



**UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**MODELAGEM SÍSMICA DE ONDAS S E IMAGEAMENTO  $V_p/V_s$  DA  
CROSTA SOB O PERFIL SÍSMICO NW-SE DO SE DO BRASIL: NE  
BACIA DO PARANÁ, FAIXA BRASÍLIA MERIDIONAL E FAIXA RIBEIRA CENTRAL**

Dissertação de Mestrado nº 128

**Camila Hanna Sampaio Prates Simões**

Brasília – DF

2018



**UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**MODELAGEM SÍSMICA DE ONDAS S E IMAGEAMENTO  $V_p/V_s$  DA  
CROSTA SOB O PERFIL SÍSMICO NW-SE DO SE DO BRASIL: NE  
BACIA DO PARANÁ, FAIXA BRASÍLIA MERIDIONAL E FAIXA RIBEIRA CENTRAL**

**Orientador:**

Prof. Dr. José Eduardo Pereira Soares – UnB

**Examinadores:**

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima – UNIPAMPA

Prof. Dr. Elder Yokoyama – UnB

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges – UnB (suplente)

Brasília – DF

2018

## SUMÁRIO

Lista de Figuras	II
Lista de Siglas e Abreviaturas	V
Agradecimentos	VI
Abstract	VII
Resumo	IX
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>11</b>
<hr/>	
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA .....	11
1.2 OBJETIVOS .....	13
1.3 JUSTIFICATIVA .....	13
1.4 TRABALHOS ANTERIORES .....	14
1.5 ESTADO DA ARTE .....	16
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
1.7 BANCO DE DADOS .....	18
1.7 REFERÊNCIAS .....	22
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>24</b>
<hr/>	
<i>Modelagem sísmica de ondas S e imageamento Vp/Vs da crosta e manto litosférico sob o perfil sísmico PABBRISE, SE do Brasil: NE Bacia do Paraná, Faixa Brasília Meridional e Faixa Ribeira Central.</i>	
ABSTRACT .....	25
RESUMO.....	24
2.1 INTRODUÇÃO.....	26
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO .....	28
2.3 EXPERIMENTO WARR .....	30
2.4 PROCESSAMENTO E QUALIDADE DOS DADOS .....	30
2.5 MODELAGEM E RESULTADOS .....	31
MODELO Vs.....	37
MODELO VP/Vs.....	38
2.6 DISCUSSÃO .....	39
DOMÍNIO I.....	41
DOMÍNIO II .....	41
DOMÍNIO III.....	43
2.7 CONCLUSÃO .....	44
2.8 REFERÊNCIAS .....	45
<b>ANEXO 1</b>	<b>49</b>
<hr/>	

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1

---

**Figura 1.1** – Mapa de relevo com a localização do perfil sísmico PABBRISE. As estrelas representam os pontos de tiro (PT) e os círculos azuis representam as estações de registro do experimento. O mapa inserido (canto inferior esquerdo) revela a localização do experimento no contexto do território brasileiro. Retirado de (Bernardes, 2015).\_\_\_\_\_12

**Figura 1.2** – Modelo de velocidade de ondas P para o perfil sísmico PABBRISE. Proposto por Bernardes (2015).\_\_\_\_\_14

**Figura 1.3** – Perfil de traços de função do receptor da componente radial empilhados. O tracejado laranja corresponde a fase da Bacia do Paraná. Tracejado azul marinho é o alinhamento de fases múltiplas da bacia. Círculos vermelhos correspondem a fase Ps (Moho). Círculos verdes correspondem a alinhamentos de fases bem definidas abaixo da Moho. Tracejados em roxo correspondem a alinhamentos de possíveis descontinuidades existentes na crosta e no manto. O tracejado azul corresponde ao *underplating* também detectado por Bernardes (2015). Retirado de Peixoto (2015).\_\_\_\_\_15

**Figura 1.4** – Modelo 2D de resistividade obtido pela inversão do modo TE do tensor de impedância MT até a profundidade do *skin depth* máximo. Os traços pretos representam a profundidade máxima de investigação dos dados pela transformada de Niblett-Bostick. Retirado de Minei (2015).\_\_\_\_\_16

**Figura 1.5** – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-01, PT-04 e PT-07. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.\_\_\_\_\_19

**Figura 1.6** – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-08, PT-09 e PT-10. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.\_\_\_\_\_20

**Figura 1.7** – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-11, PT-13 e PT-15. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.\_\_\_\_\_21

### Capítulo 2

---

**Figura 2.1** – Mapa tectônico simplificado da região em estudo (modificado de Heilbron *et al.*, 2004; Perrotta *et al.*, 2005; Peternel *et al.*, 2005 e Trouw *et al.*, 2013). Na legenda: 1 – Bacias cenozóicas do tipo rifte; 2 – Plútons alcalinos do Cretáceo Superior/Cenozóico; Bacia do Paraná; 3 – Grupo Bauru (Cretáceo Superior); 4 – Formação Serra Geral (Cretáceo Inferior);

5 – Rochas pré-vulcânicas (Mesozóico/Paleozóico); 6 – Terreno Oriental (Arco Rio Negro); 7 – Terreno Apiaí-São Roque; 8 – Terreno Embu-Paraíba do Sul; 9 – *Nappe* Socorro-Guaxupé; 10 – Sistema de nappes Andrelândia, *Nappe* Passos e *Klippe* Carrancas; Cráton do São Francisco e seu antepaís; 11 – Cobertura (Grupo Bambuí); 12 – Cráton do São Francisco. LTC – Limite Tectônico Central (sutura). A linha tracejada em branco representa a influência da frente de deformação da Faixa Ribeira (segundo Trouw *et al.*, 2013). Estrelas representam os pontos de tiro, PT, (01–11, 13 e 15) e círculos azuis representam as estações receptoras do perfil PABBRISE. Círculos brancos destacam a localização de algumas cidades do Estado de São Paulo. Retirado de Bernardes (2015). \_\_\_\_\_ **27**

**Figura 2.2** – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-01, PT-07 e PT-15. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s. \_\_\_\_\_ **32**

**Figura 2.3** – Modelagem direta para as fases Sg e Sb. Acima: ajuste obtido para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); velocidade de redução de 4,62 km/s. Abaixo: diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **34**

**Figura 2.4** – Modelagem direta para as fases SmS e Sn. Acima: ajuste obtido para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); velocidade de redução de 5,78 km/s. Abaixo: diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **35**

**Figura 2.5** – Modelos de velocidade e Imageamento Vp/Vs para o perfil sísmico. a) Perfil topográfico; b) Modelo de velocidade S; c) Modelo de velocidade P e d) Imageamento Vp/Vs. \_\_\_\_\_ **36**

**Figura 2.6** – Imageamento Vp/Vs interpretado. Acima: perfil topográfico. Abaixo: Domínio I (0 – 170 km) intrusões máficas na crosta e manto robusto/denso; Domínio II (170 – 525 km) crosta superior preservada com sutil aumento da Vp/Vs no final do domínio sugerindo correlação com a *Nappe* Socorro, *underplating* máfico na base da crosta inferior, manto transicional; Domínio III (525 – 700 km) crosta superior félsica indica granitogênese, crosta inferior hidratada e manto quente/menos competente. \_\_\_\_\_ **40**

## **ANEXO 1**

---

**Figura 1** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-01 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **50**

**Figura 2** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-04 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de

trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **51**

**Figura 3** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-07 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **52**

**Figura 4** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-08 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **53**

**Figura 5** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-09 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **54**

**Figura 6** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-10 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **55**

**Figura 7** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-11 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **56**

**Figura 8** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-13 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **57**

**Figura 9** – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-15 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido. \_\_\_\_\_ **58**

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

UnB – Universidade de Brasília

IG – Instituto de Geociências

LabLitos – Laboratório de Estudos da Litosfera

IAG-USP – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo

PABBRISE – PARaná Basin, Brasília and RIBEIRA belts Seismic Experiment

IFREMER – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

INCT-ET – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Estudos Tectônicos

BP – British Petroleum

SanBa – Santos Basin

WARR – Wide Angle Reflection-Refraction

PT – Ponto de tiro

MT – Magnetotelúrico

V<sub>p</sub> – Velocidade da onda P

V<sub>s</sub> – Velocidade da onda S

V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> – Razão V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub>

S<sub>sed</sub> – Refração da onda S na bacia

S<sub>g</sub> – Refração da onda S na crosta superior / S granítica

S<sub>b</sub> – Refração da onda S na crosta inferior

S<sub>n</sub> – Refração da S no manto superior

SmS – Reflexão na descontinuidade de Mohorovicic

RMS – *root mean square*

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências (IG) pela oportunidade, bem como professores e servidores.

Ao meu orientador Prof. Soares, pela experiência e oportunidade de trabalhar com dados tão especiais no LabLitos/UnB e por todo apoio e conhecimentos dedicados durante esses anos. Gratidão!

Aos colegas do LabLitos/UnB pelo suporte e camaradagem. Em especial ao colega Renato Bernardes pela cooperação e discussões geológicas.

À Petrobras pelo financiamento do projeto de pesquisa “Estudo da Transição da Crosta Continental-Crosta Oceânica na Região Sudeste do Brasil: Experimentos de Refração Sísmica Profunda e Magnetotelúrico e Estudos Geológicos na Faixa Ribeira e Bacia do Paraná - Transecta Refração (PETROBRAS/UnB – 2012/05132).”

*Camila Prates*

## ABSTRACT

SIMÕES, C. H. S. P. 2018. **Seismic modeling of S waves and Vp/Vs imaging of the crust beneath the seismic profile NW-SE of the SE of Brazil: NE Paraná Basin, Southern Brasília Belt and Ribeira Central Belt.** Dissertation (M.Sc. in Applied Geosciences) – Institute of Geosciences, University of Brasilia, Brasilia. 60 p.

The PABBRISE profile (PARaná Basin, BRasília and RIbeira belts Seismic Experiment) consists of a wide-angle reflection and refraction experiment carried out in the State of São Paulo, as part of the project continental to ocean crustal transition in southeastern Brazil: deep seismic refraction, magnetotelluric and geological studies in the Ribeira Belt and Paraná Basin (PETROBRAS/UnB/Finatec-2012). The profile has about 700 km of extension in NW-SE direction crossing the northeastern portion of the Paraná Basin, passing through the Southern Brasília and Central Ribeira Belts. The Vp/Vs image of the crust and upper mantle under the profile was obtained from the modeling of the P and S wave velocity fields separately. This ratio is a dimensionless particularly sensitive to the silica content of the rocks, but also to the presence of fluids and to the anisotropy. The Vp/Vs image differentiated the upper crust in three domains: in the northwest portion of the profile, values of Vp/Vs higher than 1.80 show that the crust was modified by mafic intrusions, possibly related to the magmatism Serra Geral in the Cretaceous; the central region of the profile presents values of Vp/Vs of intermediate to felsic composition, interpreted as Precambrian upper crust that was preserved or little modified; at the southeast end of the profile the Vp/Vs ratio is less than 1.70, indicating felsic crust, probably related to the Neoproterozoic-Cambrian granite genesis identified in surface. The lower crust shows values of Vp/Vs in general larger than 1.80, but with different meanings along the profile: in the northwest portion, the high values of Vp/Vs are associated with the mafic intrusions, also identified in the upper crust; in the central domain, with the mafic underplate suggested by the P modeling; and in the southeast portion, the Vp/Vs of 1.80 is associated with low P wave velocity (6.48 – 6.65 km/s) suggesting the presence of interstitial fluids. The lithospheric mantle presents two distinct domains characterized by high Vp (8.3 km/s) and Vp/Vs ratio of 1.80 under the basin and low Vp and Vp/Vs ratio of 1.70 outside the basin, close to the coast. It means a denser and more robust mantle under the basin than outside of it. In general, the results suggest that the lithosphere under the profile was modified since the Neoproterozoic, first with the implantation of the

Paraná Basin in the Paleozoic and later with the implantation of the South Atlantic Ocean in the Mesozoic.

## RESUMO

SIMÕES, C. H. S. P. 2018. **Modelagem sísmica de ondas S e imageamento Vp/Vs da crosta sob o perfil sísmico NW-SE do SE do Brasil: NE Bacia do Paraná, Faixa Brasília Meridional e Faixa Ribeira Central.** Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade Brasília, Brasília. 60 p.

