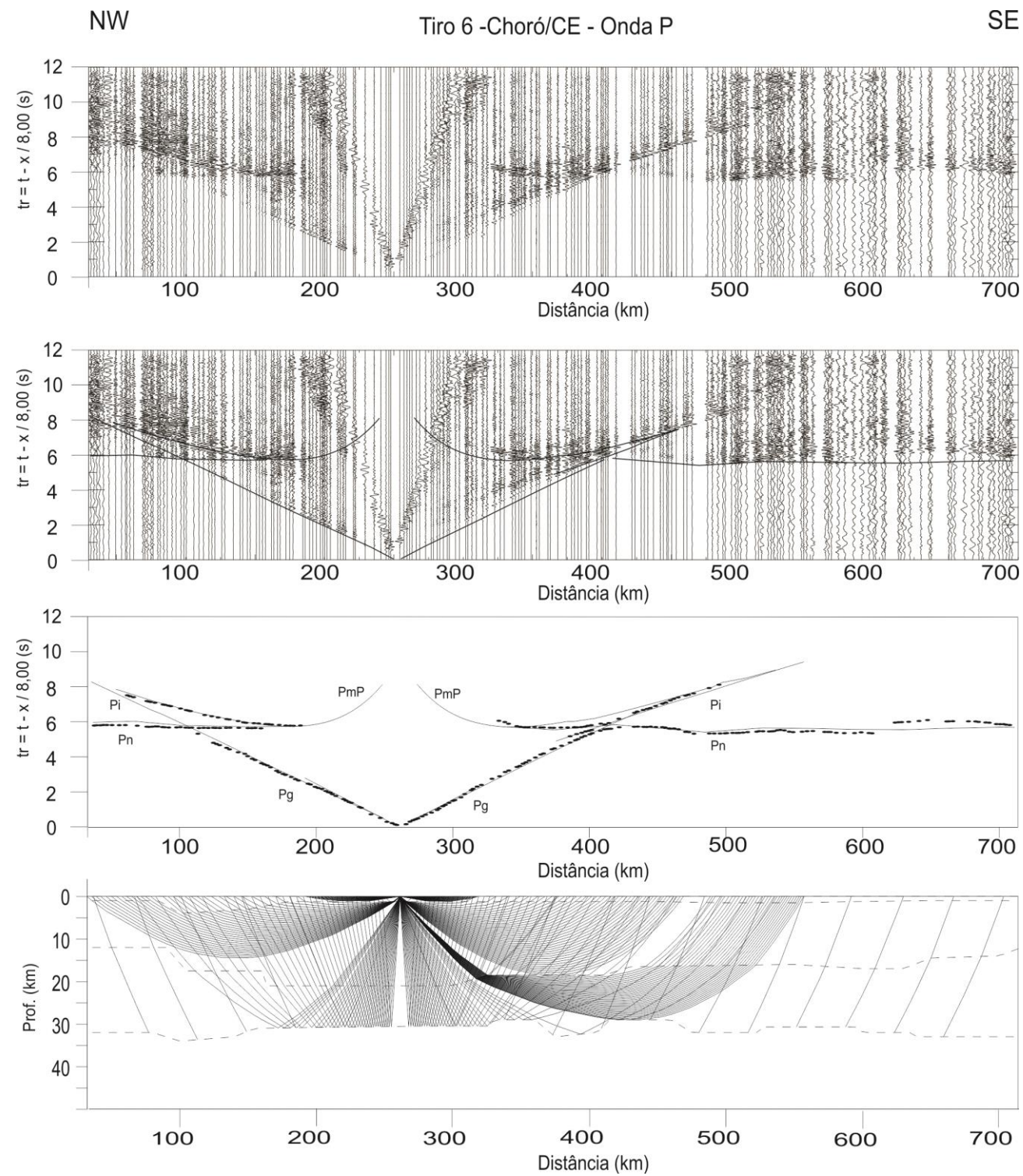


Figura 5.6 - Tiro 6 - Choró/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

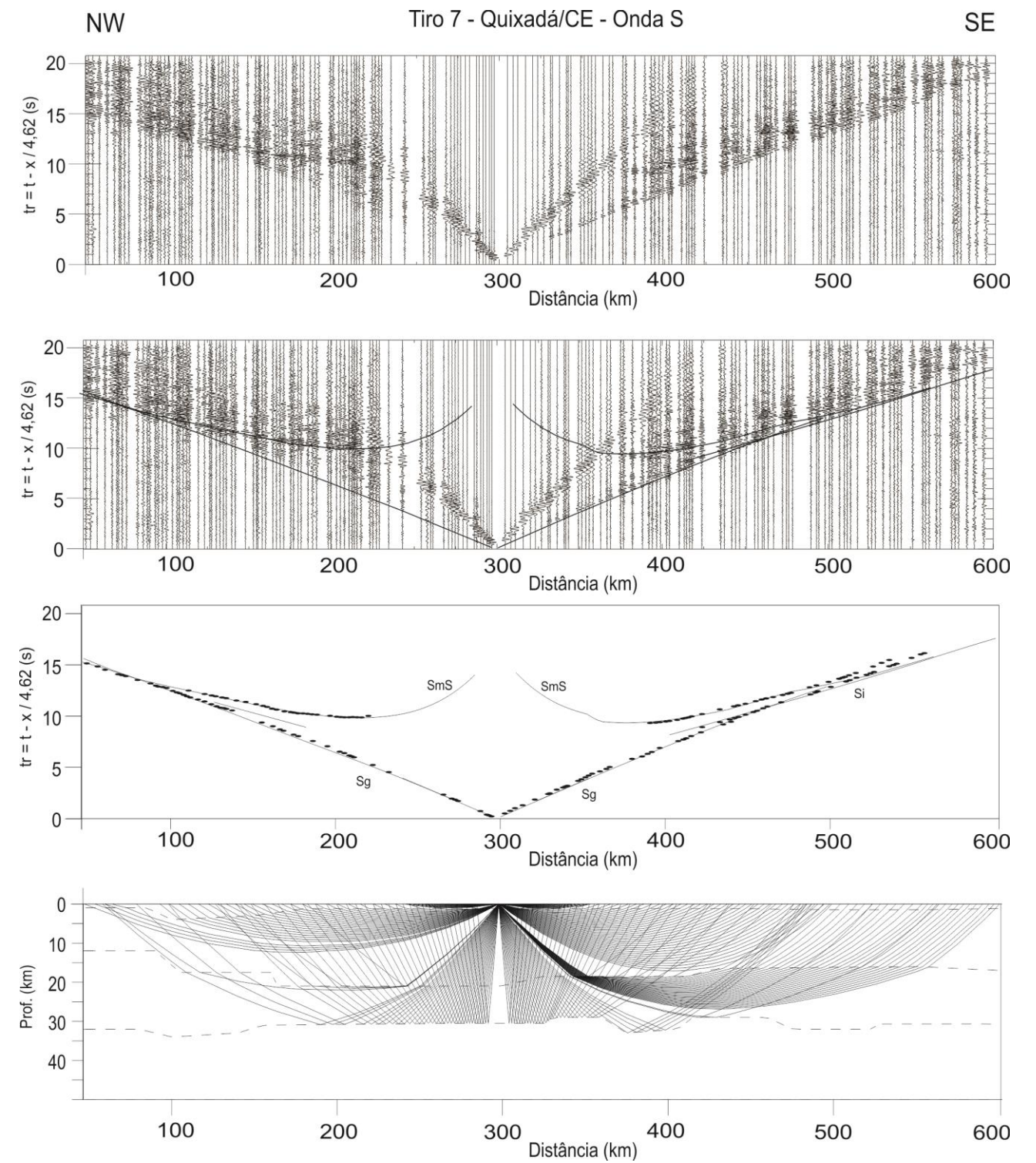
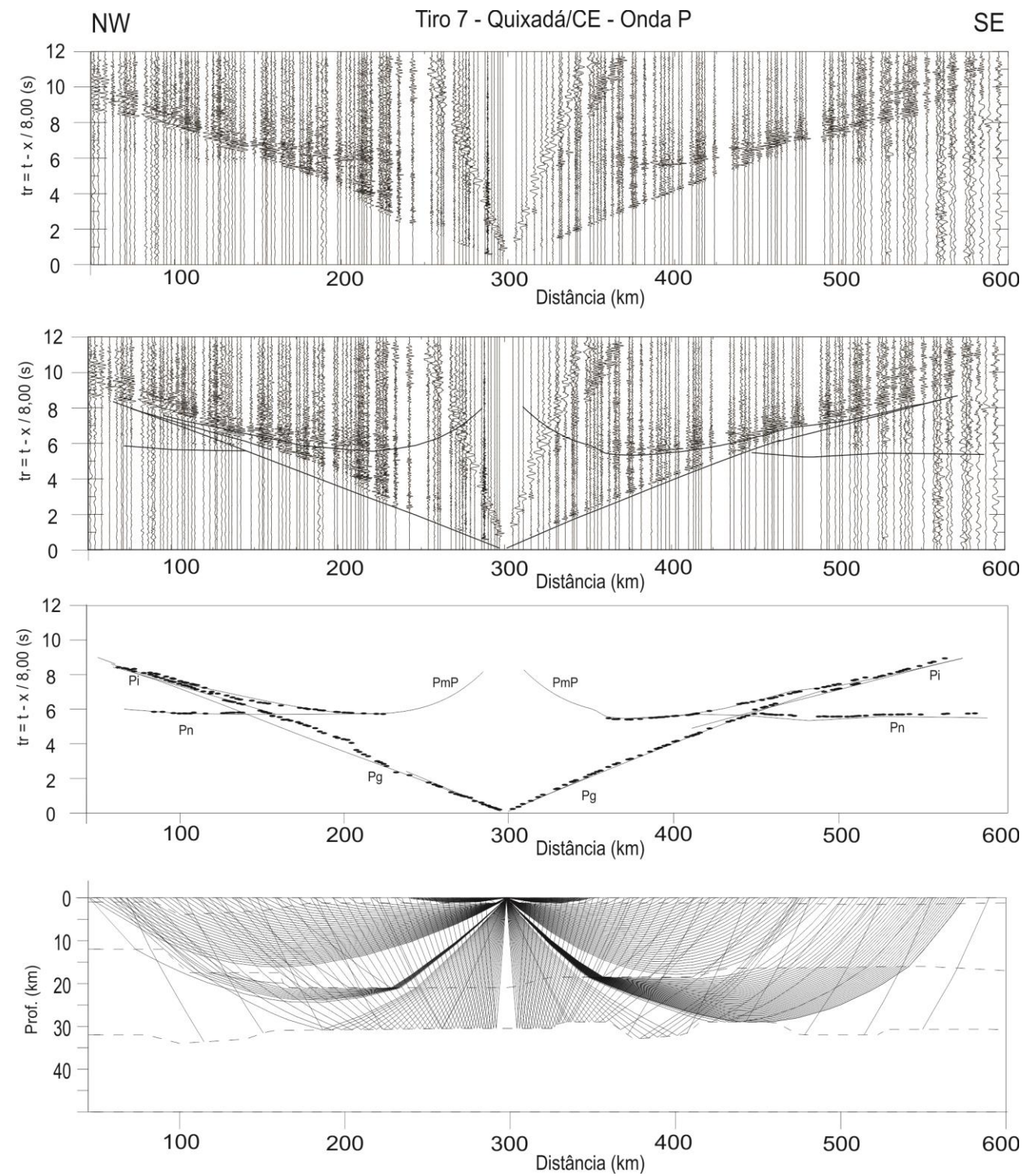


Figura 5.7 - Tiro 7 - Quixadá/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

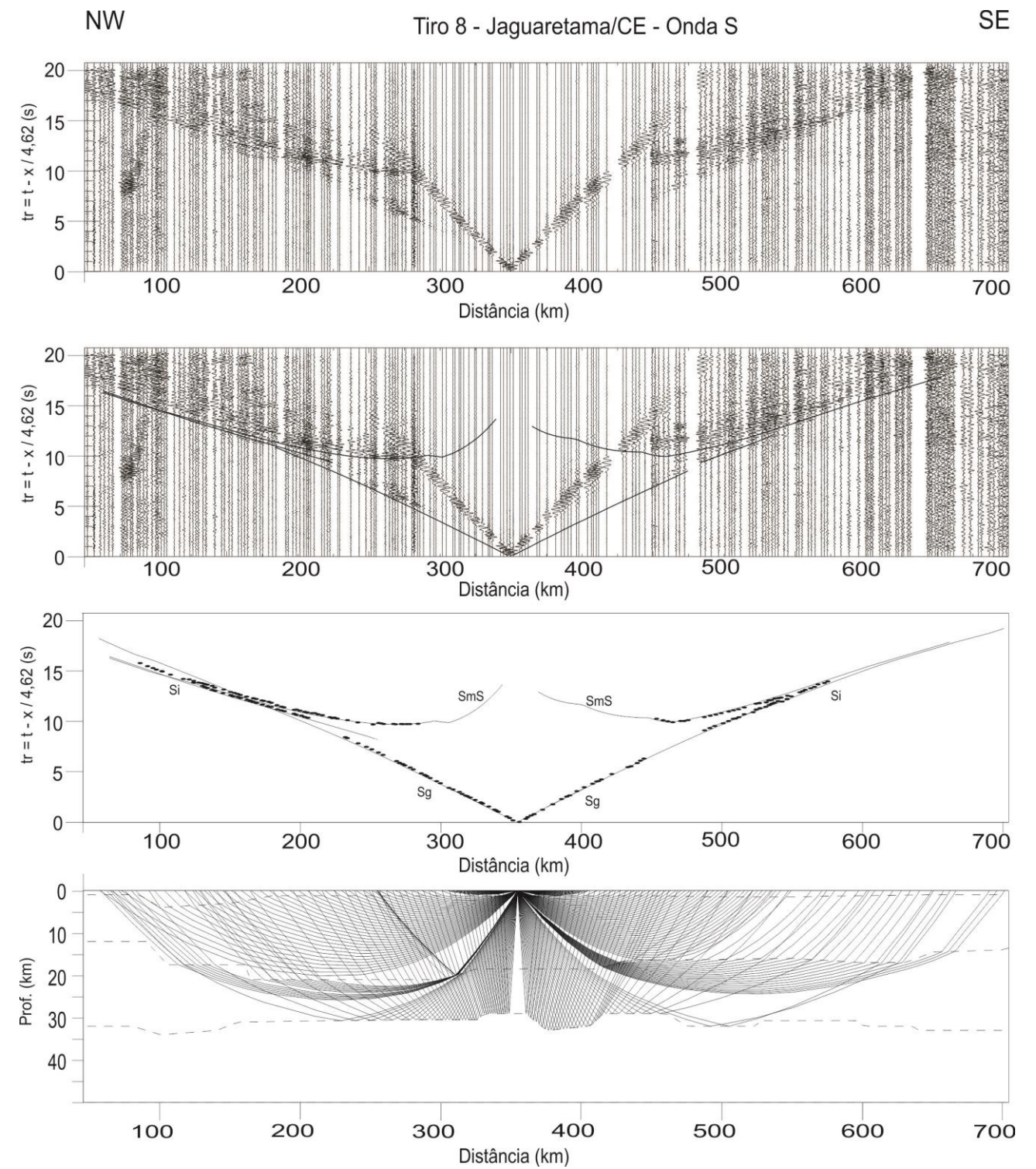
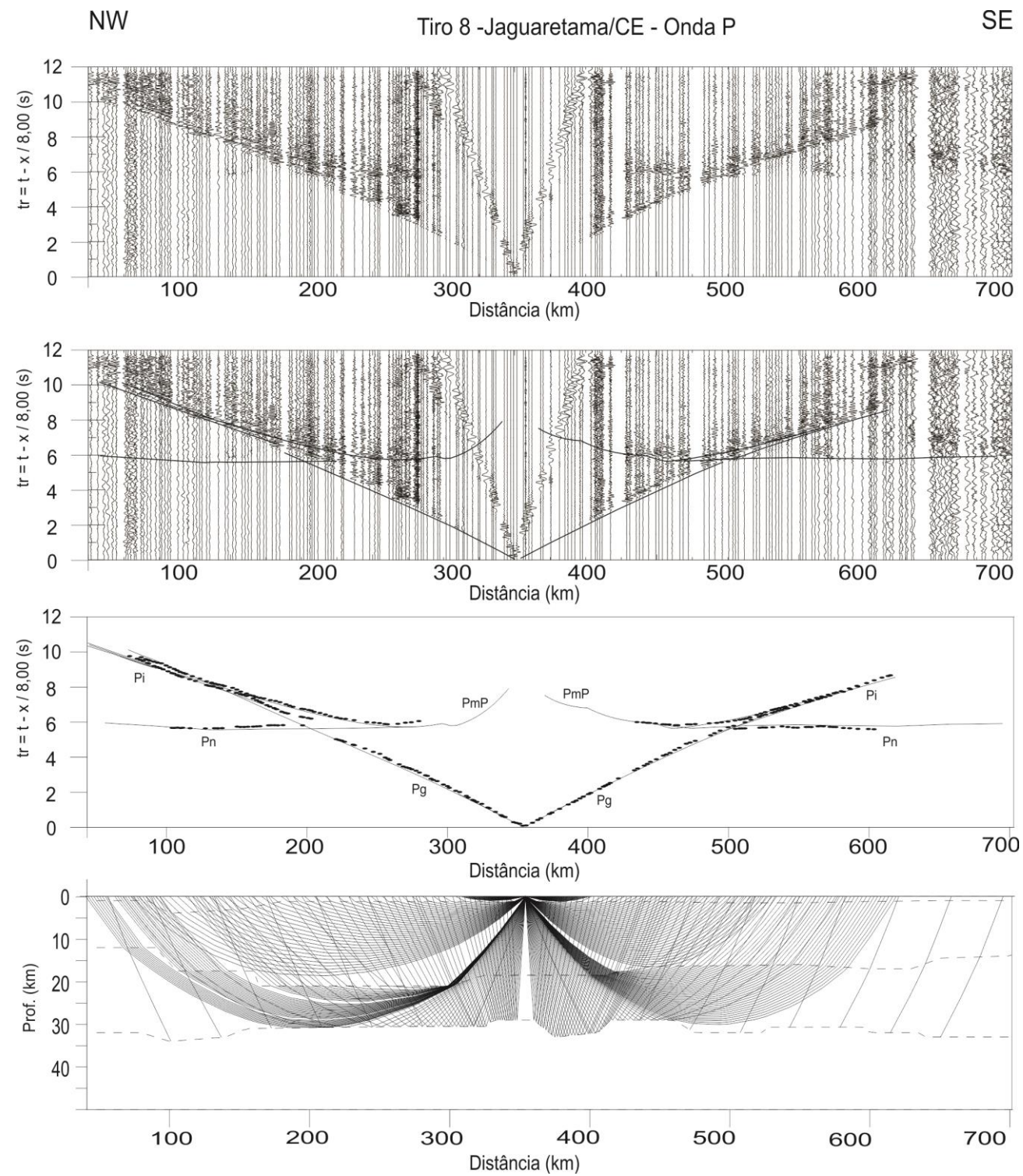