O perfil PABBRISE (**PARaná Basin, Brasília and RIbeira belts Seismic Experiment**) consiste no experimento sísmico de refração e reflexão de ângulo amplo realizado no Estado de São Paulo, cruzando a porção nordeste da Bacia do Paraná, passando pela Faixa Brasília meridional e Faixa Ribeira central. Possui cerca de 700 km de extensão, com orientação NW-SE. Os dados foram obtidos no âmbito do projeto de pesquisa “Estudo da Transição da Crosta Continental-Crosta Oceânica na Região Sudeste do Brasil: Experimentos de Refração Sísmica Profunda e Magnetotelúrico e Estudos Geológicos na Faixa Ribeira e Bacia do Paraná (PETROBRAS/UnB/Finatec–2012). A razão Vp/Vs da crosta e manto superior sob o perfil PABBRISE foi obtida a partir da modelagem do campo de velocidade das ondas P e S. Essa razão é uma medida adimensional particularmente sensível ao conteúdo de sílica das rochas, mas sensível também à presença de fluidos e à anisotropia, ressaltando variações não observadas com o imageamento Vp ou Vs separadamente. O imageamento Vp/Vs diferenciou a crosta superior em três domínios: na porção noroeste do perfil, os valores de Vp/Vs superiores a 1,80 mostram que a crosta foi modificada por intrusões máficas, possivelmente relacionadas ao magmatismo Serra Geral no Cretáceo; a região central do perfil apresenta valores de Vp/Vs de composição intermediária a félsica, interpretada como crosta superior Precambriana preservada ou pouco modificada; na extremidade sudeste do perfil, a razão Vp/Vs é inferior a 1,70, indicando crosta félsica, provavelmente relacionada à granitogênese cambriano-neoproterozoica identificada na superfície. A crosta inferior mostra valores de Vp/Vs em geral maiores que 1,80, mas com significados diferentes ao longo do perfil: na porção noroeste, os valores elevados de Vp/Vs estão associados às intrusões máficas, também identificadas na crosta superior; no domínio central, o *underplating* máfico sugerido pela modelagem P é confirmado no imageamento Vp/Vs; na porção sudeste, a Vp/Vs de 1,80 associada à baixa velocidade da onda P (6,48 - 6,65 km/s) sugere a presença de fluidos intersticiais. O manto litosférico apresenta dois domínios distintos, caracterizados por alta Vp (8,3 km/s) e razão Vp/Vs de 1,80 sob a bacia e baixa Vp (~ 7,9 km/s) e Vp/Vs de 1,70 fora da bacia, perto da costa. Isso significa um manto mais denso e competente sob a bacia do que

fora dela. Em geral, os resultados sugerem que a litosfera sob o perfil foi modificada desde o Neoproterozóico, primeiro com a implantação da Bacia do Paraná no Paleozóico e posteriormente com a implantação do Oceano Atlântico Sul no Mesozóico.

# CAPÍTULO 1

## Introdução

### 1.1 Contexto da Pesquisa

Para entender a origem e evolução da litosfera continental é preciso conhecer a estruturação e composição atual da crosta e do manto litosférico, bem como compreender os processos geodinâmicos envolvidos na sua evolução. Boa parte do conhecimento disponível sobre as propriedades físicas da crosta continental é proveniente de métodos sísmicos, que contribuem substancialmente para o entendimento da estrutura, composição e evolução da litosfera (Rudnick & Fountain, 1995; Lima, 2011).

O método de refração sísmica é uma ferramenta robusta, que fornece a distribuição de velocidade das ondas sísmicas (P e S) no meio e o posicionamento das principais descontinuidades em profundidade (Christensen & Mooney, 1995; Bernardes, 2015).

No Brasil, o primeiro experimento de refração sísmica para estudos litosféricos com fonte controlada foi realizado em 1998 na Província Tocantins, Brasil Central, pelo IAG-USP e IG-UnB (Berrocal *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2006). A partir da experiência bem sucedida na Província Tocantins, conjugada ao subsídio fornecido por parcerias (INCT-ET, Petrobrás, Ifremer, BP), outros projetos foram implementados em áreas de interesse tectônico no Brasil na última década.

No ano de 2013, o LabLitos do IG/UnB realizou a aquisição de dados do perfil sísmico PABBRISE (**PA**raná **B**asin**Br**asília-**RI**beira belt **S**eismic **E**xperiment), um levantamento de refração sísmica profunda realizado na porção nordeste da Bacia do Paraná, passando pela Faixa Brasília meridional e Faixa Ribeira central, no Estado de São Paulo.

O perfil PABBRISE é a continuação *onshore* do perfil de refração sísmica *offshore* realizado pelo INFREMER para o projeto SanBa (Evain *et al.*, 2015). Possui cerca de 700 km de extensão, com orientação NW-SE (Figura 1.1).

Os dados foram obtidos no âmbito do projeto de pesquisa “Estudo da Transição da Crosta Continental-Crosta Oceânica na Região Sudeste do Brasil: Experimentos de Refração Sísmica Profunda e Magnetotelúrico e Estudos Geológicos na Faixa Ribeira e Bacia do Paraná (PETROBRAS/UnB – 2012/05132)”.

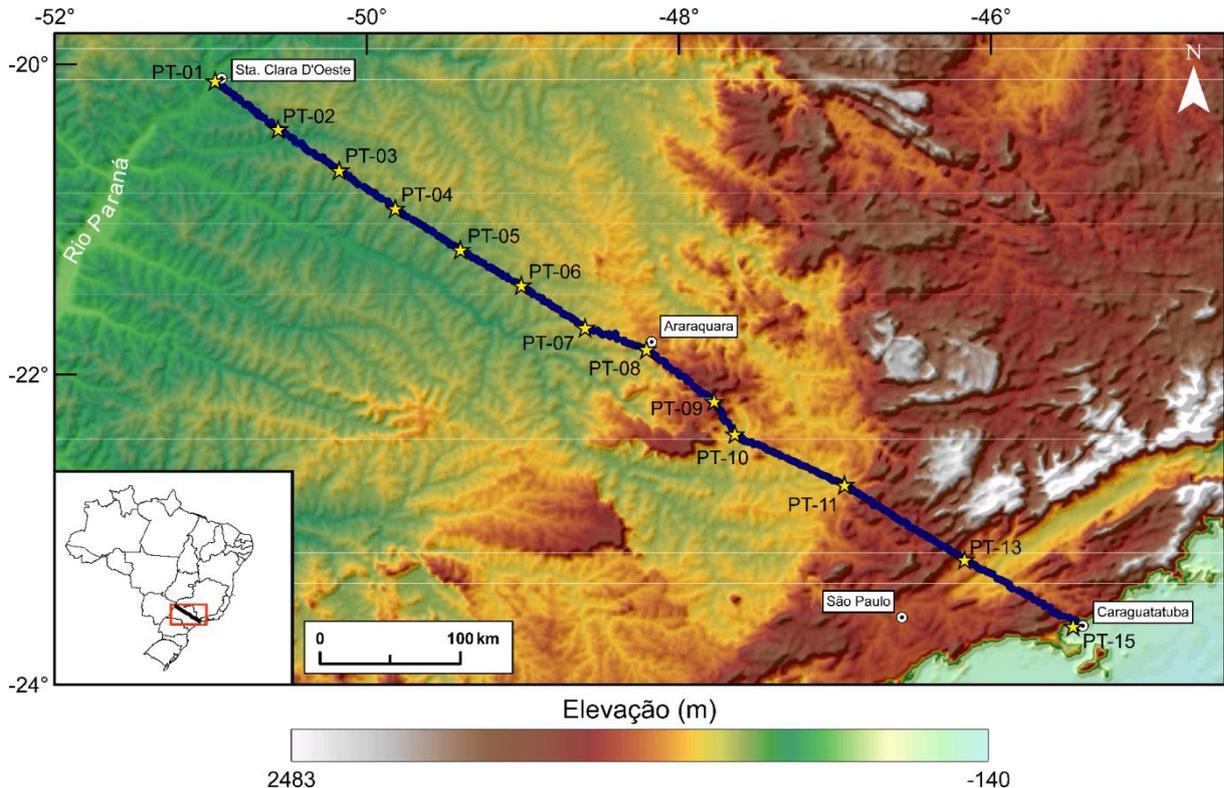


Figura 1.1 – Mapa de relevo com a localização do perfil sísmico PABBRISE. As estrelas representam os pontos de tiro (PT) e os círculos azuis representam as estações de registro do experimento. O mapa inserido (canto inferior esquerdo) revela a localização do experimento no contexto do território brasileiro. Retirado de (Bernardes, 2015).

Este trabalho apresenta a modelagem do campo de velocidades da onda S e as razões  $V_p/V_s$  para as camadas da crosta e manto litosférico para a região atravessada pelo perfil PABBRISE. A razão entre a velocidade da onda P e a velocidade da onda S é uma medida adimensional que fornece informações importantes sobre a litosfera, pois ressalta variações no meio que não são observadas com o imageamento  $V_p$  e/ou  $V_s$  isoladamente (Musacchio, *et al.*, 1997; Zandt & Ammon, 1995).

A razão  $V_p/V_s$  é influenciada pela composição, anisotropia e pressão de poro/fluido. Em termos de composição é sensível ao conteúdo de sílica das rochas, de modo que é possível classificá-las como félsicas, intermediárias ou máficas. Holbrook, *et al.*, (1992), estimaram valores de  $V_p/V_s$  para diferentes tipos de rochas e encontrou valores de 1,71 para granitos (félsicos) e 1,84 para gabros (máfico).

Se houver anisotropia no meio, como por exemplo, a foliação na rocha, pode ser observada variações relevantes na velocidade das ondas sísmicas a depender da orientação de propagação com relação ao plano de foliação. A pressão de poro por sua vez, tem um efeito maior na velocidade das ondas S do que nas ondas P, de modo que uma elevada pressão de

poro diminui  $V_s$  muito mais do que  $V_p$ , o que gera uma  $V_p/V_s$  elevada com  $V_p$  baixa (Christensen, 1995; Musacchio, *et al.*, 1997; Mjelde, *et al.*, 2003).

A razão  $V_p/V_s$  correlaciona-se matematicamente sem nenhuma ambigüidade com a Razão de Poisson. De modo geral, pode ser obtida por meio de estudos com amostras de rochas e minerais em laboratórios ou com experimentos sísmicos e sismológicos (Holbrook *et al.*, 1992). Em termos de métodos sísmicos, com a modelagem do campo de velocidades das ondas P e S, é possível obter a razão  $V_p/V_s$  para um modelo de camadas. Com dados sismológicos (função do receptor) obtemos uma  $V_p/V_s$  média para a crosta.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho propõe calcular as razões  $V_p/V_s$  para as camadas da crosta e manto litosférico a partir da modelagem do campo de velocidades de ondas S e utilizando o modelo de velocidade de ondas P proposto por Bernardes (2015) para o perfil. Com o resultado do imageamento  $V_p/V_s$  pretende-se:

1. Caracterizar o embasamento da Bacia do Paraná ( $V_p/V_s$ ) e discutir a existência de possíveis descontinuidades e/ou heterogeneidades no embasamento sob o perfil sísmico;
2. Caracterizar sísmicamente a crosta inferior e manto litosférico sob a Bacia do Paraná e Faixa Ribeira e discutir possíveis transformações sofridas pela litosfera com a implantação do Oceano Atlântico Sul.

## 1.3 Justificativa

Devido a não unicidade da relação entre a velocidade da onda P e a composição do meio, torna-se relevante determinar a estrutura de velocidades das ondas S para estimar a razão  $V_p/V_s$ . A razão  $V_p/V_s$  é uma medida adimensional particularmente sensível ao conteúdo de sílica das rochas e permite ressaltar variações que não são observadas com o imageamento  $V_p$  e/ou  $V_s$  isoladamente (Musacchio, *et al.*, 1997; Zandt & Ammon, 1995).

## 1.4 Trabalhos Anteriores

Dentro do contexto do projeto, para o imageamento da litosfera, já foi realizado modelagem de ondas P (Bernardes, 2015), caracterização sismológica (Peixoto, 2015) e sondagens magnetotelúricas (Minei, 2015). O modelo de ondas P proposto por Bernardes (2015) é um modelo de quatro camadas (bacia, crosta superior, crosta inferior e manto litosférico) com crosta continental segmentada em três domínios sísmicos (Figura 1.2).