Figura 5.8 - Tiro 8 - Jaguaretama/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

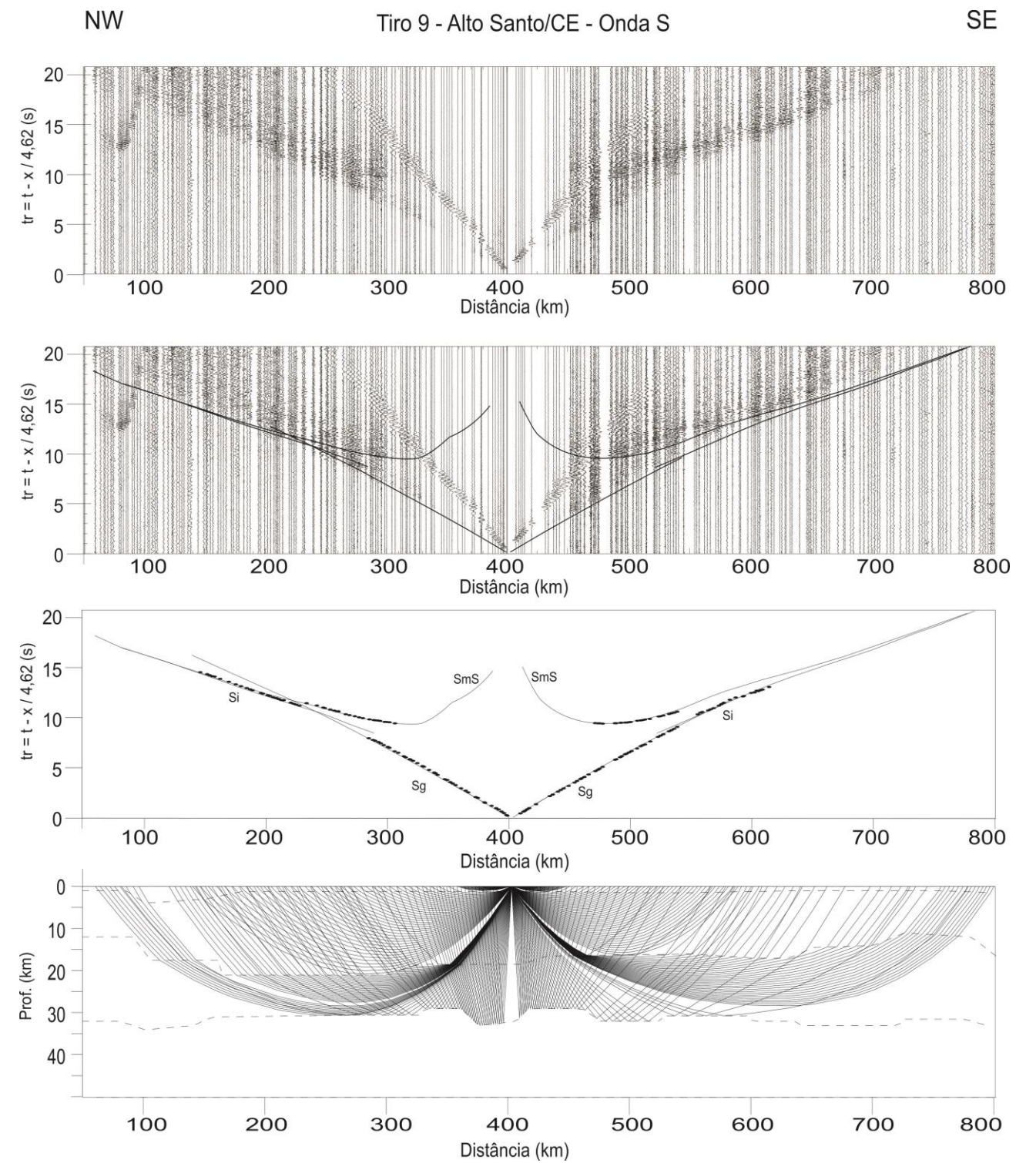
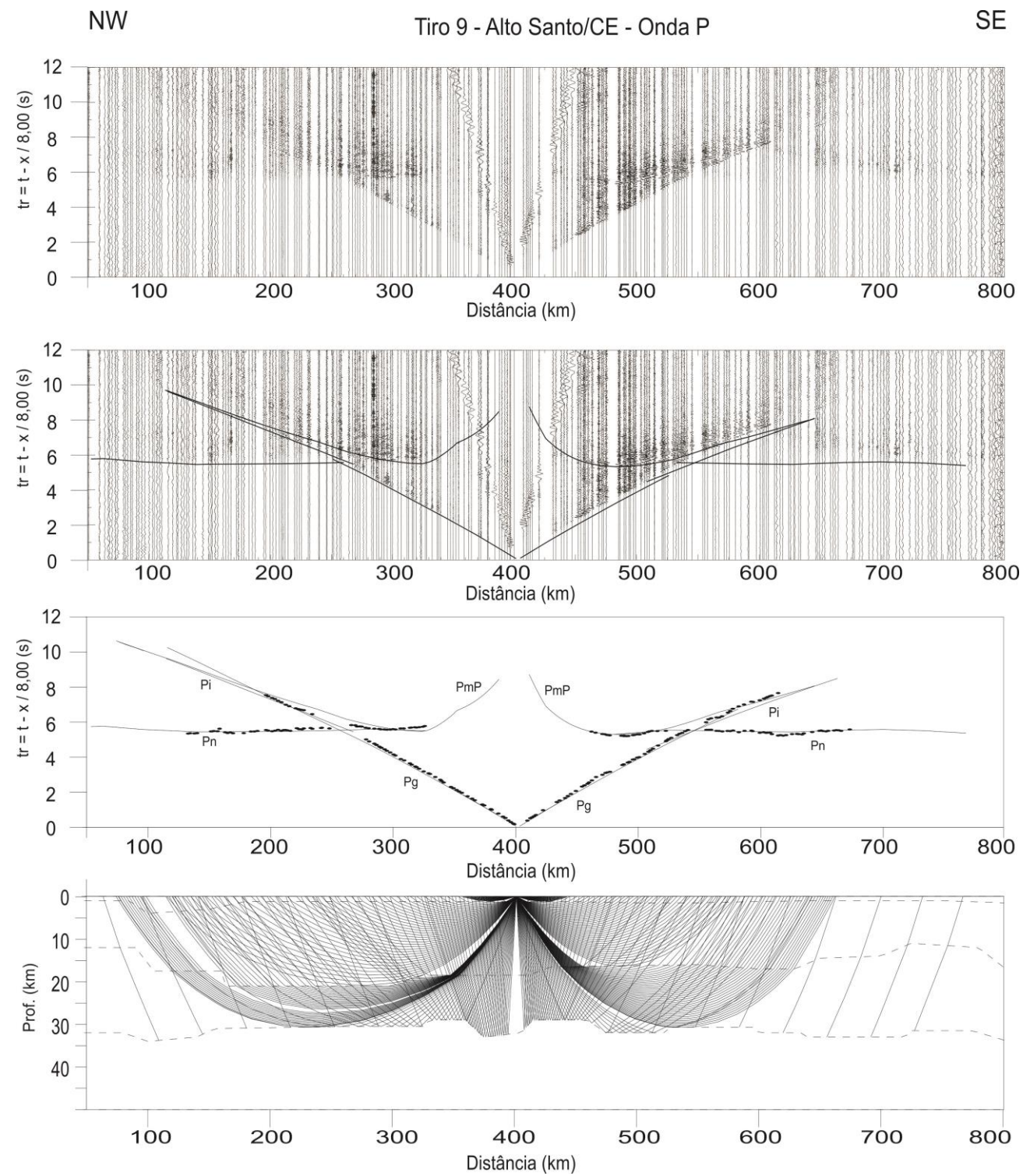


Figura 5.9 - Tiro 9 - Alto Santo/CE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s.

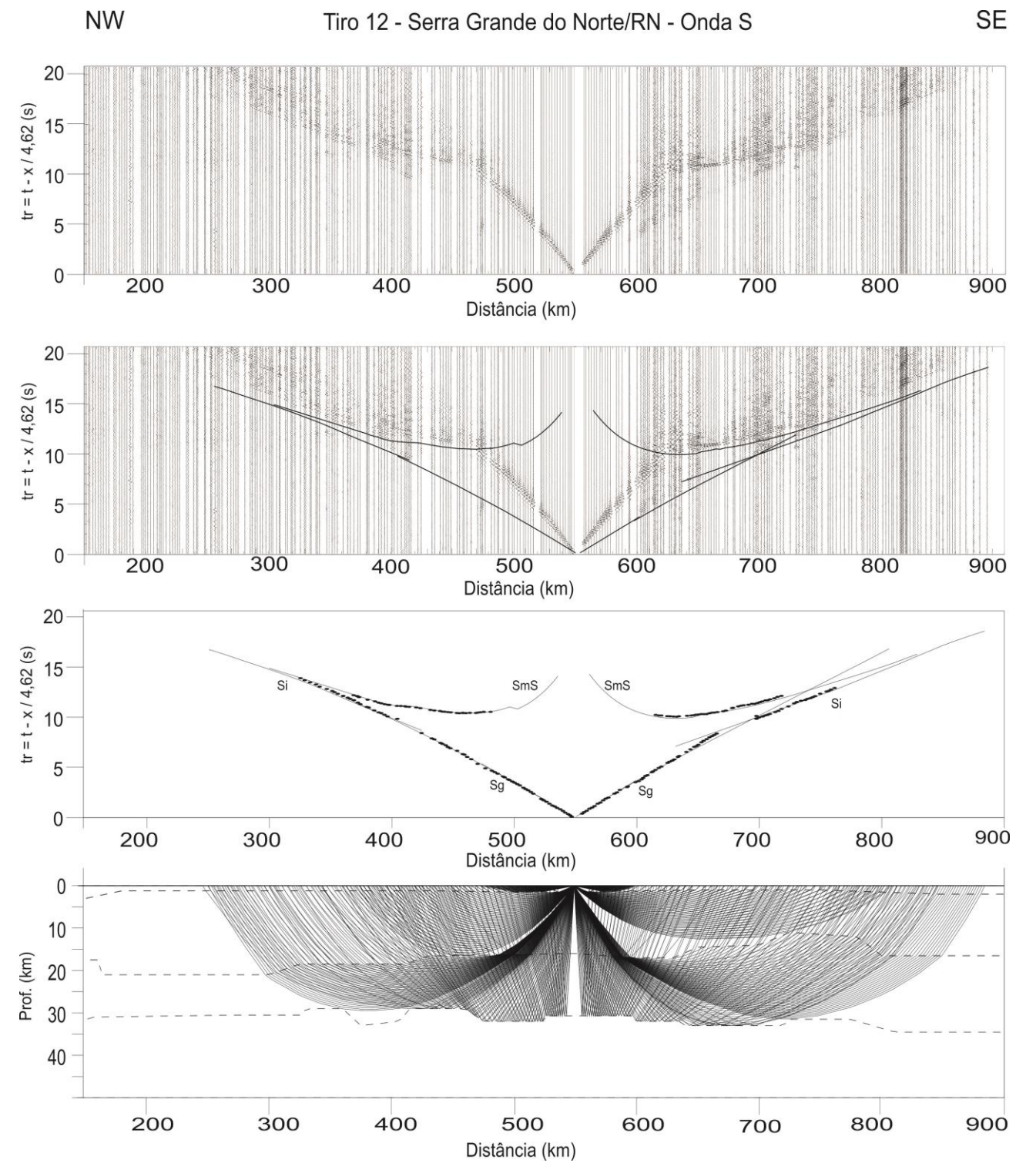
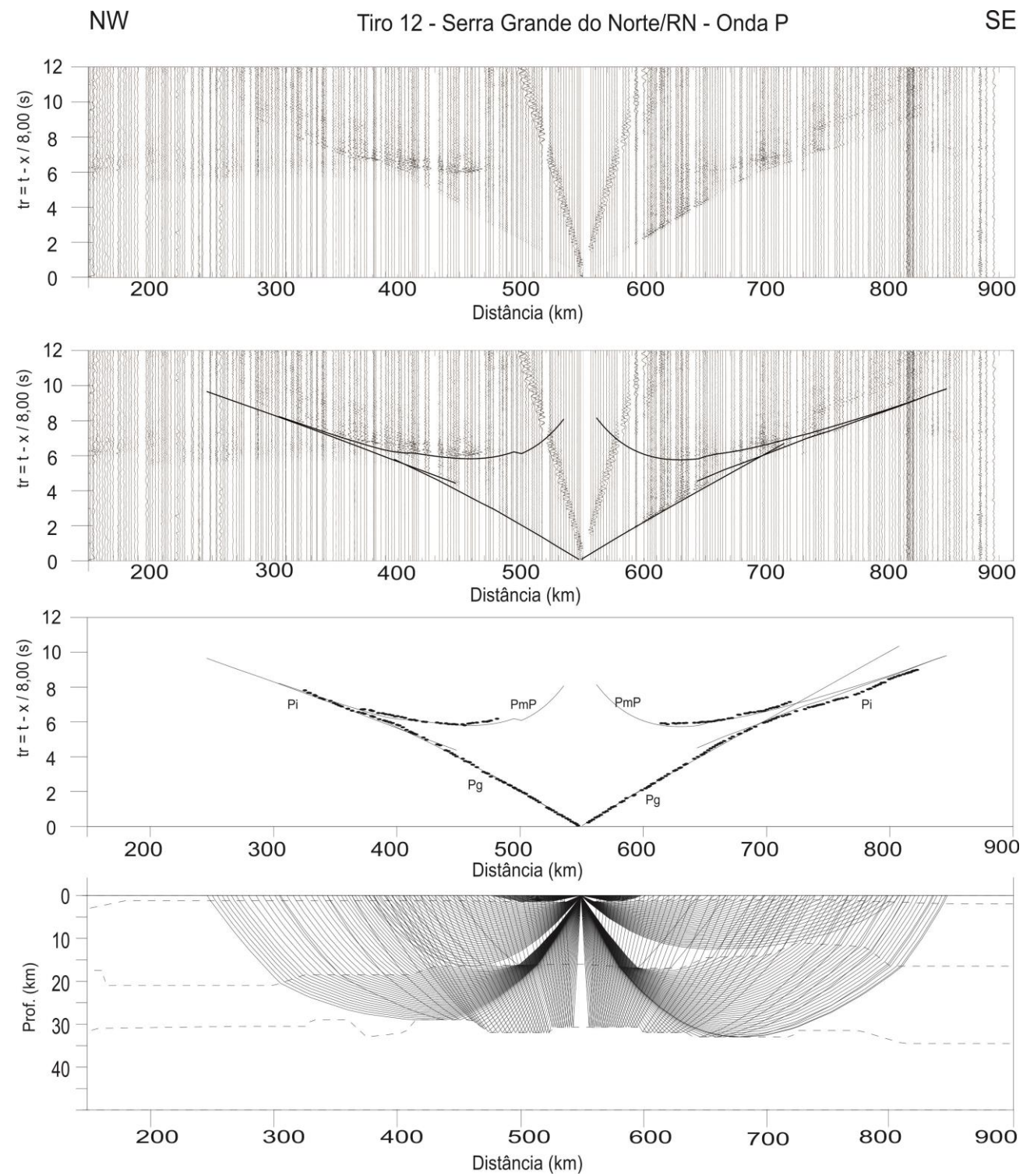


Figura 5.12 - Tiro 12 - Serra Grande do Norte/RN. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

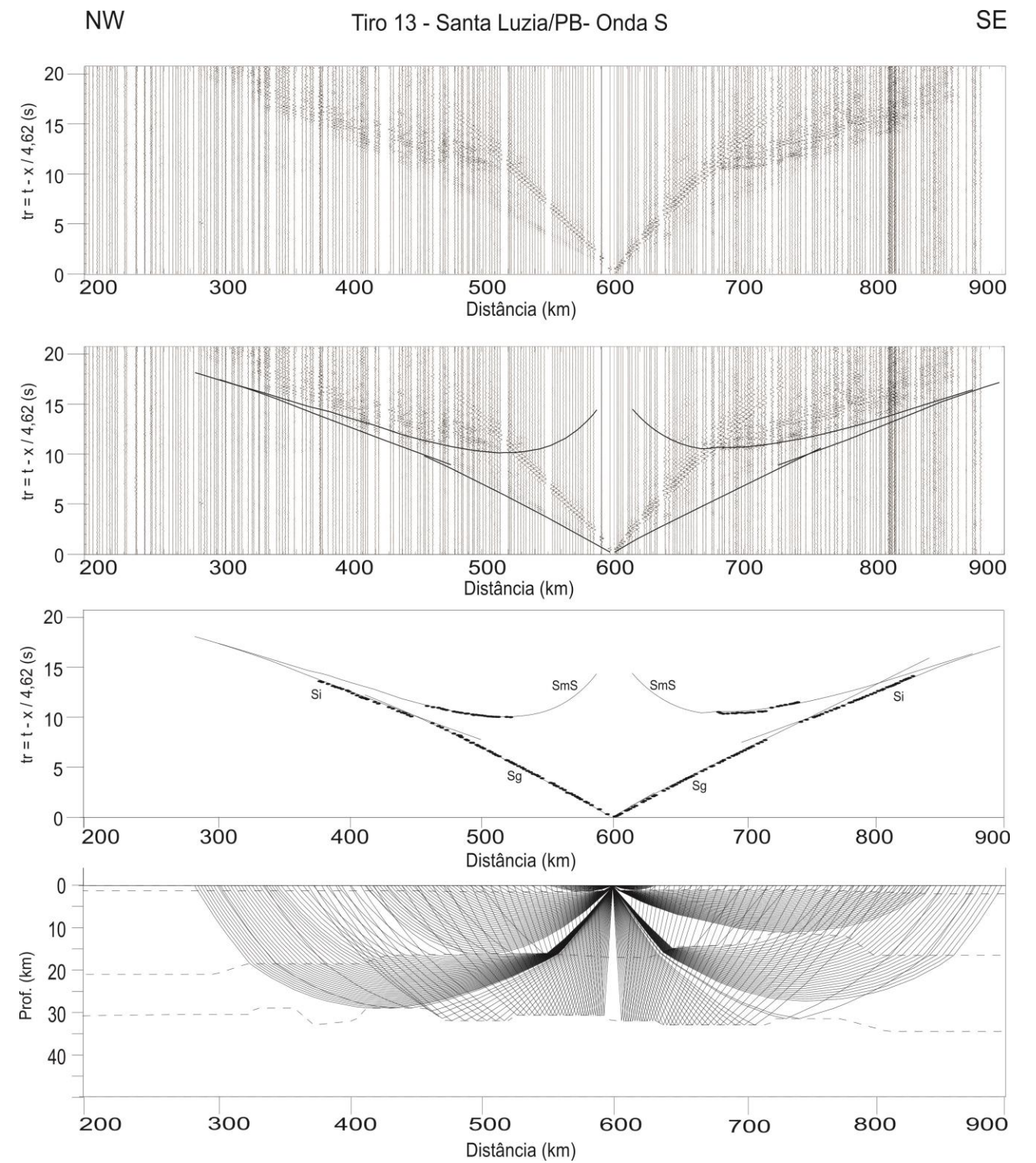
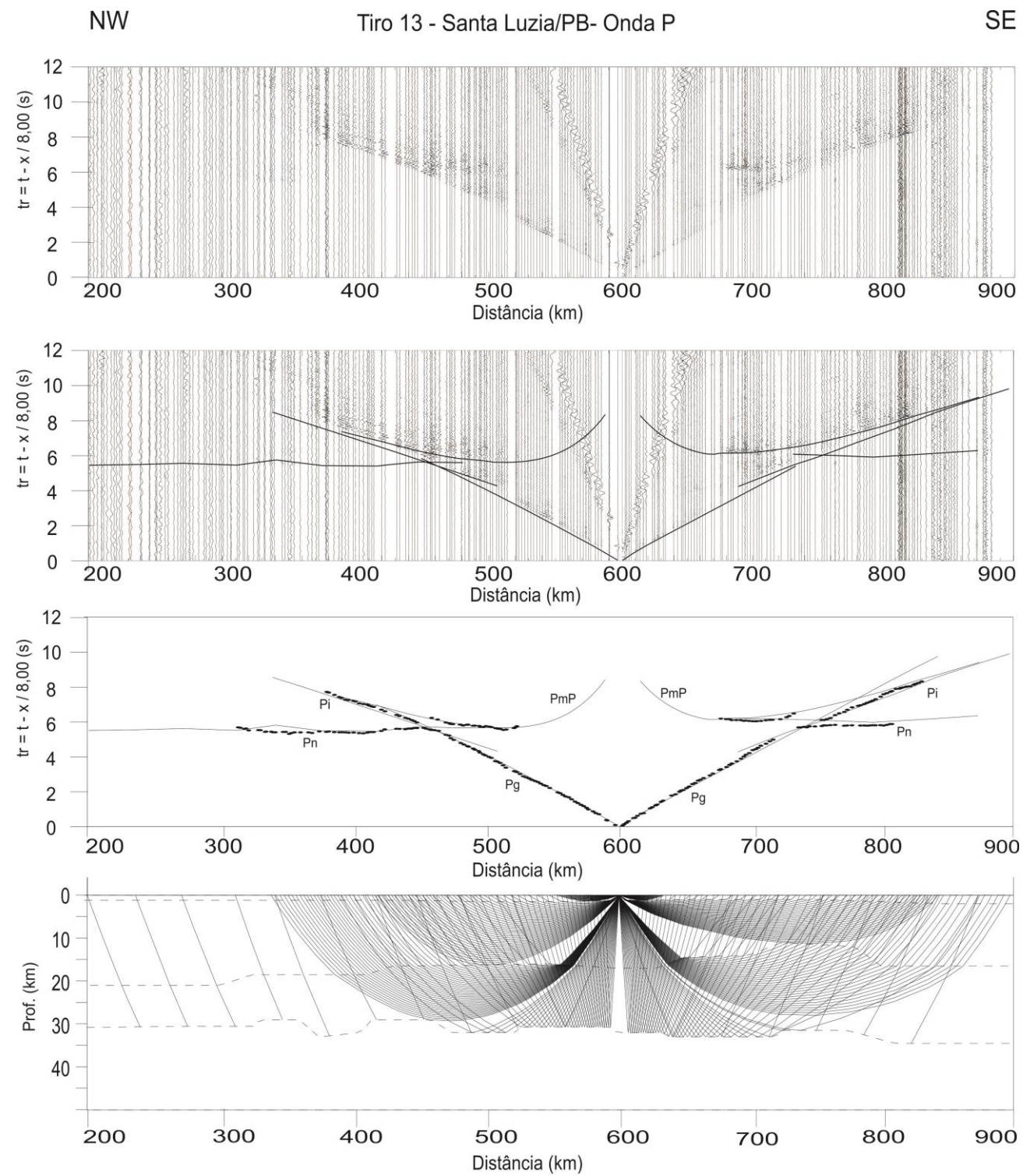


Figura 5.13 - Tiro 13 - Santa Luzia/PB. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

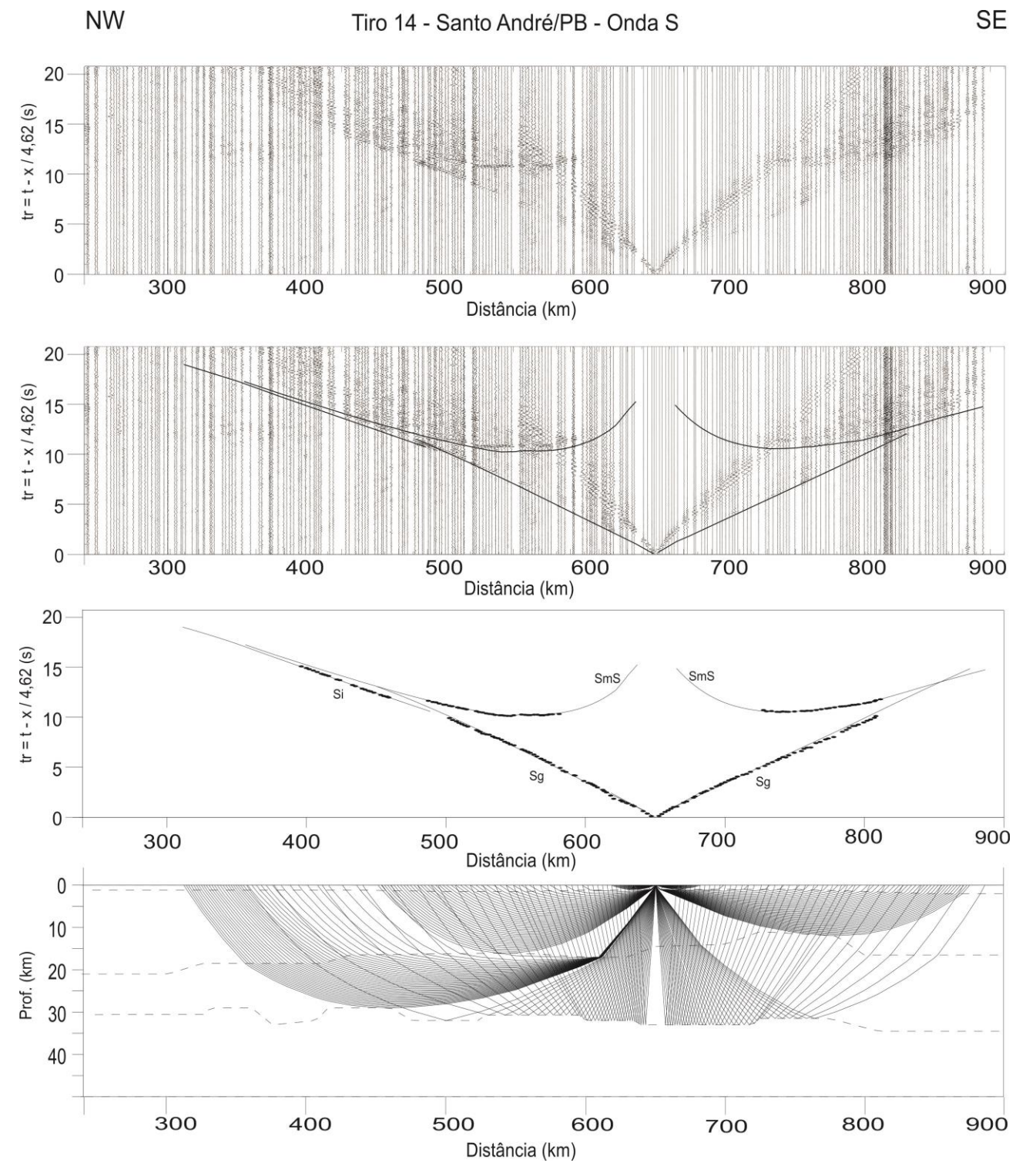
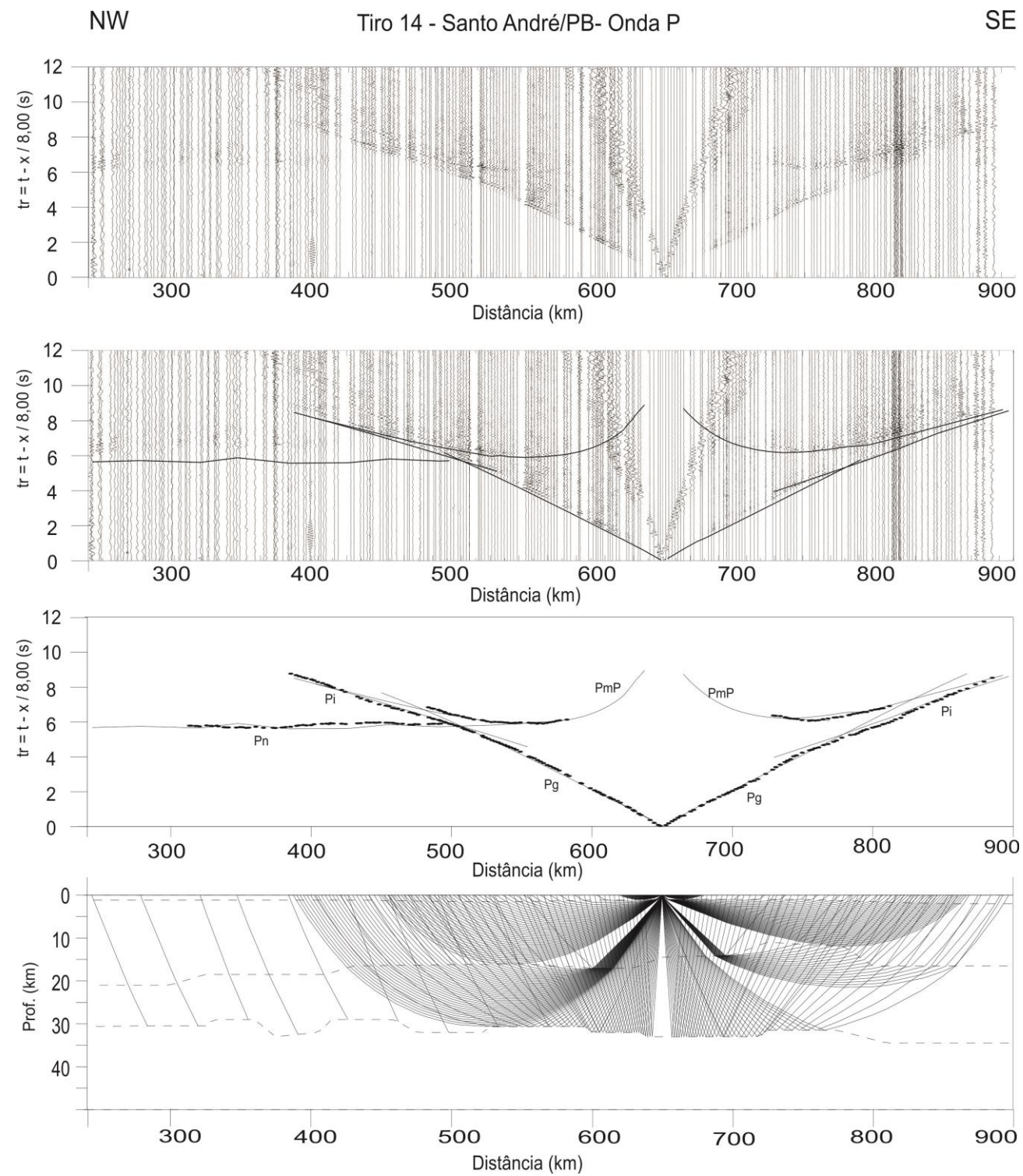