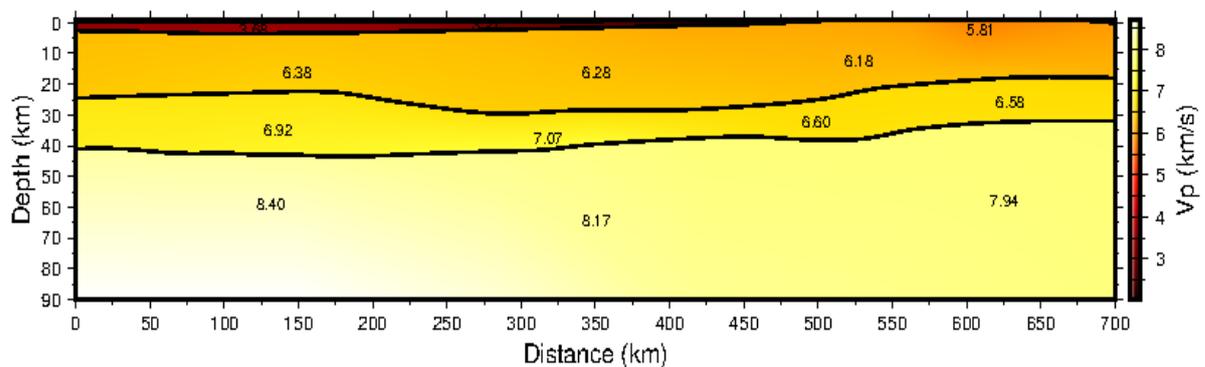


Figura 1.2 – Modelo de velocidade de ondas P para o perfil sísmico PABBRISE. Proposto por Bernardes (2015).

No primeiro domínio (0 – 170 km), reverberações sísmicas descontínuas na crosta inferior ( $V_p = 6,70 - 7,05$  km/s) indicam que esta porção da crosta foi intrudida por corpos máficos tabulares. No domínio central (170 – 525 km) a crosta superior é quase três vezes mais espessa que a crosta inferior, além disto, a crosta inferior apresenta forte gradiente positivo de velocidade, este interpretado como *underplating* máfico na base da crosta ( $V_p = 7,10 - 7,25$  km/s).

No terceiro domínio (525 – 700 km), próximo a margem continental, a crosta inferior apresenta velocidades anormalmente baixas ( $V_p = 6,48 - 6,65$  km/s) e espessura crustal de 32 km. Estas informações associadas a outros indícios geofísicos e geológicos sugerem que a crosta inferior tenha sido delaminada por processo geodinâmico relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Sul.

Em todos os domínios a crosta inferior foi modificada, ora por intrusões máficas, estiramento dúctil localizado ou delaminação. Próximo à margem continental (porção SE do perfil) o topo do manto superior apresenta  $V_p = 7,88 - 7,92$  km/s e sob a bacia (porção NW do perfil)  $V_p = 8,25$  km/s. Estes valores indicam dois domínios mantélicos que sugerem origem e evolução distintas para cada um deles.

Peixoto (2015) caracterizou sismologicamente a crosta sob o perfil PABBRISE fazendo uma aproximação por função do receptor (Figura 1.3) e razão espectral H/V. Com base nas profundidades da Moho sugeridas pela função do receptor, a crosta também foi dividida em domínios.

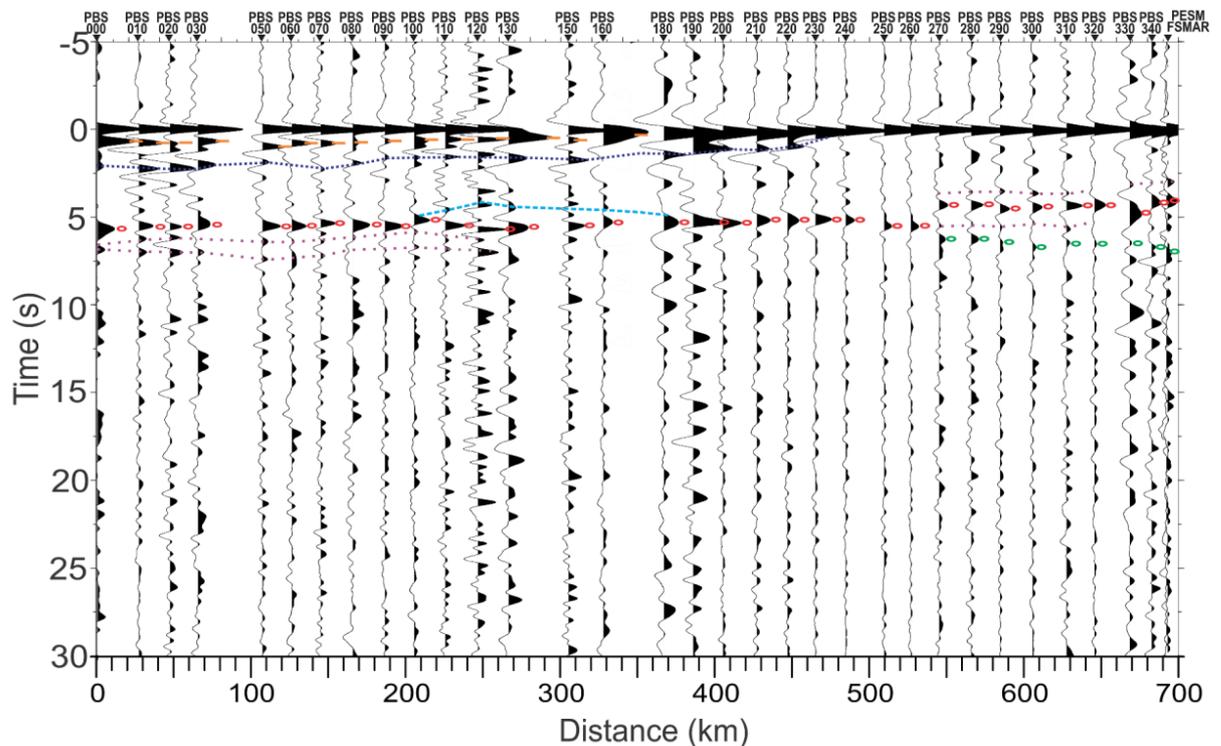


Figura 1.3 – Perfil de traços de função do receptor da componente radial empilhados. O tracejado laranja corresponde a fase da Bacia do Paraná. Tracejado azul marinho é o alinhamento de fases múltiplas da bacia. Círculos vermelhos correspondem a fase Ps (Moho). Círculos verdes correspondem a alinhamentos de fases bem definidas abaixo da Moho. Tracejados em roxo correspondem a alinhamentos de possíveis descontinuidades existentes na crosta e no manto. O tracejado azul corresponde ao *underplating* também detectado por Bernardes (2015). Retirado de Peixoto (2015).

Os primeiros 305 km do perfil mostram espessura crustal média de 42,1 km e  $V_p/V_s$  média de 1,76. Entre 305 – 525 km do perfil, a espessura média da crosta é 39,4 e  $V_p/V_s$  média de 1,76. Do km 525 até o final do perfil, a crosta tem espessura média de 32 km e  $V_p/V_s$  em torno de 1,73 – 1,83. Estes valores sugerem presença de fluidos na crosta, uma vez que, a análise da componente transversal da função do receptor mostra que anisotropia é incipiente nesta porção do perfil.

De modo de geral, com base no comportamento da Moho, da topografia e da anomalia Bouguer, é possível sugerir que a crosta da metade sudeste do perfil foi afinada e sofreu reajuste isostático. O lado noroeste apresenta comportamento diferenciado e sugere excesso de massa no manto litosférico.

Minei (2015) analisou dados de um perfil magnetotelúrico localizado na borda nordeste da Bacia do Paraná e pôde verificar a estrutura elétrica interna da bacia por meio da

inversão de dados, os quais indicaram que não há efeitos estáticos significativos na região. Por volta do km 300 – 350 do perfil de MT (km 120 do perfil PABBRISE), ocorre uma anomalia de baixa resistividade com topo entre 60-80 km de profundidade (Figura 1.4). Esta anomalia poderia estar associada a processos metassomáticos ocorridos no manto litosférico durante evento de subducção no Neoproterozóico.

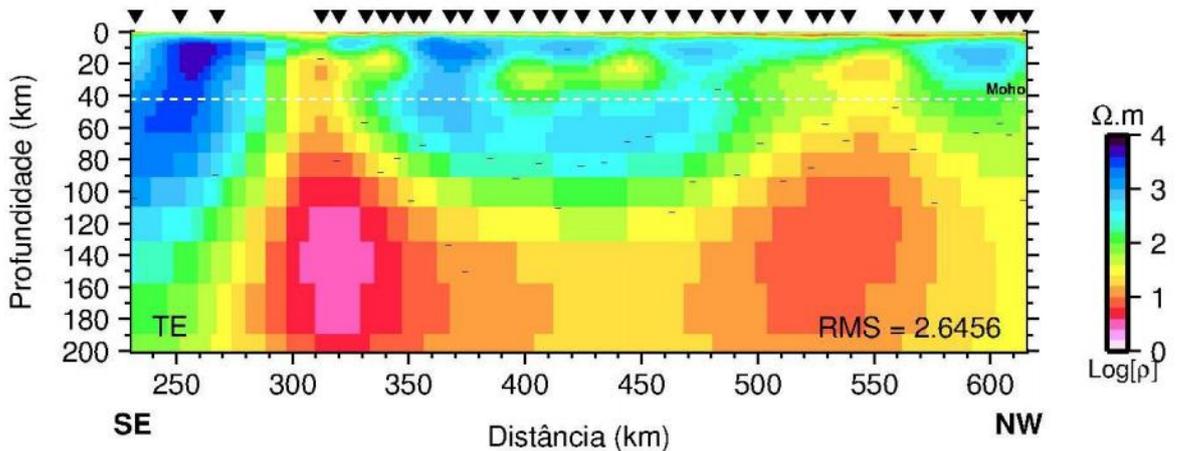


Figura 1.4 – Modelo 2D de resistividade obtido pela inversão do modo TE do tensor de impedância MT até a profundidade do *skin depth* máximo. Os traços pretos representam a profundidade máxima de investigação dos dados pela transformada de Niblett-Bostick. Retirado de Minei (2015).

## 1.5 Estado da Arte

A razão  $V_p/V_s$  é uma informação importante para compreender os processos evolutivos da litosfera. Esta técnica tem sido aplicada em diversas regiões do mundo com resultados satisfatórios. Musacchio *et al.* (1997) investigaram a composição da crosta entre as províncias *Greenville* e *Appalachian* na América do Norte. A partir da razão  $V_p/V_s$  obtida por meio de dados de refração sísmica profunda, foi possível discriminar o domínio das duas províncias, a primeira com 1,81 de  $V_p/V_s$  média e a segunda 1,73. A Província *Greenville* apresenta composição tipicamente gabraica, enquanto a Província *Appalachian* apresenta rochas de composição intermediária a máfica.

Estudos com a razão  $V_p/V_s$  em regiões de litosfera oceânica, têm sido amplamente usados. Mjelde, *et al.*, (2003) realizaram um estudo ao longo de um perfil *offshore* na margem *Vøring* na Noruega para investigar implicações na litologia e no campo de tensão. Verificou-se que os valores da razão  $V_p/V_s$  decrescem com a profundidade, atribuídos pelo aumento da compactação e consolidação das rochas. Para as rochas extrusivas do Platô *Vøring*, foi estimado um valor de 1,85, em conformidade aos valores médios globais para rochas máficas. No embasamento cristalino, os valores de  $V_p/V_s$  encontrados oscilaram entre 1,67 – 1,75, o

que próximo ao Platô Vøring pode indicar a presença de granito/granodiorito da crosta continental.

A razão  $V_p/V_s$  é relativamente insensível à temperatura, mas sensível à abundância de quartzo para as rochas da crosta. Lorwy & Pérez-Gussinyé (2011) apresentam uma correlação de baixa  $V_p/V_s$  crustal com elevadas temperatura e deformação litosférica na região montanhosa do oeste do Estados Unidos, demonstrando a importância do quartzo no controle das deformações litosféricas.

No Brasil existem alguns estudos de razão  $V_p/V_s$  proveniente de dados de refração sísmica profunda. Na Província Tocantins, Ventura *et al.*, (2005) sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu-GO inferiu uma razão de Poisson alta, aproximadamente 0,29, para a crosta média do Arco Magmático de Goiás e do Lineamento Transbrasiliano.

Na Província Borborema, Tavares (2014), determinou a razão de Poisson da crosta e manto litosférico sob uma linha de refração sísmica profunda com orientação NW-SE. Observou uma crosta superior composicionalmente félsica, tal como a crosta inferior na porção do Domínio Ceará Central. No Domínio Rio Grande do Norte, a crosta inferior apresentou valores de composição máfica.

A razão  $V_p/V_s$  oriunda de dados de refração sísmica profunda tem sido adotada consideravelmente nos estudos de margens (Kvarven *et al.*, 2016; Mjelde *et al.*, 2003; Mjelde, *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2013). O PABBRISE é a continuação em continente do experimento *offshore* SanBa, e compôs o estudo científico dos processos de afinamento da crosta continental, formação das margens passivas e bacias intracontinentais a partir da análise de dados sísmicos adquiridos *onshore* e *offshore*.

## 1.6 Estrutura da Dissertação

A dissertação foi organizada na forma de um artigo, com o volume dividido em dois capítulos e um anexo.

O capítulo 1 é introdutório e visa contextualizar a pesquisa e a organização do volume. O capítulo 2 trata do processamento e resultado da dissertação disponibilizado na forma de artigo, intitulado: “*Modelagem sísmica de ondas S e imageamento Vp/Vs da crosta e manto litosférico sob o perfil sísmico PABBRISE, SE do Brasil: NE Bacia do Paraná, Faixa Brasília Meridional e Faixa Ribeira Central*”; apresenta e discute os resultados da modelagem de ondas S e razão Vp/Vs para o perfil sísmico PABBRISE.

O Anexo 1 apresenta os sismogramas, traçado de raios e a modelagem dos dados sísmicos.

## 1.7 Banco de Dados

O perfil sísmico com cerca de 700 km de extensão, foi adquirido com 347 pontos de registro e sensores equiespaçados distribuídos a cada 2 km aproximadamente. Os dados obtidos possuem boa qualidade nos quais parte da energia das ondas S foi observada. No entanto, devido ao fato de terem sido implantados apenas geofones de componentes verticais, somente alguns sismogramas S forneceram informações consideráveis.

A identificação das fases ficou restrita às seções *PT-01*, *PT-04*, *PT-07*, *PT-08*, *PT-09*, *PT-10*, *PT-11*, *PT-13* e *PT-15*, as quais passaram por uma inspeção visual para a retirada de traços mudos e ruidosos. Os traços foram normalizados, filtrados na banda-passante de 2-8Hz e receberam ganho nas amplitudes do sinal para melhorar a identificação das fases.

Considerando a razão Vp/Vs ( $=t_s/t_p$ ) de 1,73, as seções sísmicas de ondas S são apresentadas com velocidade de redução 4,62 km/s e janela de tempo reduzido de 34,6s. As fases sísmicas (*Sg*, *Sb*, *SmS*) foram bem identificadas para a maioria das seções, outras fases não puderam ser identificadas, seja pela ausência do registro ou pela baixa razão sinal/ruído, que é o caso da onda S refratada na bacia (*Ssed*) e onda S refratada no manto litosférico (*Sn*).

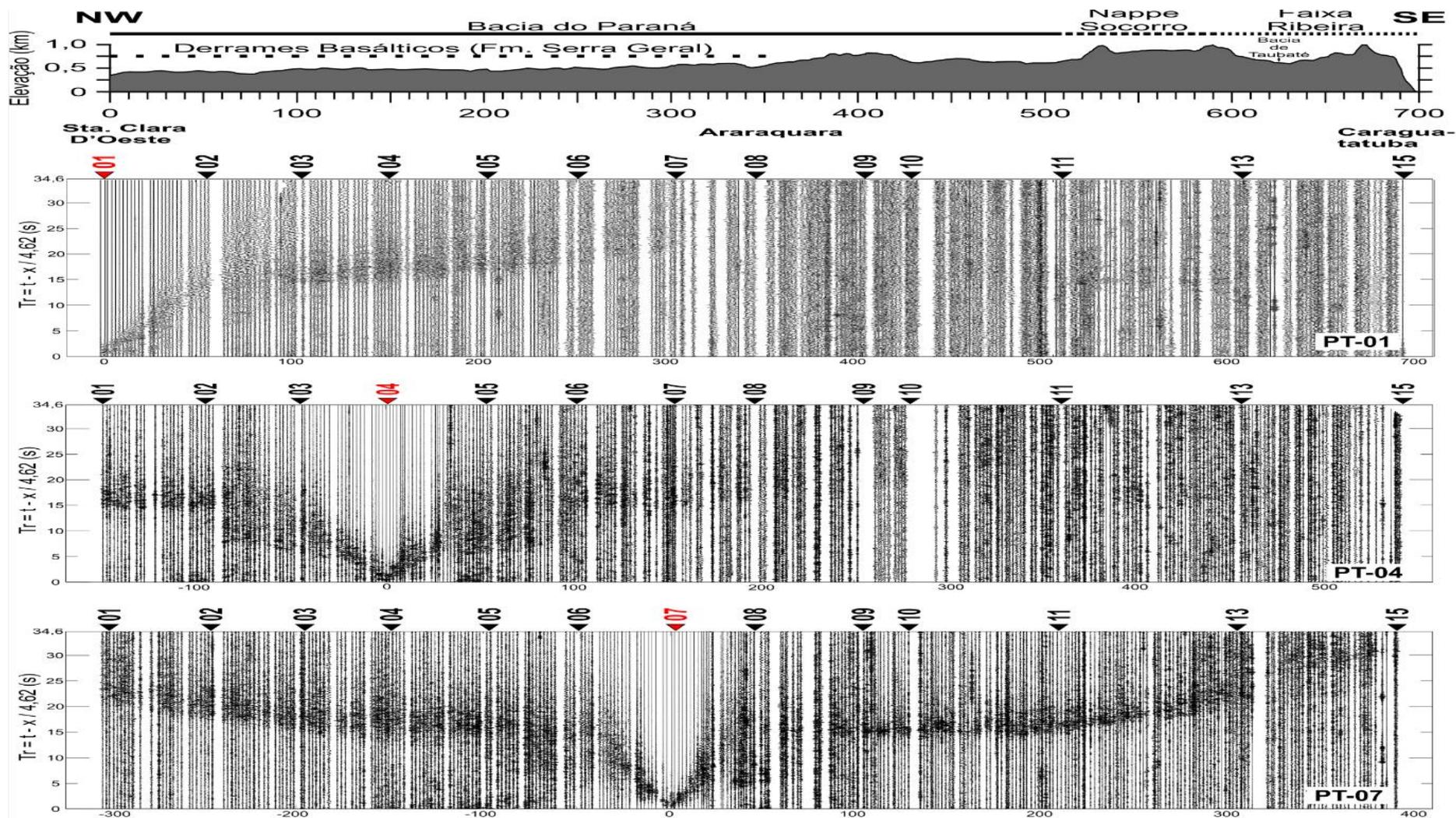


Figura 1.5 – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-01, PT-04 e PT-07. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.

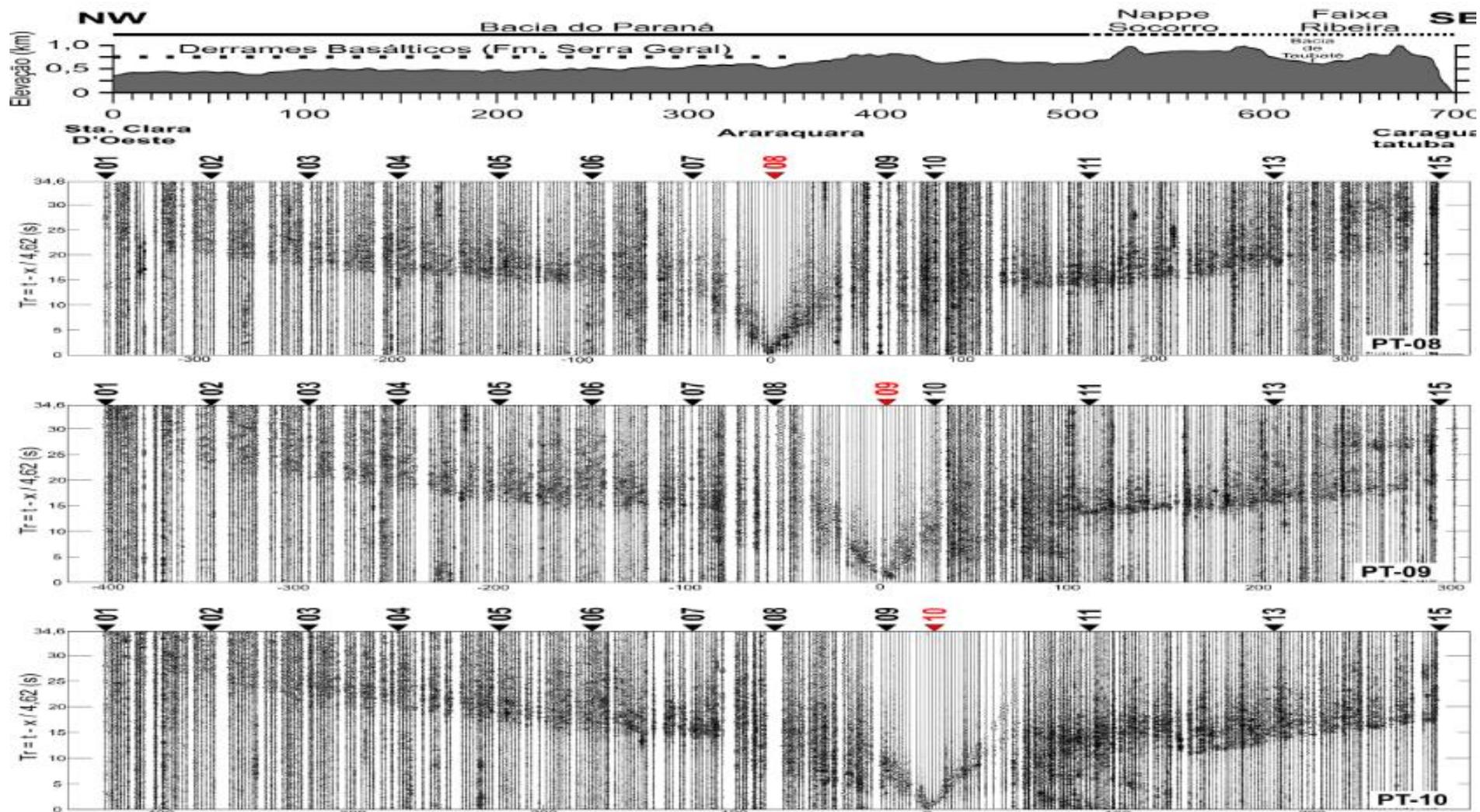


Figura 1.6 – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-08, PT-09 e PT-10. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.