Figura 5.14 - Tiro 14 - Santo André/PB. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

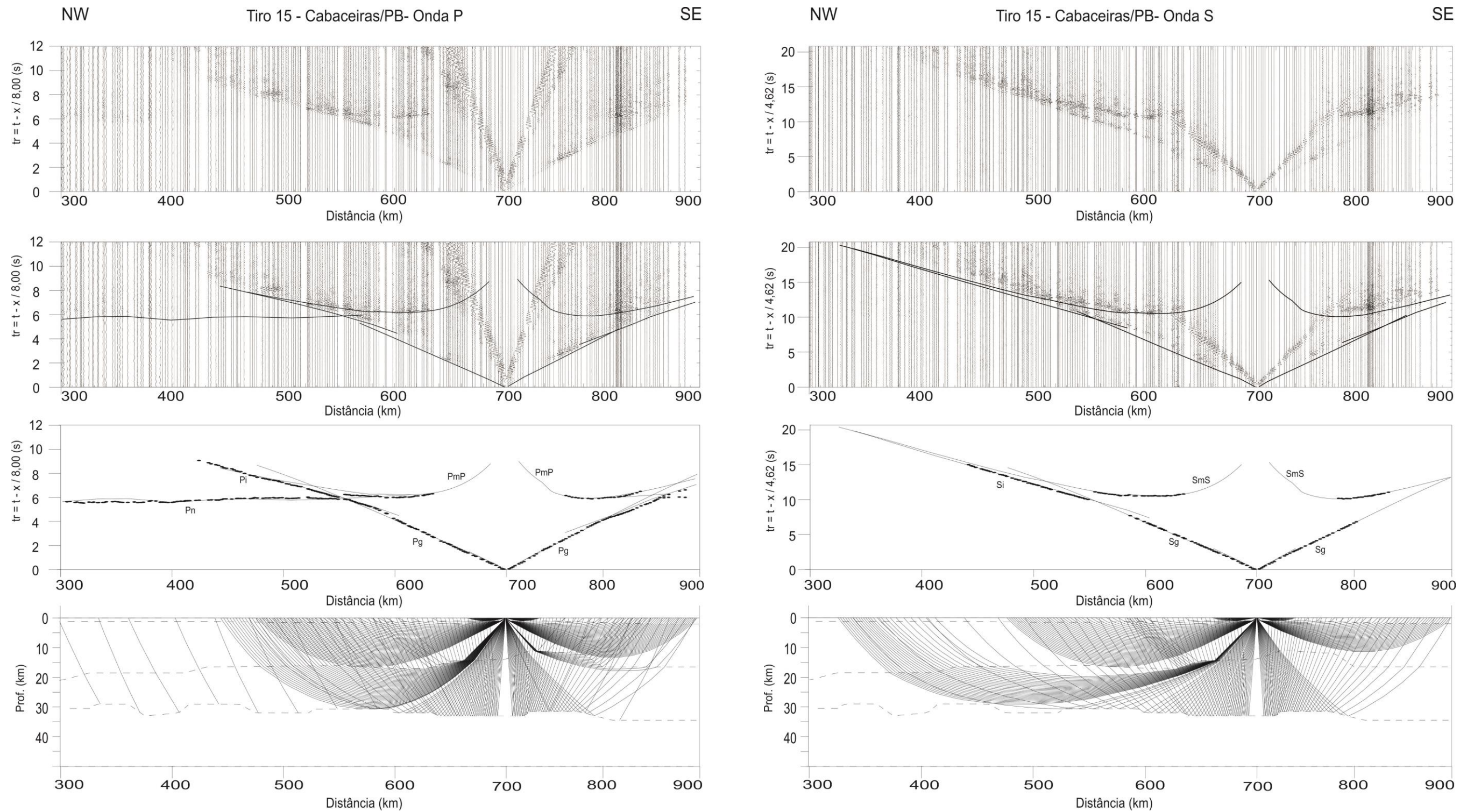


Figura 5.15 - Tiro 15 - Cabaceiras/PB. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

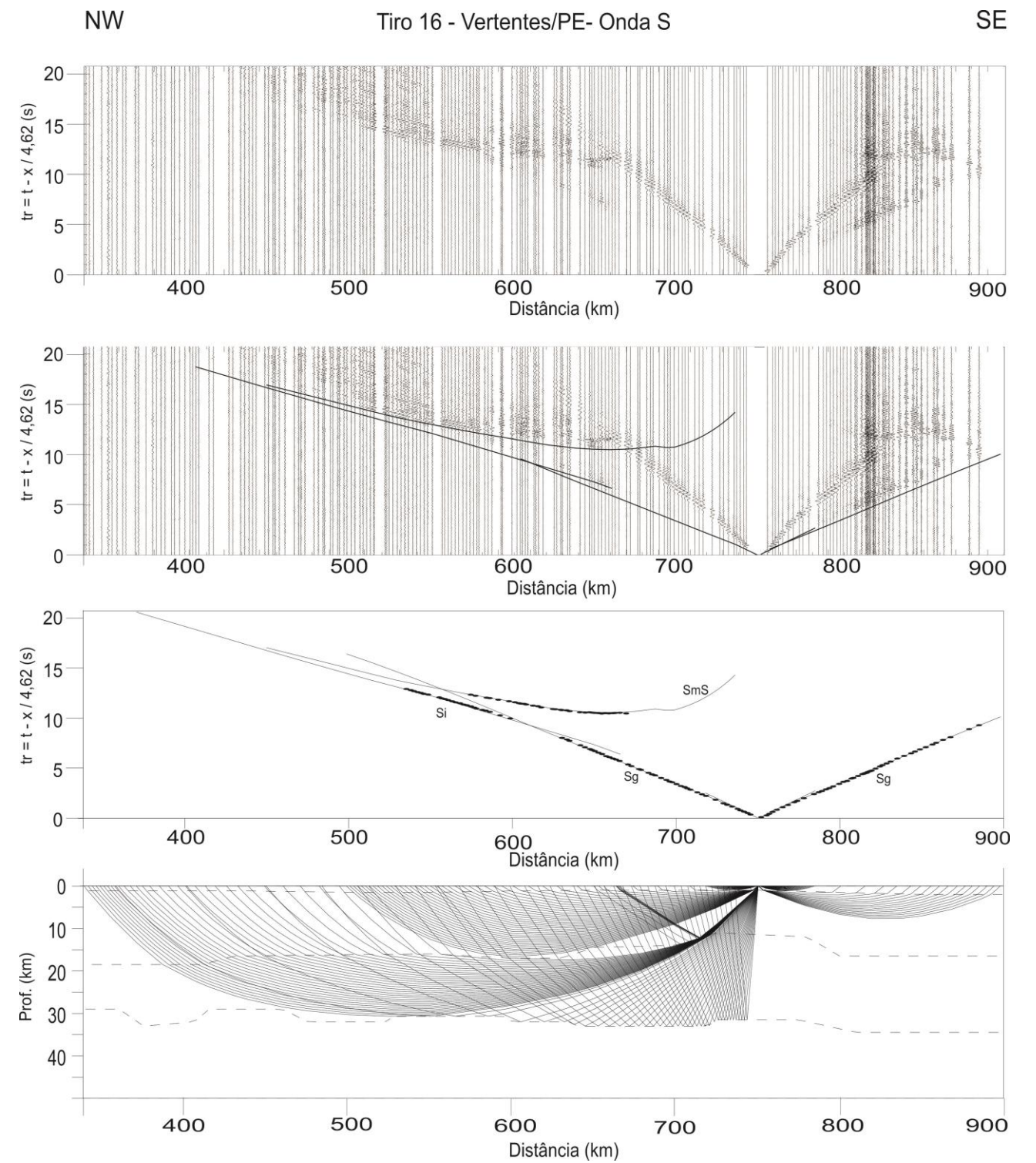
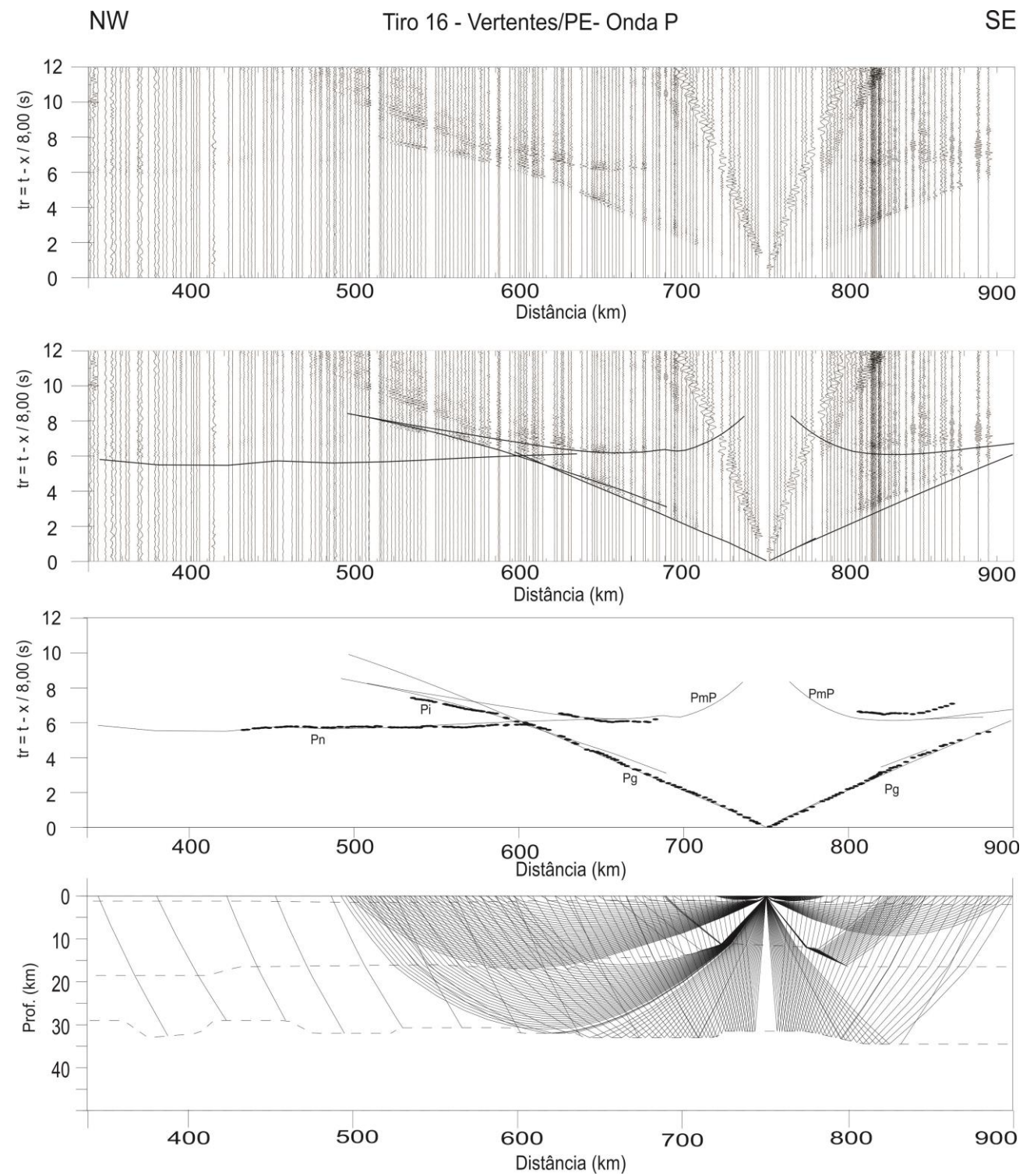


Figura 5.16 - Tiro 16 - Vertentes/PE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