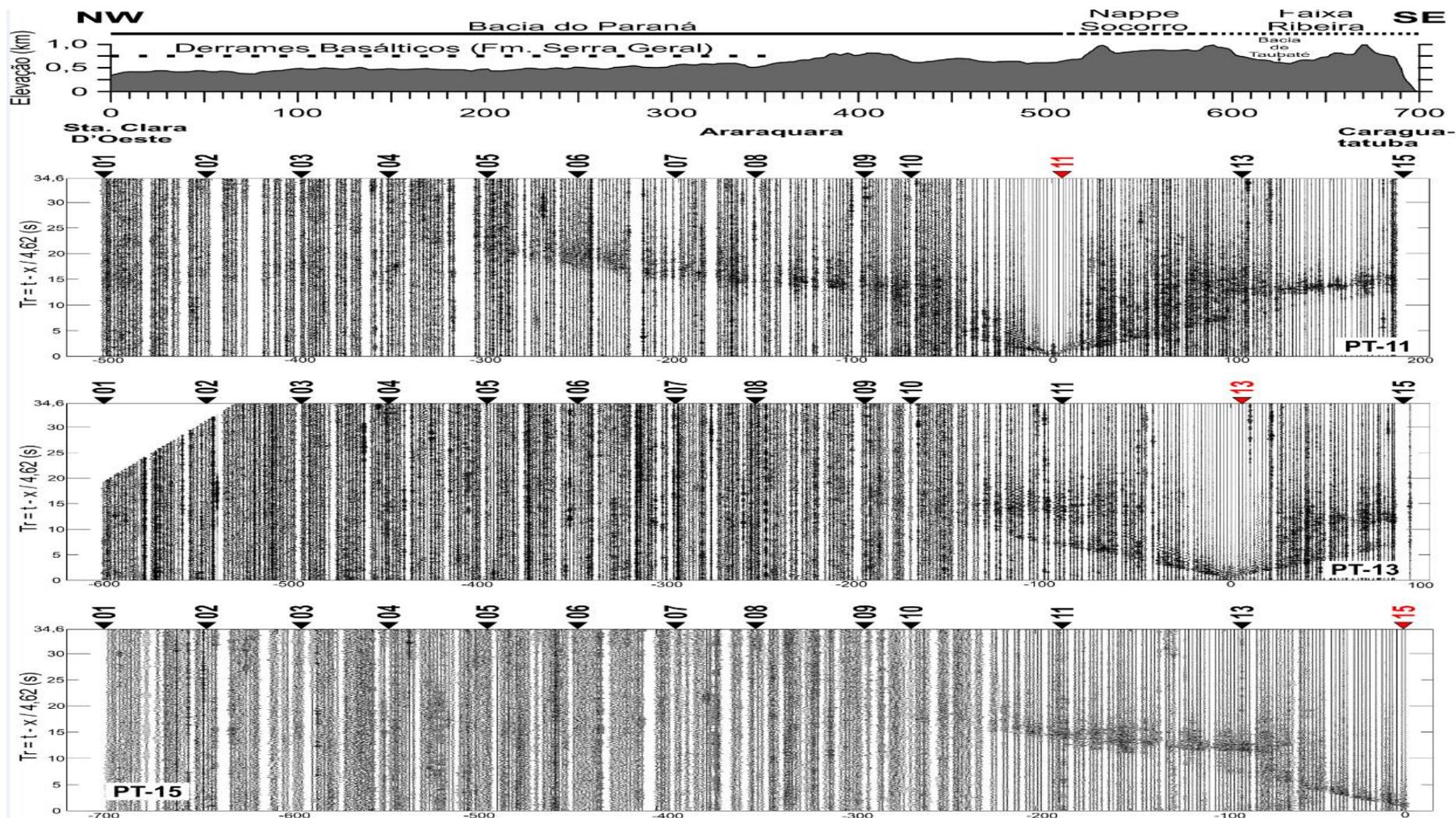


Figura 1.7 – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-11, PT-13 e PT-15. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.

## 1.7 Referências

- Bernardes, R. B., (2015). Modelo de Velocidade Sísmica de Ondas P da Crosta e Manto Superior ao longo do Perfil PABBRISE, Estado de São Paulo. Dissertação de (Mestrado) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- Berrocal, J., Marangoni, Y., de Sá, N.C., Fuck, R., Soares, J.E.P., Dantas, E., Perosi, F., Fernandes, C., (2004). Deep seismic refraction and gravity crustal model and tectonic deformation in Tocantins Province, Central Brazil. *Tectonophysics* 388, 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.033>
- Christensen, N.I., Mooney, W.D., (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 100, 9761–9788. <https://doi.org/10.1029/95JB00259>
- Christensen, N.I., 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *J. Geophys. Res.* 101, 3139–3156.
- Evain, M., Afilhado, A., Rigoti, C., Loureiro, A., Alves, D., Klingelhoefer, F., Schnurle, P., Feld, A., Fuck, R., Soares, J., De Lima, M.V., Corela, C., Matias, L., Benabdellouahed, M., Baltzer, A., Rabineau, M., Viana, A., Moulin, M., Aslanian, D., (2015). Deep structure of the Santos Basin-São Paulo Plateau System, SE Brazil. *J. Geophys. Res. B Solid Earth* 120, 5401–5431. <https://doi.org/10.1002/2014JB011561>
- Holbrook, W.S., Mooney, W.D., Christensen, N.I., (1992). The seismic velocity structure of the deep continental crust. *Cont. Low. Crust* 1–43.
- Kvarven, T., Mjelde, R., Hjelstuen, B.O., Faleide, J.I., Thybo, H., Flueh, E.R., Murai, Y., (2016). Crustal composition of the Møre Margin and compilation of a conjugate Atlantic margin transect. *Tectonophysics* 666, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.002>
- Lima, M.V.A.G. d., Berrocal, J., Soares, J.E.P., Fuck, R.A., (2015). Deep seismic refraction experiment in northeast Brazil: New constraints for Borborema province evolution. *J. South Am. Earth Sci.* 58, 335–349. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.10.007>
- Lowry, A.R., Pérez-Gussinyé, M., (2011). The role of crustal quartz in controlling Cordilleran deformation. *Nature* 471, 353–359. <https://doi.org/10.1038/nature09912>
- Mjelde, R., Kvarven, T., Faleide, J.I., Thybo, H., (2016). Lower crustal high-velocity bodies along North Atlantic passive margins, and their link to Caledonian suture zone eclogites and Early Cenozoic magmatism. *Tectonophysics* 670, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.021>

- Mjelde, R., Raum, T., Digranes, P., Shimamura, H., Shiobara, H., Kodaira, S., (2003). Vp/Vs ratio along the Vøring Margin, NE Atlantic, derived from OBS data: Implications on lithology and stress field. *Tectonophysics* 369, 175–197. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00198-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00198-7)
- Musacchio, G., Mooney, W.D., Luetgert, J.H., Christensen, N.I., (1997). Composition of the crust in the Grenville and Appalachian Provinces of North America inferred from Vp/Vs ratios. *J. Geophys. Res.* 102, 15225–15241. <https://doi.org/10.1029/96jb03737>
- Rudnick, R.L., Fountain, D.M., (1995). Nature and Composition of the Continental-Crust - a Lower Crustal Perspective. *Rev. Geophys.* 33, 267–309. <https://doi.org/10.1029/95rg01302>
- Soares, J.E., 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. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 111, 1–31. <https://doi.org/10.1029/2005JB003769>
- Tavares, E. J., (2014). 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). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- Ventura, D.B.R., Soares, J., (2005). Razão De Poisson Da Crosta Sob a Linha De Refração Sísmica Profunda De Porangatu. IX Simpósio Geol. do Centro-Oeste 126–127.
- Wei, X., Ruan, A., Zhao, M., Qiu, X., Wu, Z., Niu, X., (2015). Shear wave velocity structure of Reed Bank, southern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics* 644, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.006>
- Zandt, G., Ammon, C.J., (1995). Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/374152a0>
- Zhao, B., Zhang, Z., Bai, Z., Badal, J., Zhang, Z., (2013). Shear velocity and Vp/Vs ratio structure of the crust beneath the southern margin of South China continent. *J. Asian Earth Sci.* 62, 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.08.013>

## CAPÍTULO 2

*Modelagem sísmica de ondas S e imageamento Vp/Vs da crosta e manto litosférico sob o perfil sísmico PABBRISE, SE do Brasil: NE Bacia do Paraná, Faixa Brasília Meridional e Faixa Ribeira Central.*

### **Resumo**

Este trabalho apresenta o imageamento Vp/Vs da crosta e do manto raso sob o perfil sísmico PABBRISE (PARaná Basin, Brasília and RIBEira belts Seismic Experiment), que é um perfil de refração e reflexão de ângulo amplo, NW-SE e 700 km de extensão, adquirido na porção nordeste da Bacia do Paraná, passando pela Faixa Brasília Meridional e pela Faixa Ribeira Central, no Estado de São Paulo. O imageamento Vp/Vs complementou os resultados da modelagem sísmica de ondas P permitindo inferências sobre a composição da crosta e manto raso. As características importantes interpretadas no perfil são: i) alta Vp e Vp/Vs maior que 1,80 na crosta superior e inferior da porção NW do perfil, indicam que o intenso magmatismo que afetou a Bacia do Paraná desde sua implantação, intruiu e transformou a crosta desse domínio; ii) a inversão da razão Vp/Vs entre crosta superior e inferior na porção central do perfil, com crosta inferior mais félsica do que a superior, coincide com uma crosta inferior estirada e superior preservada; iii) presença de fluidos intersticiais (Vp baixa e alta Vp/Vs) na crosta inferior da Faixa Ribeira, parte SE do perfil; iv) dois domínios do manto interpretados como mais denso e mais competente (alta Vp e alta Vp/Vs) sob a bacia e um menos denso e mais quente (baixa Vp e baixa Vp/Vs) fora da bacia, perto da costa. Em geral, os resultados sugerem que a litosfera sob o perfil foi modificada desde o Neoproterozóico, primeiro com a implantação da Bacia do Paraná no Paleozóico e posteriormente com a implantação do Oceano Atlântico Sul no Mesozóico.

## Abstract

This work presents a  $V_p/V_s$  image of the crust and shallow mantle under the PABBRISE seismic profile (Paraná Basin, Brasília and Ribeira belts Seismic Experiment), which is a 700 km long NW-SE wide-angle reflection and refraction profile, acquired in the northeast portion of the Paraná Basin, passing through the Southern Brasília Belt and the Central Ribeira Belt, in the State of São Paulo. The  $V_p/V_s$  image (of the crust and shallow mantle) under the profile complemented the  $V_p$  results, permitting inferences about the composition of the crust and shallow mantle. Important features interpreted in the profile are: i) high  $V_p$  and  $V_p/V_s$  ratio greater than 1.80 in the upper and lower crust of NW portion of the profiles showing that the intense magmatism that affected the Paraná Basin since its implantation, intruded and transformed the crust of this domain; ii) the inversion of the  $V_p/V_s$  ratio between upper and lower crust in the central portion of the profile, with lower crust more felsic than the upper one, which coincides with a stretched lower crust and preserved upper one; iii) presence of interstitial fluids (low  $V_p$  and high  $V_p/V_s$ ) in the lower crust of the Ribeira Belt, SE portion of the profile; iv) two mantle domains interpreted as denser and more competent (high  $V_p$  and high  $V_p/V_s$ ) under the basin and a lighter and hotter (low  $V_p$  and low  $V_p/V_s$ ) outside the basin, close to the coast. In general, the results suggest that the lithosphere under the profile was modified since the Neoproterozoic, first with the implantation of the Paraná Basin in the Paleozoic and later with the implantation of the South Atlantic Ocean in the Mesozoic.

## 2.1 Introdução

Modelos de velocidade sísmica obtidos a partir de dados de refração e reflexão de ângulo amplo (WARR-*Wide-Angle Reflection-Refraction*) têm permitido mapear a estrutura e composição da litosfera continental, fornecendo subsídios para o entendimento da evolução tectônica, principalmente se associados a dados geológicos, geofísicos e geoquímicos (Zelt *et al.*, 2003).

No Brasil, experimentos WARR para estudos litosféricos foram empregados na última década a partir do levantamento pioneiro realizado em 1998 na Província Tocantins – Brasil Central (Berrocal *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2006). Desde então, outros experimentos têm sido realizados em áreas de interesse tectônico no país.

Com o intuito de compreender a influência da implantação do Oceano Atlântico Sul na configuração da litosfera continental do sudeste brasileiro, foi realizado o projeto de pesquisa "Estudo da Transição da Crosta Continental-Crosta Oceânica na Região Sudeste do Brasil: Experimentos de Refração Sísmica Profunda e Magnetotelúrico e Estudos Geológicos na Faixa Ribeira e Bacia do Paraná (PETROBRAS-UnB–Finatec).

O perfil de refração sísmica PABBRISE foi adquirido em 2013 pelo Laboratório de Estudos da Litosfera (LabLitos) do IG/UnB em parceria com o INCT para Estudos Tectônicos, e é uma continuação em terra do perfil de refração sísmica SanBa adquirido em mar pelo Ifremer em 2010 (Evain *et al.*, 2015).

O perfil PABBRISE possui aproximadamente 700 km de extensão na direção NW-SE, e cruza a porção NE da Bacia do Paraná, porção meridional da Faixa Brasília e a porção central da Faixa Ribeira, estado de São Paulo, sudeste do Brasil (Figura 2.1).

Para a modelagem do campo de velocidade das ondas S, foi utilizado o modelo sísmico 2D de ondas P para a crosta e manto superior proposto por Bernardes (2015). Devido a não unicidade da relação entre a velocidade da onda P e a composição do meio, torna-se relevante determinar o campo de velocidades das ondas S e utilizar a relação  $V_p$  versus  $V_p/V_s$  como discriminante para inferir a natureza das rochas e a presença de fluido no meio (Zandt & Ammon, 1995; Musacchio, *et al.*, 1997).

Com a modelagem sísmica 2D de ondas S, este trabalho apresenta os valores da razão  $V_p/V_s$  para a crosta e manto superior sob o perfil PABBRISE e discute suas implicações para a evolução geotectônica regional.

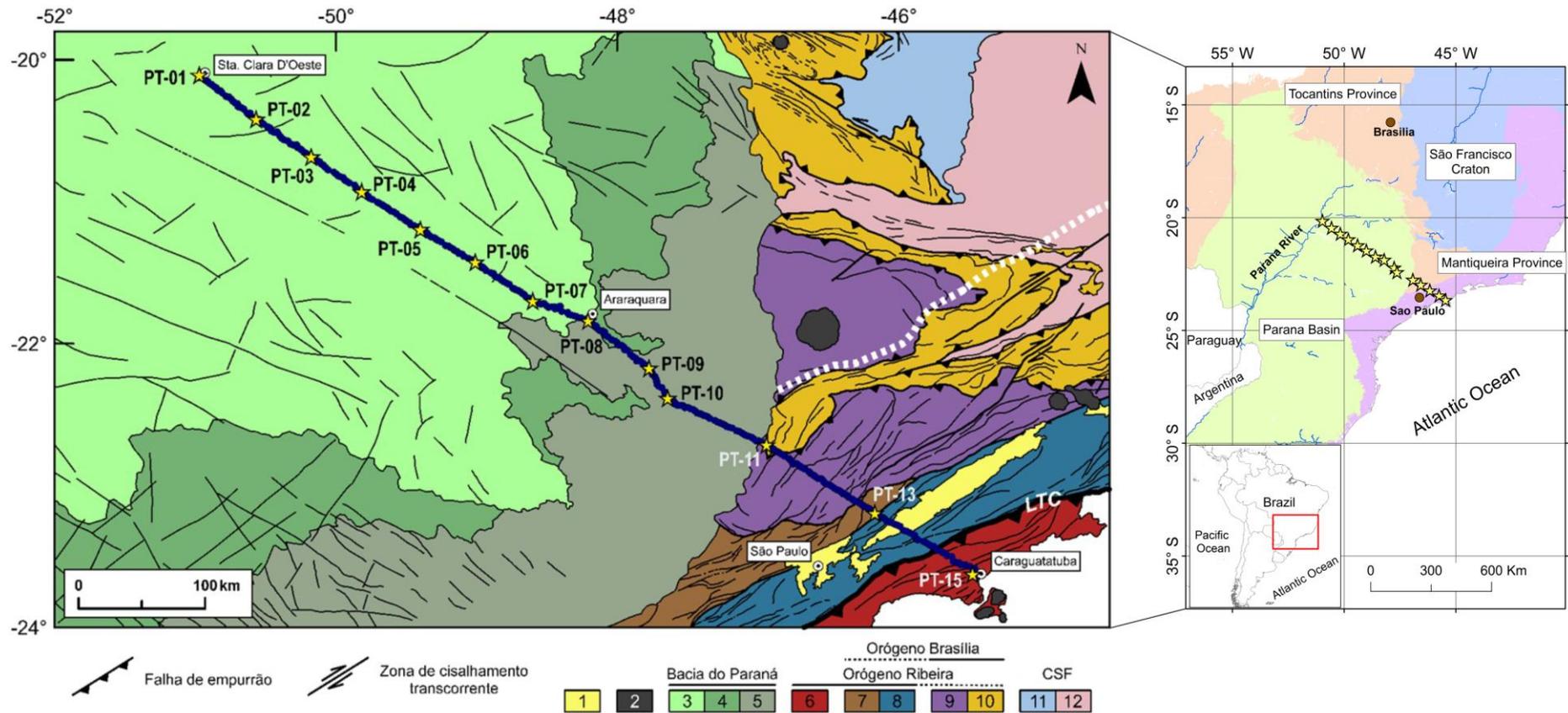


Figura 2.1 – Mapa tectônico simplificado da região em estudo (modificado de Heilbron *et al.*, 2004; Perrotta *et al.*, 2005; Peternel *et al.*, 2005 e Trouw *et al.*, 2013). Na legenda: 1 – Bacias cenozóicas do tipo rifte; 2 – Plútons alcalinos do Cretáceo Superior/Cenozóico; Bacia do Paraná: 3 – Grupo Bauru (Cretáceo Superior); 4 – Formação Serra Geral (Cretáceo Inferior); 5 – Rochas pré-vulcânicas (Mesozóico/Paleozóico); 6 – Terreno Oriental (Arco Rio Negro); 7 – Terreno Apiaí-São Roque; 8 – Terreno Embu-Paraíba do Sul; 9 – *Nappe* Socorro-Guaxupé; 10 – Sistema de nappes Andrelândia, *Nappe* Passos e *Klippe* Carrancas; Cráton do São Francisco e seu antepaís: 11 – Cobertura (Grupo Bambuí); 12 – Cráton do São Francisco. LTC – Limite Tectônico Central (sutura). A linha tracejada em branco representa a influência da frente de deformação da Faixa Ribeira (segundo Trouw *et al.*, 2013). Estrelas representam os pontos de tiro, PT, (01–11, 13 e 15) e círculos azuis representam as estações receptoras do perfil PABBRISE. Círculos brancos destacam a localização de algumas cidades do Estado de São Paulo. Retirado de Bernardes (2015).

## 2.2 Contexto Geológico

O perfil sísmico PABBRISE está localizado no estado de São Paulo, sudeste do Brasil e atravessa em superfície de NW para SE, a porção NE da Bacia do Paraná, Faixa Brasília Meridional (*Nappes Socorro-Guaxupé*) e parte central da Faixa Ribeira (Figura 2.1).

A Bacia do Paraná é definida como uma típica bacia intracratônica juntamente com as bacias do Amazonas-Solimões, Parecis e Parnaíba. A subsidência e o acúmulo sedimentar tiveram início no Meso a Paleordoviciano, tempo em que se estabeleceu a Orogenia Oclóyica (Milani & Ramos, 1998).

A origem e a constituição do embasamento da Bacia do Paraná são temas de grande debate. Para Zalán (1990), a implantação da sinéclise estaria associada à contração térmica sucedida aos fenômenos tectonomagmáticos do Ciclo Brasileiro.

Milani (1997), por sua vez, afirma que a implantação da Bacia do Paraná deu-se na forma de depressões alongadas na direção NE-SW, de acordo com a trama do substrato pré-cambriano. Milani & Ramos (1998) definiram o embasamento da bacia como um mosaico de blocos formado por núcleos cratônicos circundados por faixas móveis brasileiras.

Quintas *et al.* (1999), Mantovani *et al.* (2005) e Mantovani & Brito Neves (2005) interpretaram a expressiva anomalia gravimétrica regional positiva, localizada na região central da bacia, como a resposta de um bloco cratônico e definiram o embasamento da bacia como um único bloco cratônico pré-Brasileiro denominado de Bloco Paranapanema.

Julià *et al.* (2008), utilizando dados sismológicos de função do receptor e dispersão de ondas de superfície, mostraram que a crosta da Bacia do Paraná possui espessura em torno de 40 km com regiões de crosta inferior máfica. Essas regiões máficas foram relacionadas a raízes cratônicas e o embasamento interpretado como um cráton fragmentado cujas zonas de fraqueza condicionaram a subsidência inicial da bacia.

Bernardes (2015) mostrou que a crosta da porção NE da bacia, sob o perfil sísmico PABBRISE (Figura 2.1), se apresenta pouco estirada com espessuras entre 42 e 39 km, afinando em direção a borda sudeste (Figura 2.5). Próximo ao Rio Paraná a crosta e o manto litosférico Neoproterozóico foram descaracterizados pelos processos tectono-magmáticos que afetaram a região no Ordoviciano (Basalto Três Lagoas) e no Cretáceo (Magmatismo Serra Geral).

Bernardes (2015) também definiu a formação da bacia como o resultado da combinação de diferentes mecanismos de subsidência atuando em diferentes estágios

evolutivos, que envolvem retrabalhamento com injeção de massa na crosta e manto superior. No modelo de velocidade de ondas P proposto pelo autor (Figura 2.5), o embasamento não é caracterizado como um amálgama de blocos.

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná sugere a ocorrência de seis episódios de sedimentação e erosão, representados por pacotes sedimentares continentais e rochas ígneas associadas que se aproximam dos 7 km de espessura e idades que vão do Ordoviciano ao Cretáceo (Milani & Ramos, 1998; Quintas *et al.*, 1999; Milani *et al.*, 2007).

Segundo Cordani (2009), a parte setentrional da Bacia do Paraná acomoda-se diretamente sobre as *nappes* brasileiras Socorro-Guaxupé que devem ter continuidade em subsuperfície. A *Nappe* Socorro-Guaxupé está localizada no extremo sudeste da Faixa Brasília Meridional (Figura 2.1) e é interpretada como uma raíz deformada e exumada de um arco magmático Neoproterozóico, desenvolvido pela convergência com subducção para oeste, e colisão da paleoplaca do São Francisco com os terrenos que atualmente formam o embasamento da Bacia do Paraná (Dardene, 2000; Fuck *et al.*, 2005; Trouw *et al.*, 2013).

A Faixa Ribeira (Figura 2.1) é um complexo cinturão de dobramentos e empurrões gerados durante a Orogenia Brasileira, na borda sul/sudeste do Cráton São Francisco (Heilbron *et al.*, 2008). Possui rochas com idades do Neoproterozóico ao início do Paleozóico, estendendo-se por aproximadamente 1400 km na direção NE-SW ao longo da costa sudeste do Brasil. Corresponde a uma grande porção do sistema orogênico da Província Mantiqueira, resultante da convergência dos blocos cratônicos, São Francisco e Congo durante a amalgamação do supercontinente Gondwana (Trouw *et al.*, 2000).

Próximo ao litoral, no domínio da Faixa Ribeira, o perfil sísmico cruza parte do denominado Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil (Figura 2.1). Trata-se de uma combinação de cadeias de montanhas que formam a Serra da Mantiqueira e Serra do Mar, com grabens (p. ex. Bacia de Taubaté) intercalados, cuja origem está entre o final do Neocretáceo e o Eopaleoceno (Zalán & Oliveira, 2005).

A região sofreu intenso magmatismo de natureza alcalina (~90–66 Ma, Cohen *et al.*, 2013), seguido por desequilíbrio isostático e abatimento gravitacional de expressivos blocos crustais, que devido ao movimento relativo entre eles, ocasionou a individualização de blocos mais soerguidos e blocos mais abatidos, representados pelas serras e planícies atuais, respectivamente (Zalán & Oliveira, 2005; Zalán, 2012).

### 2.3 Experimento WARR

O perfil sísmico PABBRISE foi adquirido com 347 pontos de registro aproximadamente equiespaçados ao longo do perfil. No qual 315 pontos foram ocupados com estações sismográficas verticais (registrador *RefTek* Texan\_125A com sensor *Sercel* L4A-2Hz/0,5s), registrando em janelas pré-programadas de 10 minutos a taxa de 200 sps e 32 pontos com estações triaxiais (registrador *RefTek* DAS130-01/3 com sensor *Sercel* L4A-3D-2Hz/0,5s), registrando em modo contínuo com taxa de amostragem de 100 sps. Os equipamentos utilizados são do *Pool* de Equipamentos Geofísicos do Brasil (PEG-BR) administrado pelo Observatório Nacional (ON/MCT).