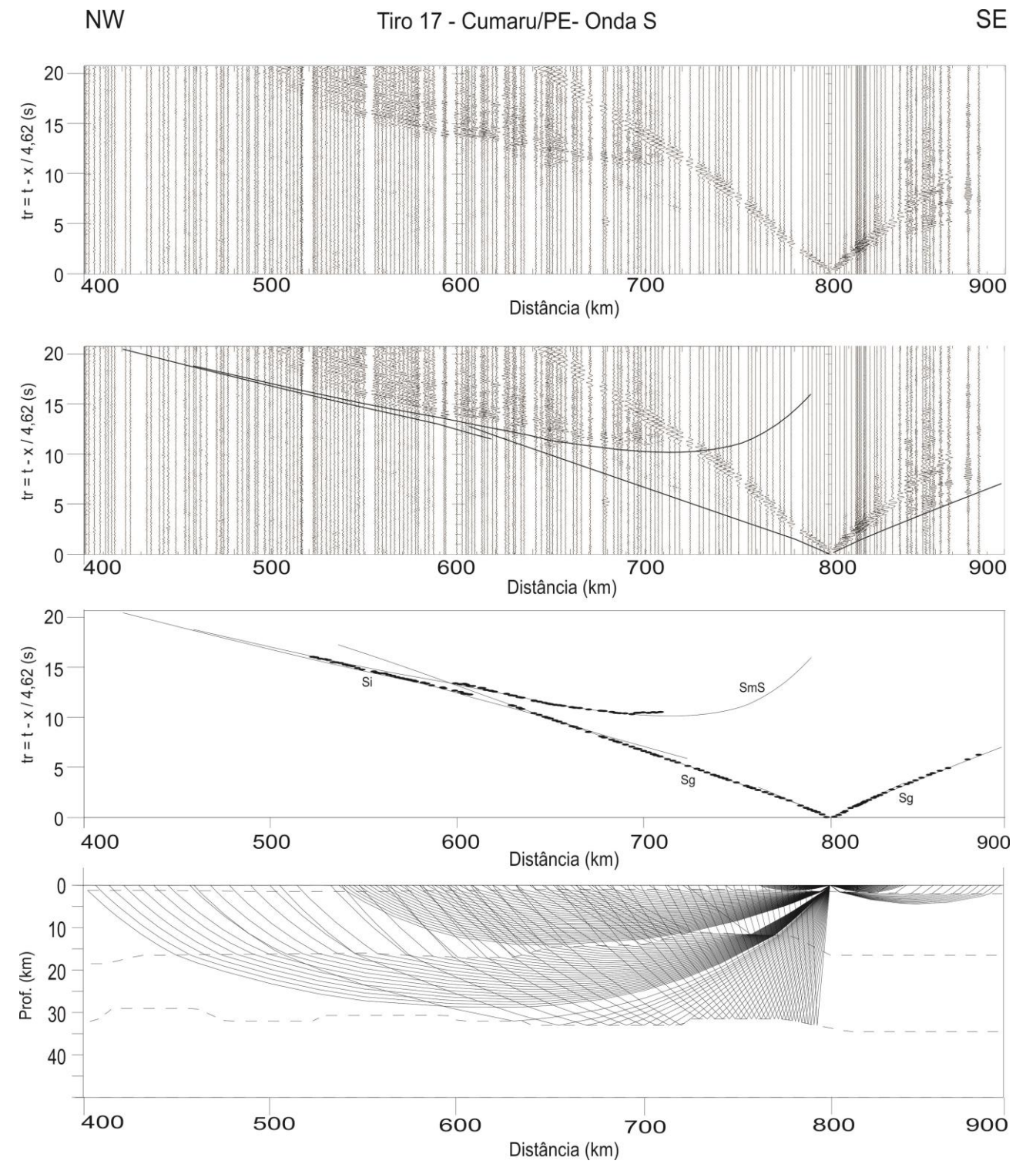
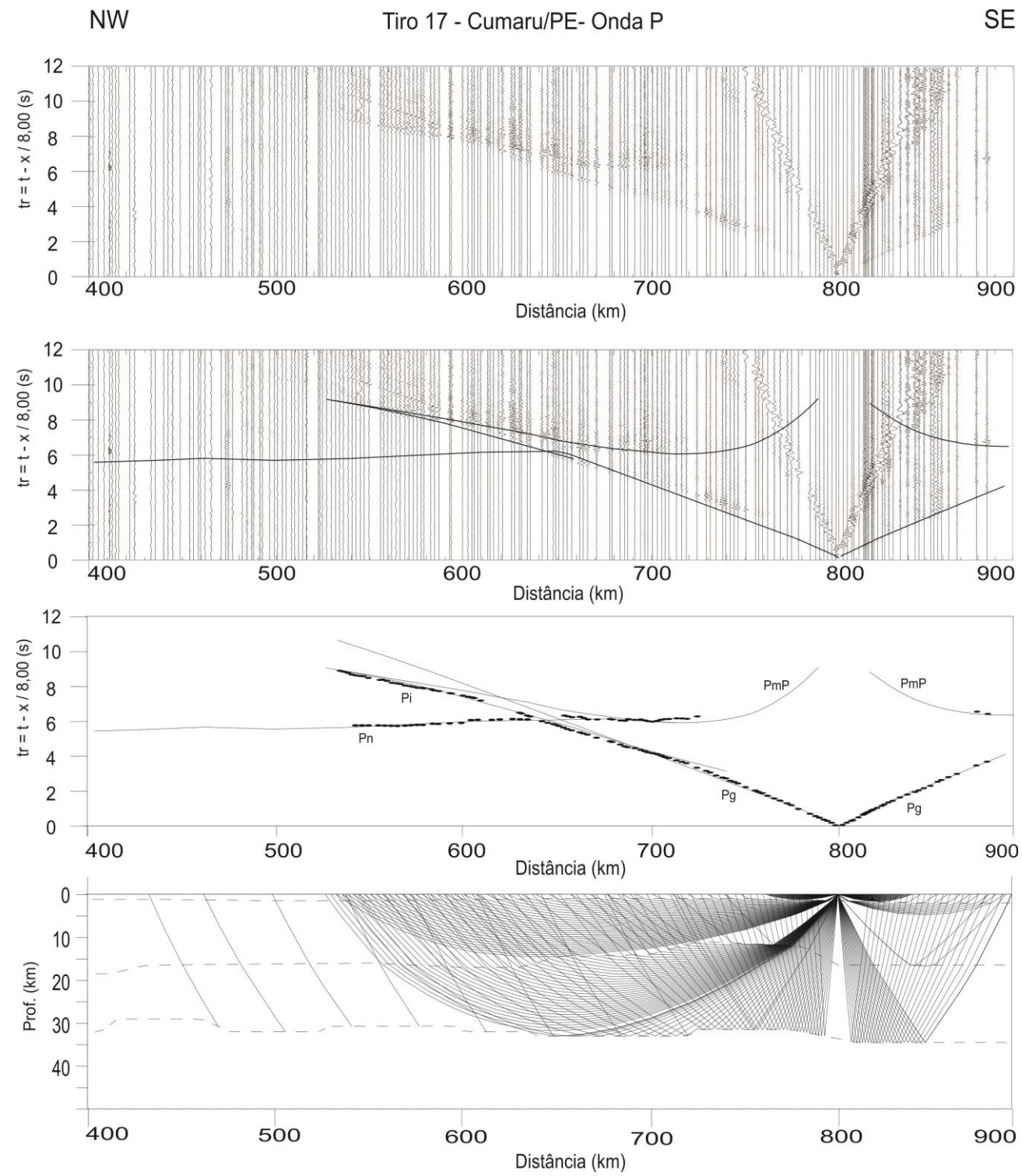


Figura 5.17 - Tiro 17 - Cumaru/PE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

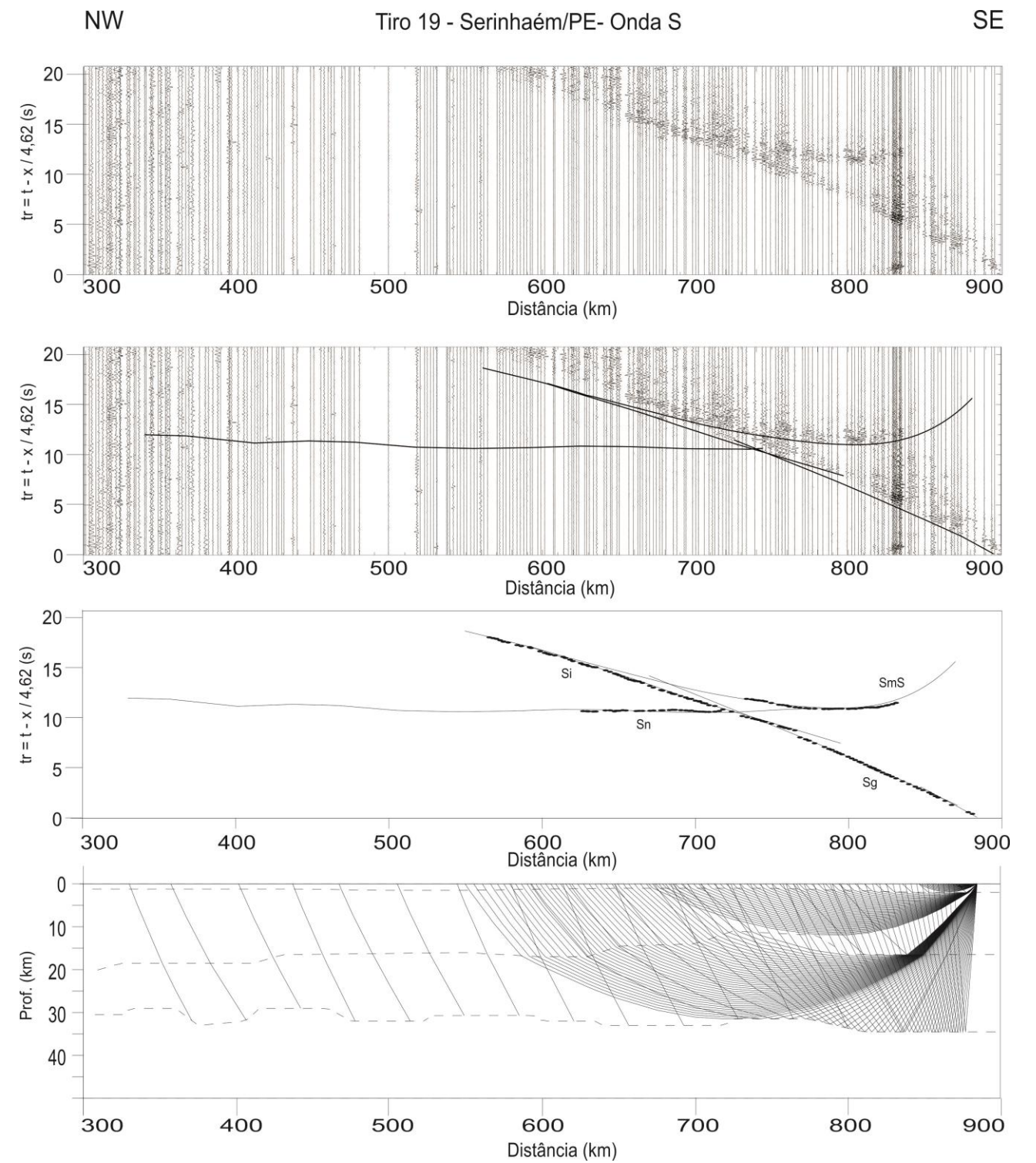
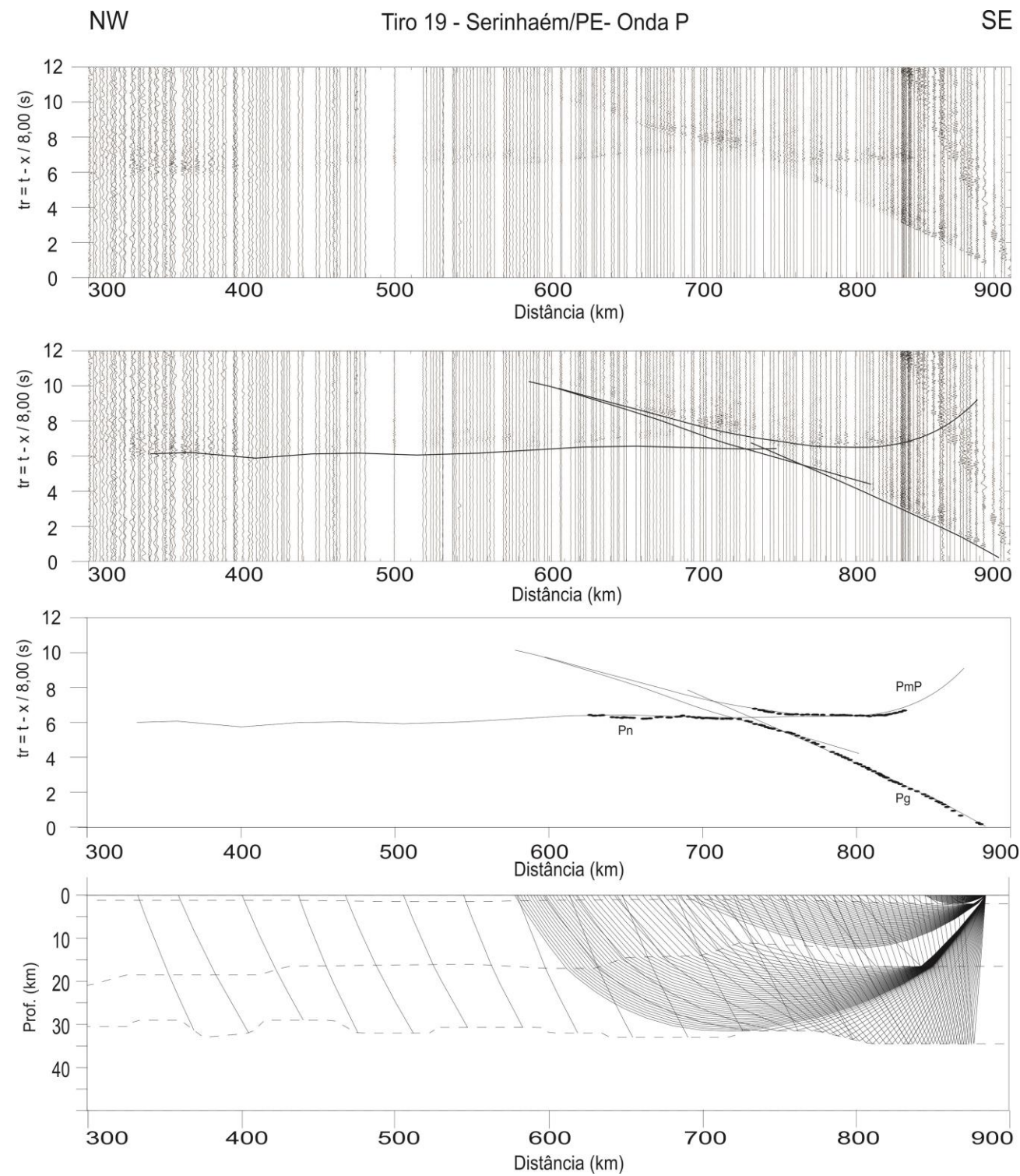


Figura 5.18 - Tiro 19 - Serinhaém/PE. De cima para baixo: Sismograma; Sismograma com as curvas teóricas de tempo de percurso; pontos de leituras das fases com linhas teóricas de tempo de percurso; e modelo com traçado de raios. Os sismogramas de onda P estão com velocidade de redução de 8,00 km/s e os sismogramas de onda S estão com velocidade de redução de 4,62 km/s. O sismograma de onda P foi modificado de Lima *et al.* (2014).

Suportado pela modelagem dessas 36 seções sísmicas, sendo 18 de onda P e 18 de onda S, foi integrado modelo de onda P para o perfil e gerado modelo de onda S. A partir dos modelos P e S foi feita a razão dos grids de velocidade e obtido modelo de razão V_p/V_s .

Cabe notar que sempre é preciso considerar as incertezas e ambiguidades do método de refração sísmica profunda, tais como imprecisão na determinação das leituras, subjetividade na interpretação das fases, complexidade do modelo geológico e simplicidade do modelo geofísico. Entretanto, pode-se considerar que os ajustes alcançados foram satisfatórios para os modelos apresentados.