Ao longo do perfil foram realizadas treze explosões controladas (pontos de tiro), distanciadas de aproximadamente 50 km uma da outra, com carga equivalente a 1.500 kg de emulsão explosiva. No extremo leste, entre os tiros PT-11 e PT-15, o espaçamento dos tiros foi de 100 km já que os tiros PT-12 e PT-14 foram inviabilizados (Figura 2.1). Os tiros PT-01 e PT-10 tiveram carga de 4.500 kg de explosivo.

### 2.4 Processamento e Qualidade dos Dados

De modo geral, os dados adquiridos possuem boa qualidade (Figura 2.2 e Anexo 1). Os registros obtidos no ambiente da bacia apresentam reverberações e razão sinal-ruído menor do que aqueles obtidos fora dela, muito provavelmente devido à espessa pilha de sedimentos e o volumoso magmatismo, que atenuam consideravelmente a energia do sinal sísmico. Ainda assim, boa parte da energia das ondas S foi recuperada.

A identificação e marcação das fases ficou restrita às seções PT-01, PT-04, PT-07, PT-08, PT-09, PT-10, PT-11, PT-13 e PT-15, que apresentaram alinhamentos de fases claros. Para auxiliar a identificação dos alinhamentos de fases das seções S, foi aplicada aos dados uma velocidade de redução para deixá-los semelhantes aos sismogramas de ondas P. Considerando a razão  $V_p/V_s$  ( $=t_s/t_p$ ) de 1,73, as seções sísmicas são apresentadas com velocidade de redução 4.62 km/s e janela de tempo reduzido de 34,6s (Figura 2.2).

Essas seções passaram por inspeção visual para a retirada de traços mudos e ruidosos. Os traços foram normalizados, filtrados na banda-passante de 2-8Hz e foram aplicados diferentes ganhos para melhorar a identificação dos alinhamentos de fases. As fases sísmicas Sg, Sb e SmS foram bem resolvidas para a maioria das seções, a fase Sn para apenas quatro seções (PT-04, PT-07, PT-11 e PT-15) e as fases Ssed não foram identificadas (Anexo 1).

O banco de dados final é formado por quatorze alinhamentos de fases Sg (refrações na crosta superior) identificadas como primeira quebra nos primeiros 120 km dos sismogramas, onze alinhamentos de fases Sb (refração na crosta inferior) identificadas entre os *offsets* 160 – 280 km, treze reflexões de ângulo amplo na Moho (*SmS*) e quatro refrações no limite crosta-manto que trazem a velocidade do manto litosférico (*Sn*). Para a modelagem foram utilizadas 658 Sg, 505 Si, 408 Sn e 1072 SmS, totalizando 2643 leituras (Figuras 2.3 e 2.4).

## 2.5 Modelagem e Resultados

O cálculo do campo de velocidade da onda S foi obtido mediante modelagem direta por meio do programa de traçado de raios RAYINVR (Zelt & Smith, 1992). O modelo de velocidade é modificado por tentativa e erro até as curvas teóricas de velocidade se ajustarem às curvas de tempo de trânsito observadas. O modelo final deve fornecer o melhor ajuste considerando todos os alinhamentos de fases identificados.

A modelagem das ondas S é realizada utilizando a geometria do modelo obtido pela modelagem P, o que significa apenas um grau de liberdade (velocidade S) para a modelagem do tempo de trânsito das fases S. Ou seja, o sucesso na modelagem do campo de velocidade das ondas S, atesta também a qualidade do modelo obtido pela modelagem das ondas P.

A modelagem dos diferentes alinhamentos de fases com sobreposição no trajeto dos raios dos diferentes tiros é o que garante a qualidade do modelo final. As bordas e a porção central da crosta (340 – 390 km do perfil) no modelo estão menos resolvidas devido à ausência de raios cruzando essas regiões (Figuras 2.3 e 2.4).

Neste trabalho, foi realizada a modelagem do tempo de trânsito das fases S considerando a geometria do modelo obtido por Bernardes (2015) para o mesmo perfil. A modelagem para todos os tiros está disponível no Anexo 1 deste volume.

A Figura 2.3 apresenta o ajuste das fases Sg e Sb, juntas representam a parte crustal do modelo. O ajuste das fases relacionadas à Moho (*SmS*) e ao manto litosférico (*Sn*) é apresentado na Figura 2.4. O resultado da modelagem sísmica de ondas S é mostrado na (Figura2.5).

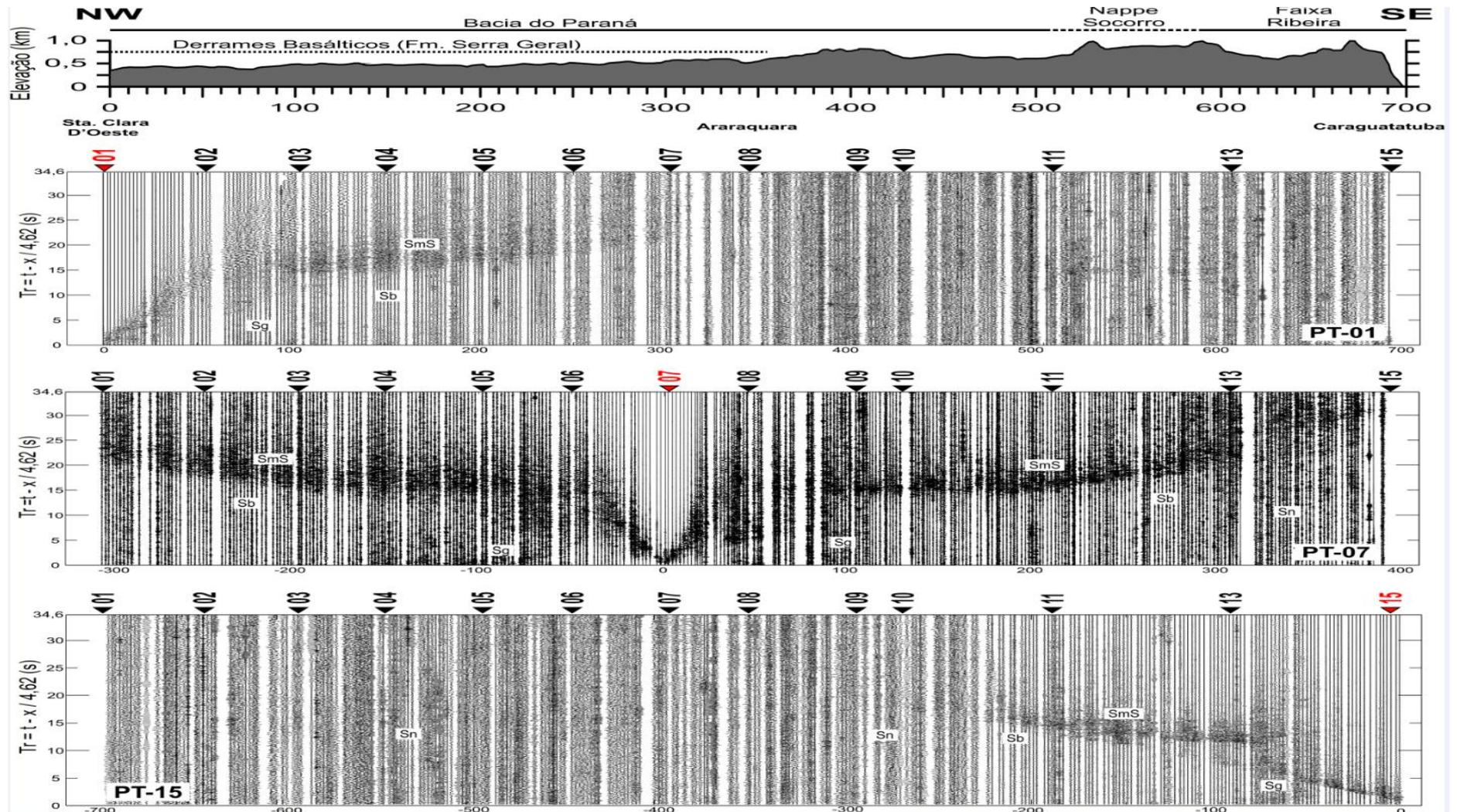


Figura 2.2 – Seções sísmicas das componentes verticais para as ondas S dos tiros PT-01, PT-07 e PT-15. Os traços foram normalizados, filtrados na banda passante de 2-8Hz e apresentados com velocidade de redução de 4,62 km/s.

A confiabilidade do modelo S foi examinada considerando a incerteza das leituras dos tempos para cada fase sísmica (Tabela 1). O valor da incerteza foi atribuído qualitativamente de acordo com os aspectos práticos durante a marcação das fases. O teste foi realizado por meio do método de inversão descrito por Zelt (1999). O resíduo dos tempos calculados em relação aos dados observados (RMS), bem como o  $\chi^2$  foram determinados para cada fase sísmica individualmente.

As refrações na crosta superior (*Sg*) e no manto superior (*Sn*) apresentam uma baixa resolução nos sismogramas, em contrapartida, a refração na crosta inferior (*Sb*) e a reflexão na Moho (*SmS*) são fases mais claras nas seções sísmicas (Figura 2.2 e Anexo 1). Estes aspectos influenciam diretamente no erro associado à marcação das fases (*picks*) e consequentemente no RMS.

Fase Sísmica	Incerteza da Leitura (s)	RMS (s)	$\chi^2$
Sg	0,165s	0,167	1,025
Sb	0,163s	0,165	1,025
Sn	0,275s	0,277	1,016
SmS	0,162s	0,162	1,004

Tabela 1 – Incerteza estimada e erro associado ao ajuste.

Considerando a complexidade geológica, as incertezas e ambiguidades inerentes ao método, podemos com base nos ajustes e na estatística obtida, afirmar que o modelo S é uma boa aproximação.

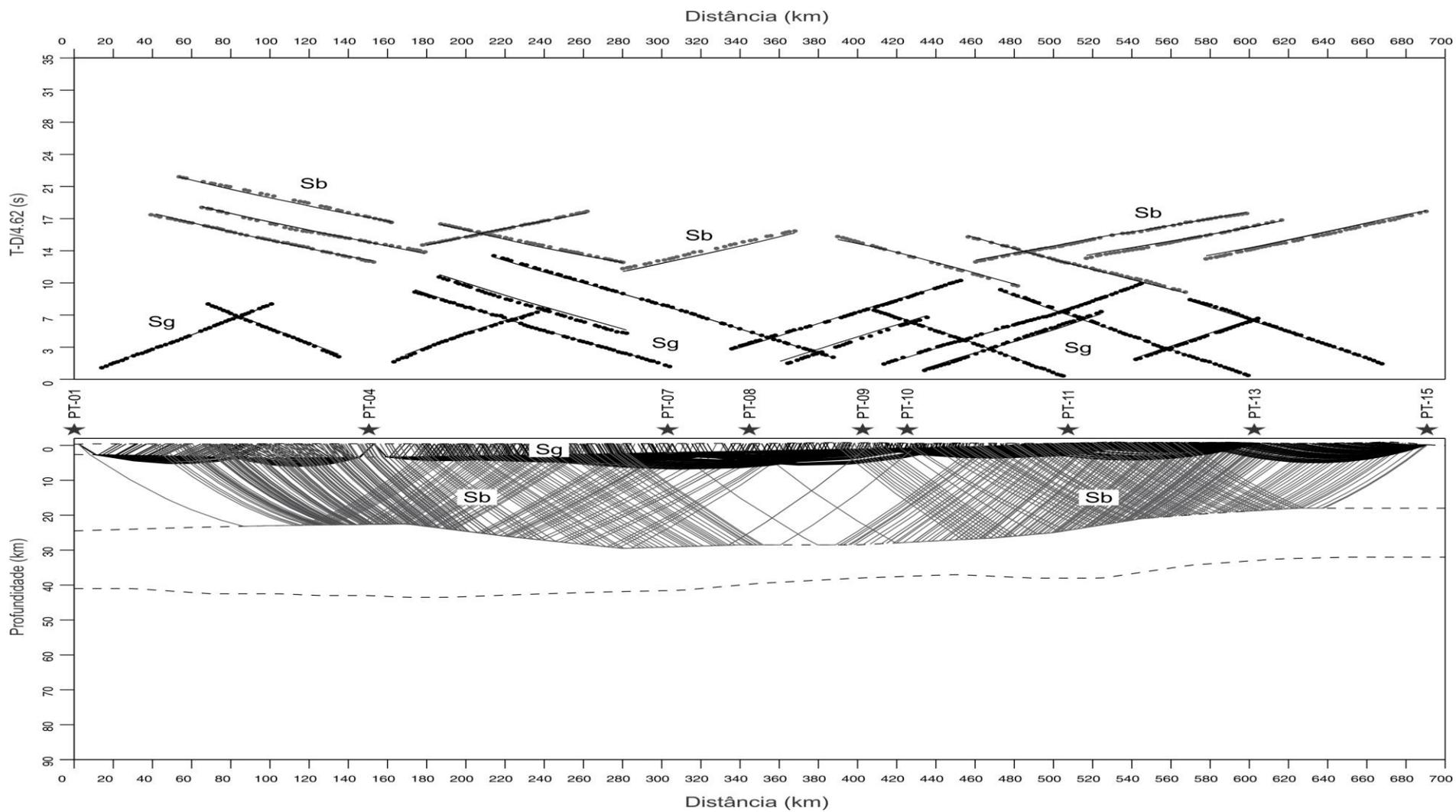


Figura 2.3 – Modelagem direta para as fases Sg e Sb. Acima: ajuste obtido para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); velocidade de redução de 4,62 km/s. Abaixo: diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