5.2. Modelo P

O modelo é composto por quatro camadas limitadas por três interfaces, sendo que as três primeiras camadas pertencem à crosta e a quarta representa o manto litosférico. A crosta é bem caracterizada em crosta superior e inferior, sendo que a crosta superior é formada pelas duas primeiras camadas.

A primeira camada está presente em todo o modelo, possui espessura de 1 a 4 km e velocidade de onda compressional de 5,75 a 6,05 km/s no topo e de 5,85 a 6,07 km/s na base. A espessura da segunda camada varia de 11 km a 20 km, e junto com a primeira camada formam a crosta superior. As velocidades de onda P variam de 6,03 a 6,23 km/s no topo, e de 6,10 a 6,45 km/s na base da camada.

A terceira camada tem espessura variando de 9 a 20 km e velocidades variando de 6,4 a 6,6 km/s no topo; na base variam de 6,6 a 6,9 km/s. A base dessa camada é limitada pela interface que caracteriza a descontinuidade de Moho (Figura 5.19).

O manto litosférico apresenta velocidade de 8,1 km/s na porção central e 7,9 km/s nos extremos do perfil.

Considerando as variações de espessura (geometria) das crostas superior e inferior ao longo do perfil e variação na distribuição de velocidade das ondas P é possível estabelecer relação entre os domínios geofísicos sugeridos pelas descontinuidades crustais com os domínios geológicos de superfície. Alguns pontos do modelo chamam atenção:

i) de forma geral a crosta ao longo do perfil sísmico é fina com espessura variando entre 31-33 km, localmente chegando a 35 km;

ii) a Moho é uma interface relativamente suave não expressando as variações bruscas de topografia presentes ao longo do perfil;

iii) o Domínio Médio Coreau apresenta crosta superior com menor espessura e menor velocidade, para a crosta superior e topo da crosta inferior, em relação ao Arco de Santa Quitéria. O limite entre os domínios é o lineamento Transbrasiliano (Sobral-Pedro II). Por estar no extremo do perfil, a crosta inferior e o manto litosférico não são bem imageados pela refração sísmica;

iv) na região do Arco Magmático de Santa Quitéria a crosta é mais espessa e as velocidades de onda P são menores na crosta inferior e no manto, em comparação com outras áreas do perfil;

v) na região do Domínio Ceará Central, a leste do Arco de Santa Quitéria, a crosta é caracterizada por apresentar maior espessura de crosta superior em relação a crosta inferior, com limites crosta superior-inferior e descontinuidade de Moho igualmente suaves. A geometria sugere crosta retrabalhada por estiramento;

vi) nas camadas cortadas por zonas de cisalhamento ou de mudança de domínio tectônico as espessuras apresentam mudanças bruscas, como pode ser observado nas zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II, Senador Pompeu, Portalegre, Patos e Pernambuco (Figura 5.19).

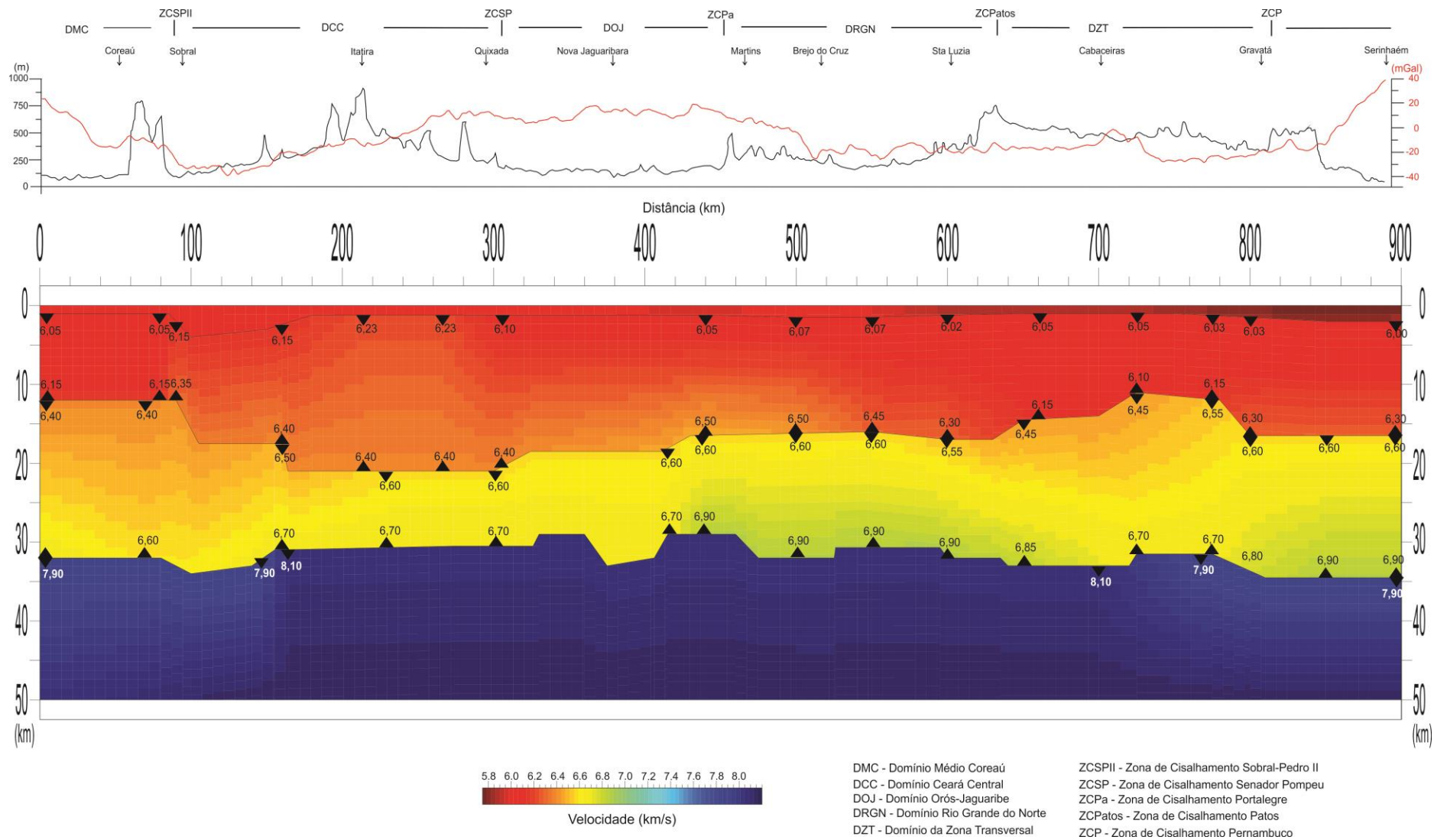


Figura 5.19 - Modelo sísmico de onda P, obtido da linha NW-SE levantada na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.

5.3. Modelo S

O modelo S foi obtido com base na geometria de camadas adquiridas no modelo de onda P, ou seja, os ajustes foram realizados nas velocidades, preservando as espessuras, estruturação e quantidades de camadas obtidas com base no modelo P.

As velocidades de onda S para a primeira camada variam de 3,32 km/s a 3,53 km/s no topo da camada e de 3,38 km/s a 3,55 km/s na base. Na segunda camada a velocidade no topo varia de 3,48 km/s a 3,65 km/s e na base varia de 3,55 km/s a 3,72 km/s.

Na crosta inferior as velocidades no topo de camada variam de 3,70 km/s a 3,90 km/s, na base as velocidades variam de 3,80 km/s a 4,00 km/s.

No topo do manto litosférico as velocidades da onda S variam de 4,52 a 4,64 km/s.

O que se destaca no modelo é que a velocidade da onda S na crosta inferior é maior a leste do Arco de Santa Quitéria, domínio Ceará Central-Orós Jaguaribe, reforçando a diferença desses domínios em relação aos demais (Figura 5.20).

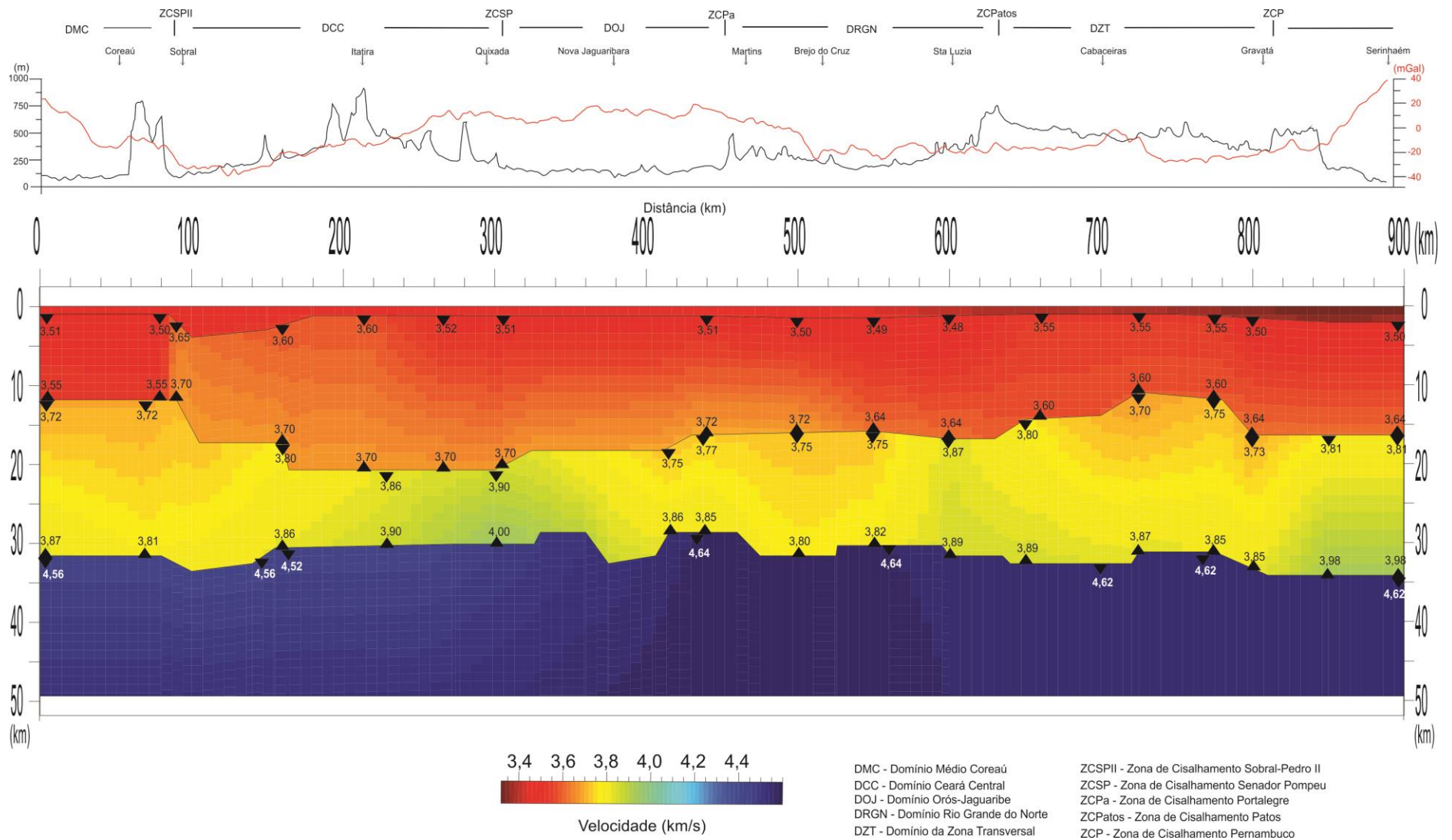


Figura 5.20 - Modelo sísmico de onda S, obtido da linha NW-SE levantada na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.

5.4. Razão de Poisson e modelo Vp/Vs

5.4.1. Modelo Vp/Vs e Razão de Poisson

O modelo Vp/Vs (Figura 5.21) é obtido dividindo o grid de velocidades do modelo de onda P pelo grid de velocidades do modelo de onda S. e com a obtenção desse foi possível a geração de um modelo de razão de Poisson (σ) (Figura 5.22).

A primeira camada mostrou valores de Vp/Vs e σ próximos da média de 1,73 e 0,25, respectivamente. Os valores de Vp/Vs de topo e base variando de 1,71 a 1,73.

A segunda camada apresenta valores de Vp/Vs de topo que variam entre 1,68 e 1,77 e de valores de base entre 1,69 e 1,75. Para σ , a segunda camada, a média encontrada foi de 0,25, os valores menores foram registrados na região do Arco de Santa Quitéria e na Zona Transversal e valores maiores que 0,26 foram observados entre 240 e 290 km.

A terceira camada, que representa a crosta inferior, tem valores de Vp/Vs que variam de 1,69 a 1,77 no topo e de 1,68 a 1,82 na base. O valor médio de razão de Poisson foi de 0,26, com valores menores no Domínio Ceará Central e maiores no Domínio Rio Grande do Norte, nessa camada é possível observar um contraste nas zonas de cisalhamento Portalegre e Patos.

Na interface que representa o manto superior os valores variam de 1,75 a 1,79, sendo que os valores menores são encontrados na parte sudeste da linha e os valores maiores estão registrados na porção noroeste (Figura 5.21). A razão de Poisson, apresenta valor médio de 0,27, menores a sudeste do lineamento Patos e a noroeste do Arco Magmático de Santa Quitéria.

De forma geral a crosta superior ao longo do perfil apresenta composição de félsica a intermediária com exceções bem marcantes representadas pelo domínio Arco de Santa Quitéria e domínio da Zona Transversal, onde o vermelho no modelo (Figura 5.21) traduz crosta superior extremamente félsica (Vp/Vs 1,70), e a oeste da zona de cisalhamento Senador Pompeu, entre os km 240 e 290 da linha, onde a crosta superior apresenta-se localmente com composição máfica, razão de Poisson de 0,27 (azul).

Na crosta inferior sobressai a porção félsica do extremo NW do modelo, principalmente a porção da crosta relacionada ao domínio Ceará central e Orós-Jaguaribe, onde a Vp/Vs chega

a 1,70, e a porção máfica da crosta do domínio Rio Grande do Norte com V_p/V_s de 1,78. Esses domínios são limitados pela zona de cisalhamento Portalegre. Sob a zona transversal a crosta inferior apresenta composição intermediária.

Na crosta inferior e relacionado ao lineamento Patos o modelo apresenta anomalia félsica cujo significado precisa ser melhor entendido.

É digno de nota o fato de que nas áreas de zonas de cisalhamento os valores V_p/V_s e Razão de Poisson mostram mudanças bruscas, em geral acompanhando mudanças bruscas na geometria das camadas.

Em relação ao manto superior pode-se afirmar que existem diferenças entre noroeste e centro-sudeste. A região noroeste apresenta valores de V_p/V_s e razão de Poisson de 1,79 e superiores a 0,28, respectivamente. Na região dos Domínios Orós-Jaguaribe, Domínio Rio Grande do Norte e Domínio da Zona Transversal, os valores estão com V_p/V_s de 1,75 e Razão de Poisson de 0,26(Figura 5.21 e Figura 5.22).

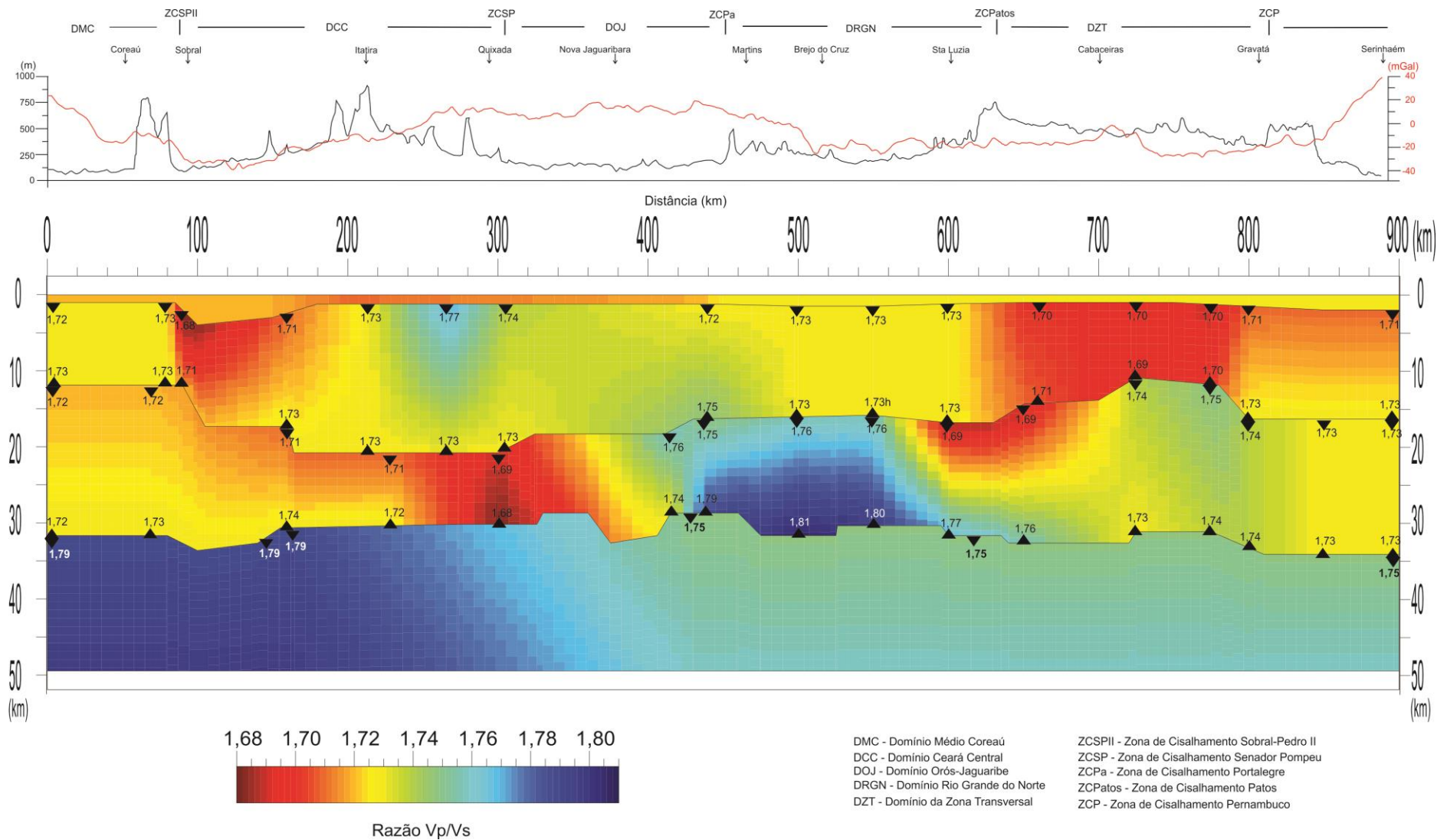


Figura 5.21 – Modelo Vp/Vs da linha NW-SE obtido de dados adquiridos na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.

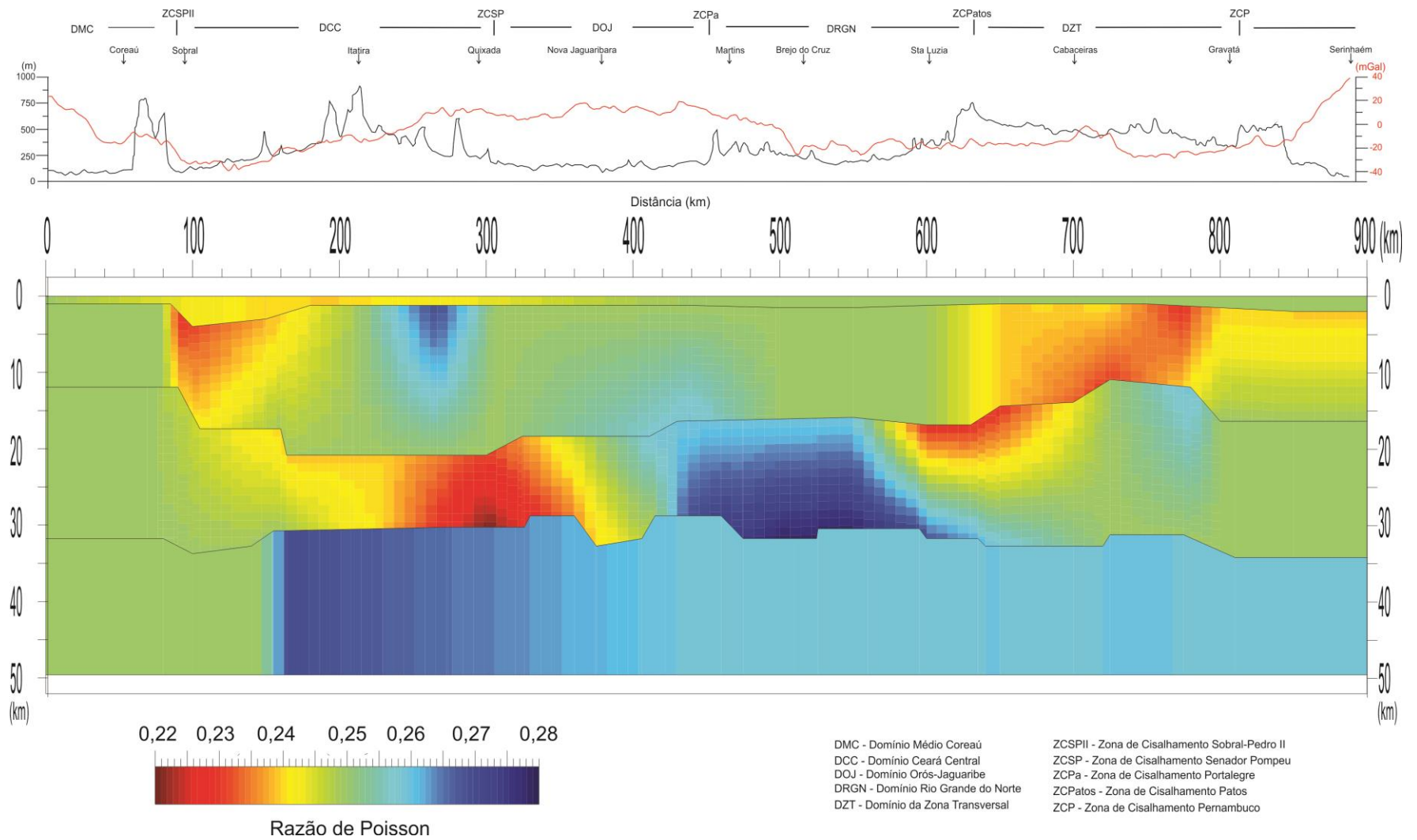


Figura 5.22 — Modelo de Razão de Poisson da linha NW-SE obtido de dados adquiridos na Província Borborema. No perfil acima do modelo, a linha preta é a topografia da região e a linha vermelha é o dado gravimétrico.

5.5. Interpretação

Em um modelo sísmico de refração os domínios geofísicos são caracterizados por variação na geometria das camadas e na distribuição de velocidade das ondas sísmicas (P e S). Em muitos casos, o modelo da razão V_p/V_s ressalta diferenças na estrutura da crosta (campo de velocidade) não perceptível no modelo P ou S isoladamente.

A Figura 5.23 apresenta o resultado da modelagem das ondas P e S para a transecta de refração NW-SE da Província Borborema. De cima para baixo são mostrados o modelo de velocidade P, o modelo de velocidade S e o modelo da razão V_p/V_s .

As porções profundas da crosta sob os tiros extremos da linha não são imageadas pela refração uma vez que não existe cobertura de raio sísmico nessa região. A crosta superior, no entanto, é bem definida pelas fases Pg/Sg. A profundidade da Moho é mal resolvida.

5.5.1. Domínio Médio Coreaú

No extremo NW do perfil (Figura 5.23) a crosta superior do Domínio Médio Coreaú contrasta com a crosta superior do Arco de Santa Quitéria na geometria e razão V_p/V_s de suas rochas. No Médio Coreaú, a crosta superior é mais fina e apresenta V_p/V_s de 1,73 contra 1,70 do Arco de Santa Quitéria. Esse limite coincide em superfície com o Lineamento Sobral-Pedro II, expressão do Lineamento Transbrasiliano na área. Em profundidade, a passagem dos domínios é marcada por degrau na descontinuidade de Moho com a crosta espessando sobre o Arco de Santa Quitéria. O Lineamento Transbrasiliano é interpretado como uma descontinuidade que cruza toda a crosta.

5.5.2. Domínio Ceará Central

O Domínio Ceará Central apresenta descontinuidade forte na crosta, coincidente em superfície com o limite leste da granitogênese do Arco de Santa Quitéria. É um limite geofísico expressivo que o modelo sugere que continua no manto superior. No Arco de Santa Quitéria, a crosta apresenta crosta superior e inferior com espessuras próximas, espessura total

da crosta de 35 km e composição félsica, com a crosta superior com razão V_p/V_s de 1,70 e a crosta inferior 1,73.

A leste do Arco de Santa Quitéria a crosta muda de comportamento apresentando crosta superior aproximadamente duas vezes mais espessa que a inferior e espessura total de 31 km. A anomalia indicando bolsão de rocha máfica na crosta superior é relacionada as rochas anfibolíticas pertencentes a Unidade Algodões-Choró (Martins *et al.*, 2009).

Nesse domínio, que se estende até depois da zona de cisalhamento Senador Pompeu, a crosta apresenta características de crosta retrabalhada por tração (extended crust - Christensen e Mooney, 1995), com provável afinamento da crosta inferior. A Moho é surpreendentemente plana em contraste com os domínios adjacentes. Característica marcante é que, ao contrário do se observa em geral, a crosta inferior é mais félsica (1,70) que a crosta superior (1,73), indicando que a crosta inferior foi submetida a processo de diferenciação, provavelmente resultando no afinamento da crosta como um todo e na descaracterização da zona de cisalhamento Senador Pompeu em profundidade.

5.5.3. Domínio Orós-Jaguaribe

A leste da zona de cisalhamento Senador Pompeu, o domínio Orós-Jaguaribe apresenta crosta estruturada em blocos com espessura variando de 29 a 33 km. Semelhante ao Domínio Ceará Central, e diferente do resto do modelo, a crosta superior do Domínio Orós-Jaguaribe é mais espessa e mais félsica (1,74) que a crosta inferior (1,72). Esse comportamento é limitado pela falha Portalegre, situada imediatamente a leste, marcando o limite do Domínio Orós-Jaguaribe com o Domínio Rio Grande do Norte. A falha Portalegre é interpretada como tendo dimensões crustais e inclinação para NW.

Imediatamente a norte da linha sísmica, no Domínio Orós-Jaguaribe está colocada a bacia cretácea assimétrica do Potiguar, que tem a falha Portalegre como falha mestra.

5.5.4. Domínio Rio Grande do Norte

O Domínio Rio Grande do Norte se estende até a zona de cisalhamento Patos. Nesse domínio as crostas superior e inferior possuem espessuras próximas, com limite suave e razão Vp/Vs diferente dos domínios adjacentes. A crosta superior é félsica com Vp/Vs de 1,73 e a crosta inferior é máfica com Vp chegando a 6,9 km/s (maior velocidade de crosta inferior do perfil) e Vp/Vs de 1,79. É o único domínio com crosta de composição máfica ao longo do perfil.

5.5.5. Domínio Zona Transversal

O domínio da Zona Transversal foi detalhado por Lima (2011) e Lima *et al.* (2014). Se diferencia dos demais domínios por apresentar limite crosta superior-inferior bastante movimentado, com a crosta superior (10-16 km de espessura) mais fina do que a inferior, e por estar relacionado à região de topografia elevada (platô da Borborema) sem que haja uma raiz na base da crosta para compensar o excesso de massa de superfície. O modelo da razão Vp/Vs mostra crosta superior extremamente félsica (1,69) e crosta inferior com composição intermediária (1,74), caracterizando a Zona Transversal como um bloco diferente dos terrenos vizinhos, como sugerido por Lima *et al.* (2014) com base na Vp média da crosta e na geometria das interfaces. A Vp média da crosta é menor sob o Domínio da Zona Transversal.

Na crosta inferior sob o Lineamento Patos, no limite do Domínio Rio Grande do Norte-Zona Transversal, aparece um bolsão de rocha félsica cujo significado ainda precisa ser melhor entendido.

5.5.6. Domínio Pernambuco-Alagoas

No extremo do perfil, o Domínio Pernambuco-Alagoas (Zona Meridional) é caracterizado por crosta superior félsica, com Vp/Vs de 1,73 e espessamento da crosta para 35 km a sul do Lineamento Pernambuco.

Indiferente à variação de domínio tectônico o manto litosférico apresenta velocidade de 8,1 km/s sob a parte central do modelo diminuindo para 7,9 km/s nos extremos. Aparentemente, a diminuição de velocidade reflete a proximidade da litosfera oceânica, com rochas mais novas e mais quentes.

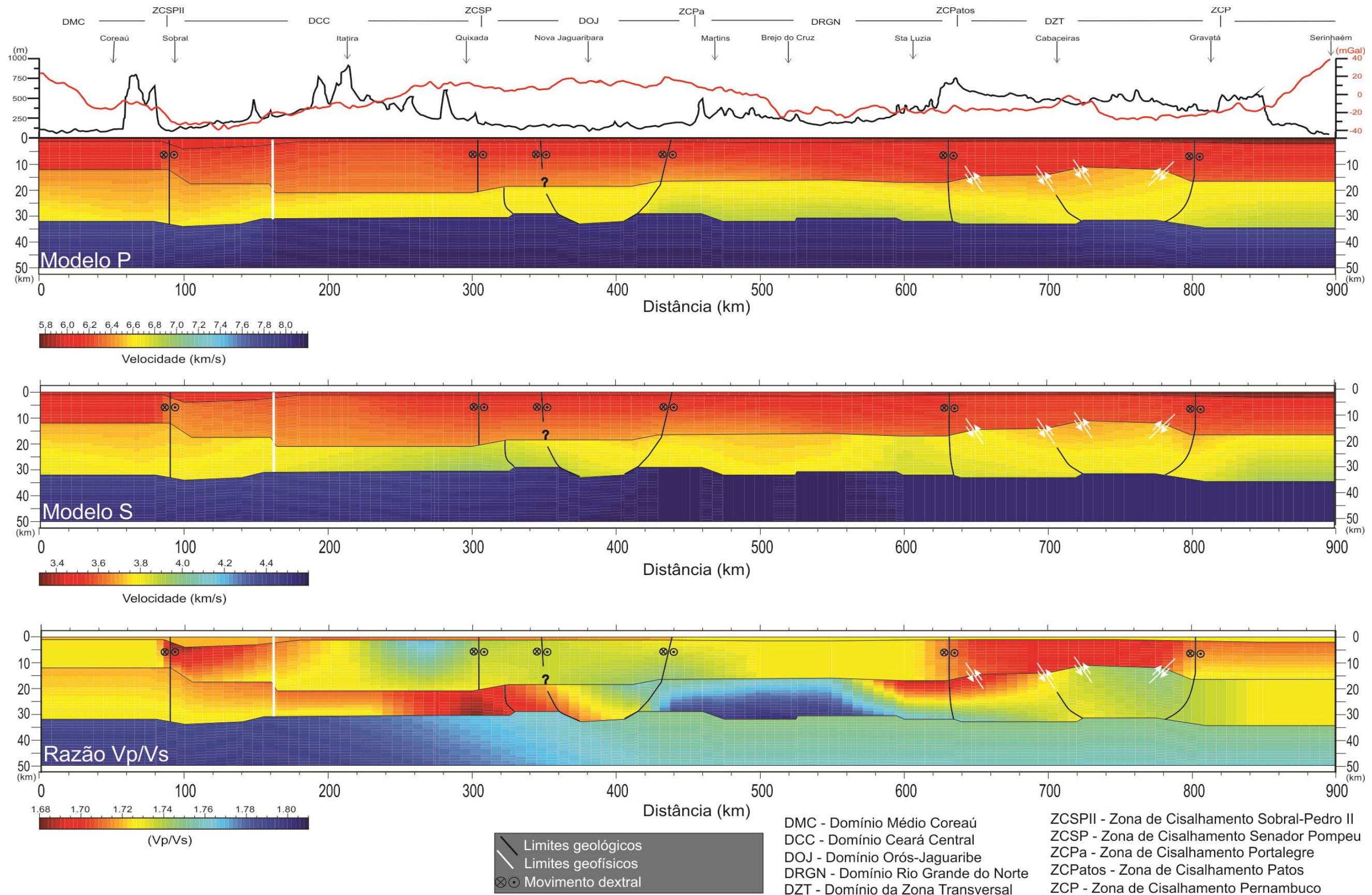


Figura 5.23 – Modelos interpretados. De cima para baixo: Modelo P, Modelo S e Modelo da razão Vp/Vs.

6. Discussão

Ao longo do experimento de refração sísmica profunda realizado entre Granja, Ceará e Serinhaém, Pernambuco, a crosta da Província Borborema é fina, com espessura variando entre 29 e 35 km, e compreendendo duas camadas separadas por descontinuidade de Conrad bem marcada. Essas características contrastam com as crostas neoproterozóicas tradicionais, nas quais são registradas três camadas e espessuras acima de 40 km (Soares *et al.*, 2006).

As características sísmicas registradas pelo experimento de refração sísmica profunda sugerem que a crosta da Província Borborema foi submetida a processo expressivo de tração, provavelmente relacionado à implantação do Oceano Atlântico no Cretáceo.

Durante o processo de estiramento litosférico a crosta da subprovíncia norte da Província Borborema sofreu descolamento ao longo da Zona de Cisalhamento Portalegre, gerando rifteamento assimétrico representado pela Falha Carnaubeiras e condicionando a implantação da Bacia Potiguar.

A oeste da Zona de Cisalhamento Portalegre o estiramento afetou a crosta de forma diferenciada, retrabalhando significativamente a crosta do Domínio Orós-Jaguaribe e da porção sudeste do Domínio Ceará Central até o limite do Arco de Santa Quitéria. Aparentemente, nessas áreas a crosta foi submetida a calor anômalo, favorecendo seu estiramento e afinamento. No Arco de Santa Quitéria e a oeste a crosta apresenta-se relativamente indeformada, apesar de mostrar composição félsica e de ter sido afinada para espessura em torno de 33-35 km.

A leste da Zona de Cisalhamento Portalegre, apesar de fina, a crosta parece ter sido preservada do estiramento. Sob a Zona Transversal que, na área do perfil de refração sísmica profunda está relacionada ao Platô da Borborema, Lima *et al.* (2014) sugerem possível delaminação da porção máfica-ultramáfica da crosta inferior, com consequente soerguimento do platô. Na região do platô a V_p média da crosta é menor que a dos terrenos vizinhos, o limite crosta superior-inferior se apresenta soerguido e é registrada falta de raiz na base da crosta. Além disso, a razão V_p/V_s acusa composição félsica para a crosta da Zona Transversal.

7. Conclusões

Os modelos da razão V_p/V_s e da razão de Poisson são importantes no estudo da crosta continental. Esses modelos contribuem tanto para o mapeamento crustal, diferenciando terrenos não discriminados pelos modelos de velocidades P e/ou S separadamente, como na determinação da composição das rochas que compõem a crosta, contribuindo para a identificação de possíveis transformações nas rochas da crosta inferior.

O conjunto de características reveladas pelo experimento de refração sísmica profunda entre Granja e Serinhaém indica que a crosta sob a Província Borborema foi submetida, no Cretáceo, a importante processo extensional que conduziu ao seu estiramento e afinamento e consequente retrabalhamento na sua porção basal. Nesse processo, o componente máfico-ultramáfico da crosta inferior, Zona Transversal, pode ter sido removido por delaminação e retrabalhamento da litosfera, fenômeno que provavelmente está ligado à ruptura de Pangea, implantação do Oceano Atlântico e separação América do Sul e África.

Nesse processo a Zona de Cisalhamento Portalegre assumiu papel de superfície de descolamento, delimitando e controlando os padrões de deformação das rochas da crosta situadas a noroeste e sudeste da Zona de Cisalhamento.

8. Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. de; FUCK, R. A. **1977**. Províncias estruturais brasileiras. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, Campina Grande, Atas Campina Grande: SBG, p.363-391.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., NEVES, B. B. B., FUCK, R. A. **1981**. *Brazilian structural provinces: an introduction*. Earth Sciences Reviews, 17: 1-29.
- ARTHAUD, M. H., CABY, R., FUCK, R. A., DANTAS, E. L., PARENTE, C. V. **2008**. Geology of the northern Borborema Province and its correlations with Nigeria, NW Africa. In Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Witt, M.J. *West Gondwana, Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294, 49-67.
- BERROCAL, J., MARANGONIY., SÁ, N. C., FUCK, R. A., SOARES, J. E. P., DANTAS, E.L., PEROSI, F., FERNANDES, C. **2004**. *Deep seismic refraction and gravity crustal model and tectonic deformation in Tocantins Province, central Brazil*. Tectonophysics, 388: 187-199.
- BRITO NEVES, B. B., SANTOS, E. J., VAN SCHMUS, W. R. **2000**. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. In Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31 International Geological Congress, p.151-182.
- BRITO NEVES, B. B., VAN SCHMUS, W. R., KOZUCH, M., SANTOS, E. J., PETRONILHO, L. **2005**. *A Zona Tectônica Teixeira-Terra Nova - ZTTN - fundamentos da geologia regional e isotópica*. Revista do Instituto de Geociências - USP 5(1), 57-80.
- CAMPELO, R. C. **1999**. Análise de Terrenos na Porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil: Integração de dados geológicos e gravimétricos. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Dissertação de Mestrado.
- CERVENY, V. **2001**. Seismic ray theory. Cambridge University Press.
- CHRISTENSEN, N. I. **1996**. *Poisson's ratio and crustal seismology*. Journal of Geophysical Research, 101-B2: 3139-3156.
- CHRISTENSEN, N.I. & MOONEY, W.D. **1995**. *Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view*. Journal of Geophysical Research, 100-B7: 9761-9788.
- DANTAS, E. L.; HACKSPACHER, P. C., VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B. **1998**. *Archean accretion in the São José do Campestre Massif, northeastern Brazil*. Revista Brasileira de Geociências, 28(2): 221-228.
- DANTAS, E. L., VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B., FETTER, A. H., CORDANI, U. G., NUTMAN, A., WILLIAMS, I. S. **2004**. *The 3.4-3.5 GA São José do Campestre Massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America*. Precambrian Research 130(1), 113-137.

DELGADO, I. M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L. C.; SILVEIRA FILHO, N. C.; SANTOS, R. A.; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T.; ANGELIM, L. A.; VASCONSCÉLOS, A. M.; GOMES, I. P.; LACERDA FILHO, J. V., VALENTE, C. R.; PERROTA, M. M. & HEINICK, C. A. **2003**. Província Tocantins. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J. H. (Ed.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Rio de Janeiro: CPRM, 2003. p.281-292.

FETTER, A. H., SANTOS, T. J. S., VAN SCHMUS, W. R., HACKSPACHER, P. C., BRITO NEVES, B. B., ARTHAUD, M. H., NOGUEIRA NETO, J. A., WERNICK, E. **2003**. *Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of West Gondwana*. *Gondwana Research* 6, 265–273.

FETTER, A. H., VAN SCHMUS, W. R., SANTOS, T. J. S., NOGUEIRA NETO, J. A., ARTHAUD, M. H. **2000**. *U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic Supercontinent "Atlantica"*. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 102–106.

GREEN, R. **1974**. *The seismic refraction method - a review*. *Geoexploratioin*, 12, 259-284.

JARDIM DE SÁ, E. F. **1994**. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado na cadeia brasileira/pan-africana*. Brasília, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 804p.

LIMA, M. V. A. G. *Emprego do método de refração sísmica profunda para a determinação da estrutura crustal da Zona Transversal da Província Borborema, Nordeste do Brasil*. **2011**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado.

LIMA, M. V. A. G.; BERROCAL, J.; SOARES, J. E. P.; FUCK, R. A. **2014**. Deep seismic refraction experiment in northeast Brazil: New constraints for Boborema Province evolution. *Journal of South America Earth Science*. Artigo submetido.

LOWRY, A. R., PEREZ-GUSSINYÉ, M. **2011**. *The role of crustal quartz in controlling Cordilleran deformation*. *Nature*, 471. p. 353-359. doi:10.1038/nature09912.

MARTINS, G., OLIVEIRA, E. P., LAFON, J. M. **2009**. *The Algodões amphibolite-tonalite gneiss sequence, Borborema Province, NE Brazil: Geochemical and geochronological evidence for Palaeoproterozoic accretion of oceanic plateau/back-arc basalts and adakitic plutons*. *Gondwana Research* 15, 71-85.

MELO, S. S. V. **2006**. *Razão de Poisson da crosta superior da região de Porangatu, Goiás, Província Tocantins: um estudo por refração sísmica*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília. Dissertação de Mestrado nº203.

- MUSACCHIO, G., MOONEY, W. D., LUETGERT, J. H. e CHRISTENSEN, N. I. **1997**. *Composition of the crust in the Grenville and Appalachian provinces of North America inferred from Vp/Vs ratios*. Journal of Geophysical Research, 102-B7, 15225-15241.
- OLIVEIRA R. G. **2008**. *Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)*. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Tese de Doutorado, 415 p.
- PARENTE, C. V & ARTHAUD, M. **1995**. *O sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, 25: 21-32.
- RODRIGUES, S. W. O. e BRITO NEVES, B. B. **2008**. *Padrões isotópicos Sm-Nd no limite entre os terrenos Alto Pajeú e Alto Moxotó (PB)*. Revista Brasileira de Geociências. 38(1),209-225.
- SÁ, J. M., BERTRAND, J. M., LETERRIER, J., MACEDO, M. H. F. **2002**. *Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil*. Journal of South American Earth Sciences 14, 851–866.
- SÁ, J. M., MCREATH, I., LETERRIER, J. **1995**. *Petrology, geochemistry and geodynamic setting of Proterozoic igneous suites of Orós fold belt (Borborema Province, Northeast Brazil)*. Journal of South American Earth Sciences 8, 299-314.
- SANTOS, E. J., VAN SCHMUS, W. R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B. B. **2010**. *The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil*. Journal of South American Earth Sciences 29, 61-76.
- SANTOS, T. J. S., FETTER, A.H., NOGUEIRA NETO, J. A. **2008**. In Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Witt, M.J. *West Gondwana, Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294, pp.101-119.
- SCHOBENHAUSC. & BRITO NEVES B. B. **2003**. *A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana*. In: L.A. Bizzi, R.M. Vidotti e J.H. Gonçalves (eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 5-54.
- SOARES, J. E. P, **2005**. *Estudos de refração sísmica profunda, função do receptor e gravimetria na Província Tocantins, Brasil Central*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília. Tese de Doutorado.
- SOARES, J. E. P., BERROCAL, J., FUCK, R. A., MOONEY, W. D. & VENTURA, D. B. R. **2006**. *Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: A deep seismic refraction study*. Journal of Geophysical Research, 111: 1-31.
- SOUZA, Z S., MARTIN, H., PEUCAT, J. J., JARDIM DE SÁ, E. F., MACEDO, M. H. **2007**. *Calc-alkaline magmatism at the Archean-Proterozoic transition: Caicó complex basement (NE Brazil)*. Journal of Petrology 48, 2149-2185.
- TAPLEY, W. C., TULL, J. E. **1991**. SAC – Seismic Analysis Code. Lawrence Livermore National Laboratory, CA, 423p.

- VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B., HACKSPACHER, P. C., BABINSKI, M. **1995**. *U-Pb and Sm-Nd geochronological studies of the eastern Borborema Province, northeastern Brazil: initial conclusions*. Journal of South American Earth Sciences 8 (3-4), 267-288.
- VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B., WILLIAMS, I. S., HACKSPACHER, P. C., FETTER, A. H., DANTAS, E. L., BABINSKI, M. **2003**. *The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in Western Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd residence (TDM) ages*. Precambrian Research 127, 287-327.
- VAN SCHMUS, W. R., OLIVEIRA, E.P., SILVA FILHO, A. F., TOTEU, S. F., PENAYE, J., GUIMARÃES, I. P. **2008**. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Witt, M.J. *West Gondwana, Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294, pp.69-99.
- VAN SCHMUS, W. R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B. B. **2011**. *Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province*. Journal of South American Earth Sciences 31, 227-252.
- VENTURA, D. B. R. **2010**. *Parâmetros Elásticos da crosta sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu, GO*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília. Dissertação de Mestrado
- ZANDT, G. & C.J. AMMON. **1995**. *Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio*. Nature 374, 152-154.
- ZELT, C. A. & ELLIS, R. M. **1988**. *Practical and efficient ray tracing in two-dimensional media for rapid traveltimes and amplitude forward modelling*. Canadian Journal of Exploration Geophysics. Vol. 24, No.1. P. 16-31.
- ZELT, C.A. & SMITH, R.B. **1992**. *Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure*. Geophysical Journal International, 108: 16-34.

9. Apêndices

9.1. Apêndice A

Tiro	Lat	Long	Cidade
1	-3,2067	-40,9799	Granja/CE
2	-3,5813	-40,53	Coreaú/CE
3	-3,8133	-40,3367	Forquilha/CE
4	-4,1416	-39,9738	Taperuaba/CE
5	-4,5323	-39,6009	Itatira/CE
6	-4,8111	-39,2577	Choró/CE
7	-5,0118	-38,9974	Quixadá/CE
8	-5,3763	-38,642	Jaguaretama/CE
9	-5,6467	-38,3138	Alto Santo/CE
10	-5,9563	-38,0149	Tabuleiro Grande/RN
11	-6,2643	-37,6831	Catolé do Rocha/PB
12	-6,5527	-37,3352	Serra Grande do Norte/RN
13	-6,896	-37,0045	Santa Luzia/PB
14	-7,188	-36,6791	Santo André/PB
15	-7,4828	-36,3348	Cabaceiras/PB
16	-7,8031	-36,0163	Vertentes/PE
17	-8,0919	-35,675	Cumaru/PE
18	-8,3975	-35,3388	
19	-8,6098	-35,1042	Serinhaém/PE