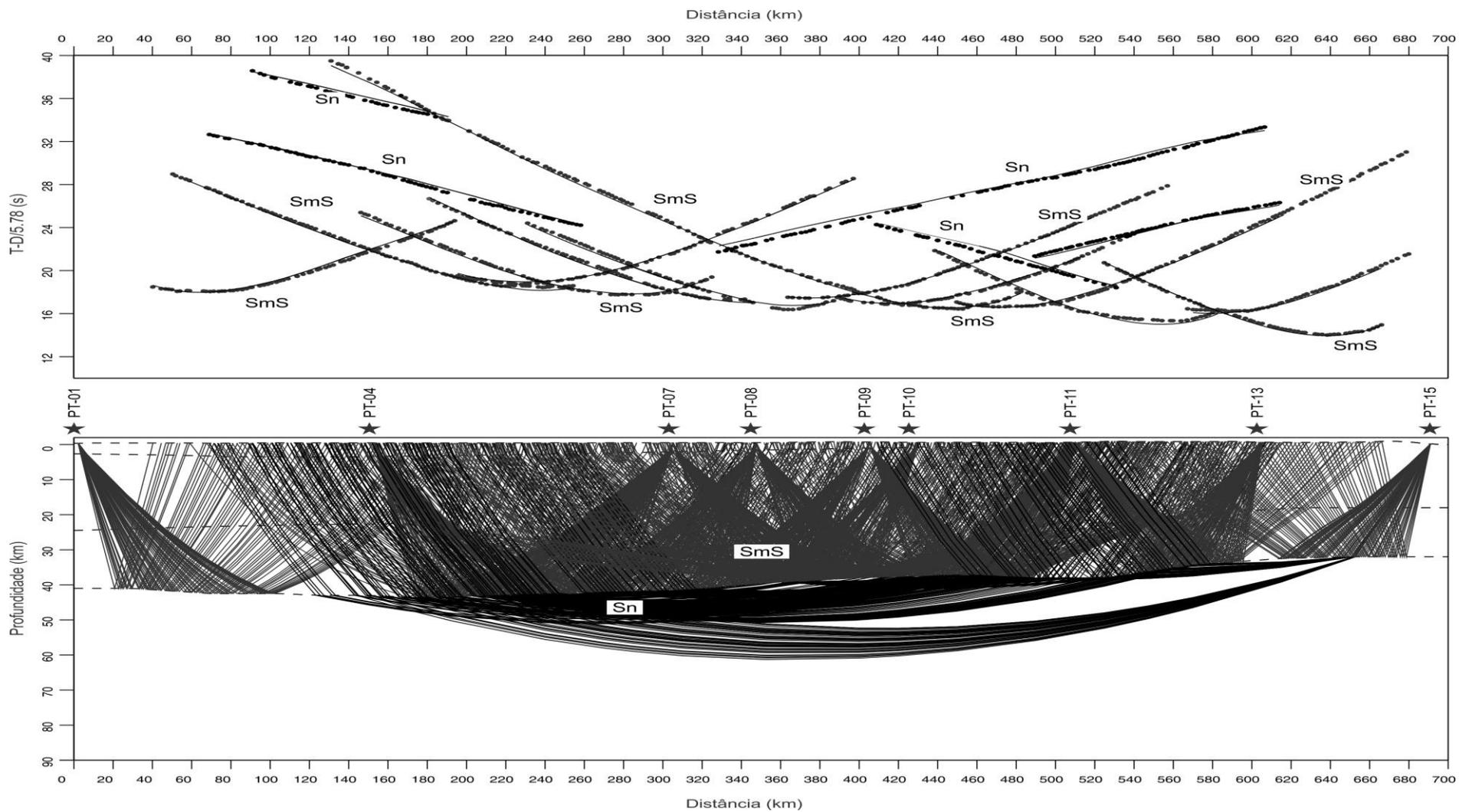


Figura 2.4 – Modelagem direta para as fases SmS e Sn. Acima: ajuste obtido para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); velocidade de redução de 5,78 km/s. Abaixo: diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.



## Modelo Vs

O modelo S, que possui a mesma geometria do modelo P, é formado por quatro camadas que representam a bacia, a crosta superior, a crosta inferior e o topo do manto litosférico (Figura 2.5). A Bacia do Paraná estende-se desde o zero até por volta do km 505 do perfil. Devido à ausência de leitura de fases S da bacia (*Ssed*), a velocidade das ondas S nessa primeira camada foi obtida como consequência do ajuste da fase *Sg*. Conhecida a geometria do embasamento, o atraso no tempo de chegada da fase *Sg* é consequência da velocidade da onda S na bacia.

Os valores de Vs encontrados na bacia, estão possivelmente relacionados à fase P convertida em S próximo à fonte. Este aspecto pode mascarar a Vs real e gerar valores maiores do que o esperado para a camada sedimentar ( $V_s = 2,20 - 3,30$  km/s). Por este motivo não fora obtido o modelo  $V_p/V_s$  para bacia.

A crosta superior é marcada por velocidades que variam de 3,25 km/s nos primeiros 250 quilômetros do modelo para 3,5 km/s na porção central (entre 250-500 km) e 3,47 km/s na porção sudeste do perfil (Figura 2.5). De forma geral, a variação de velocidade da onda S na crosta superior sugere a existência de três domínios crustais distintos que coincidem com os domínios sugeridos pela variação de espessura das camadas (Bernardes, 2015).

A espessura da crosta superior varia de 24 km ao noroeste para 29,5 km na parte central e 18 km na porção sudeste. Na porção central a crosta superior chega a ser três vezes mais espessa que a crosta inferior (Figura 2.5).

Na crosta inferior a velocidade da onda S é de 3,8 km/s aumentando localmente para 4,0 km/s na porção central, região onde foi identificada anomalia de alta velocidade na modelagem P, interpretada como *underplating*. Ao sudeste, no domínio da Faixa Ribeira a onda S apresenta gradiente negativo de velocidade com velocidade de 3,75 km/s no topo da crosta inferior e 3,6 km/s na base.

Essa inversão de velocidade é determinada pelo ajuste das fases *Sb* e *SmS*. Devido ao gradiente negativo, a fase *Sb* foi modelada com a refração crítica (*head wave*) na interface entre crosta superior – crosta inferior. Realizado o ajuste da refração no limite crosta superior-inferior (*Sb*), o ajuste do tempo de chegada das reflexões na Moho (*SmS*) só é possível com a diminuição da velocidade da onda S na crosta inferior em direção a base (ver Anexo 1).

A profundidade da Moho nos modelos varia de 43,5 km na parte NW do perfil, para 39 km na parte central e 32 km na extremidade sudeste (Figura 2.5). O campo de velocidade S

para o manto litosférico é praticamente homogêneo ao longo do perfil, variando de 4,6 km/s a 4,8 km/s (Figura 2.5). Esses valores foram obtidos com a leitura da fase  $S_n$  nos sismogramas dos tiros 1, 7, 11 e 15 (ver Anexo 1). As refrações na Moho ( $S_n$ ), que trazem a velocidade do manto litosférico, não são bem definidas nos sismogramas S (Figura 2.2 e Anexo 1), visto que a direção de vibração da fase  $S_n$  é praticamente perpendicular aos sensores verticais.

### Modelo Vp/Vs

Uma vez obtido os modelos de ondas P e S, os *grids* de velocidade são divididos para obtenção do modelo da razão Vp/Vs.

A razão Vp/Vs é sensível à variação no conteúdo de sílica das rochas e a modelagem Vp/Vs permitiu identificar feições na crosta e no manto superior não identificadas nos modelos P e S isoladamente. A Figura 2.5d mostra a imagem da razão Vp/Vs da crosta e manto superior sob o perfil onde algumas regiões são destacadas.

A razão Vp/Vs nos primeiros 200 km da crosta superior é relativamente alta (~ 1,79), mas na distância de 120 km sobe para 1,93 e evidencia uma anomalia local (borrão claro na Figura 2.5). Nesta mesma região a razão Vp/Vs média da crosta, determinada por função do receptor (Peixoto, 2015), é mais alta que os valores vizinhos corroborando com os resultados.

A crosta superior da porção central do modelo (200-500 km) possui razão Vp/Vs de 1,73, com aumento localizado na distância de 510 km. Nessa região a Vp/Vs sobe para valores de 1,75 e marcam uma anomalia/feição mergulhando sob a bacia. Esta feição coincide em superfície com a *Nappe* Socorro e aparece no modelo como um “bolsão alaranjado” (Figura 2.5).

Nos últimos 100 km do modelo, a razão Vp/Vs da crosta superior é muito baixa (~ 1,65) e sugere uma região anomalmente félsica (borrão vermelho escuro na Figura 2.5d), com possível relação com a granitogênese Neoproterozóica existente na área (p.ex. Granito Igaratá onde foi realizado o tiro 13) (Figura 2.5).

Na crosta inferior o valor da razão Vp/Vs é de 1,85 para os primeiros 200 km do perfil, mostrando que o magmatismo que afetou a crosta superior também afetou a crosta inferior. Na base da crosta por volta do km 300, uma região de elevada razão Vp/Vs (~1,91 – borrão branco), está inserida na crosta inferior de razão Vp/Vs média de 1,74 (Figura 2.5). Esta anomalia (local) tem correlação direta com o *underplating* máfico sugerido no modelo P.

Ainda na crosta inferior, a partir da distância de 500 km a razão  $V_p/V_s$  é de 1,85. Nesta porção, os valores das velocidades das ondas S e P caem substancialmente, mesmo assim a razão  $V_p/V_s$  é elevada.

No modelo  $V_p/V_s$ , bem como no modelo de ondas P, o manto litosférico sob a bacia é diferente do manto ao leste, próximo a margem continental (Figura 2.5). Ao noroeste do perfil a  $V_p/V_s$  do manto é aproximadamente 1,80, enquanto ao sudeste, este valor é menor que 1,71. Apesar da velocidade da onda S não ser muito bem constrangida para o manto superior, o modelo de ondas P é bem definido e marca dois domínios mantélicos distintos.

## 2.6 Discussão

A geometria das interfaces crosta superior-inferior e Moho e, adicionalmente, a distribuição de velocidades P e  $V_p/V_s$  média da crosta permitiu Bernardes (2015) e Peixoto (2015) a compartimentar a crosta continental sob o perfil em três domínios principais: domínios oeste (0-170 km) e central (170-525 km) encobertos pelos sedimentos da bacia e domínio leste (525-700 km) relacionado em superfície com as *Nappes* Socorro-Guaxupé e Faixa Ribeira. O manto litosférico foi dividido em domínio oeste, sob a bacia, e leste, próximo a margem continental. Os resultados da modelagem S e principalmente o imageamento  $V_p/V_s$ , ressaltam de forma mais expressiva as variações de composição e reológicas da litosfera, confirmando e detalhando os domínios definidos na modelagem onda P e função do receptor (Bernardes, 2015 e Peixoto, 2015).

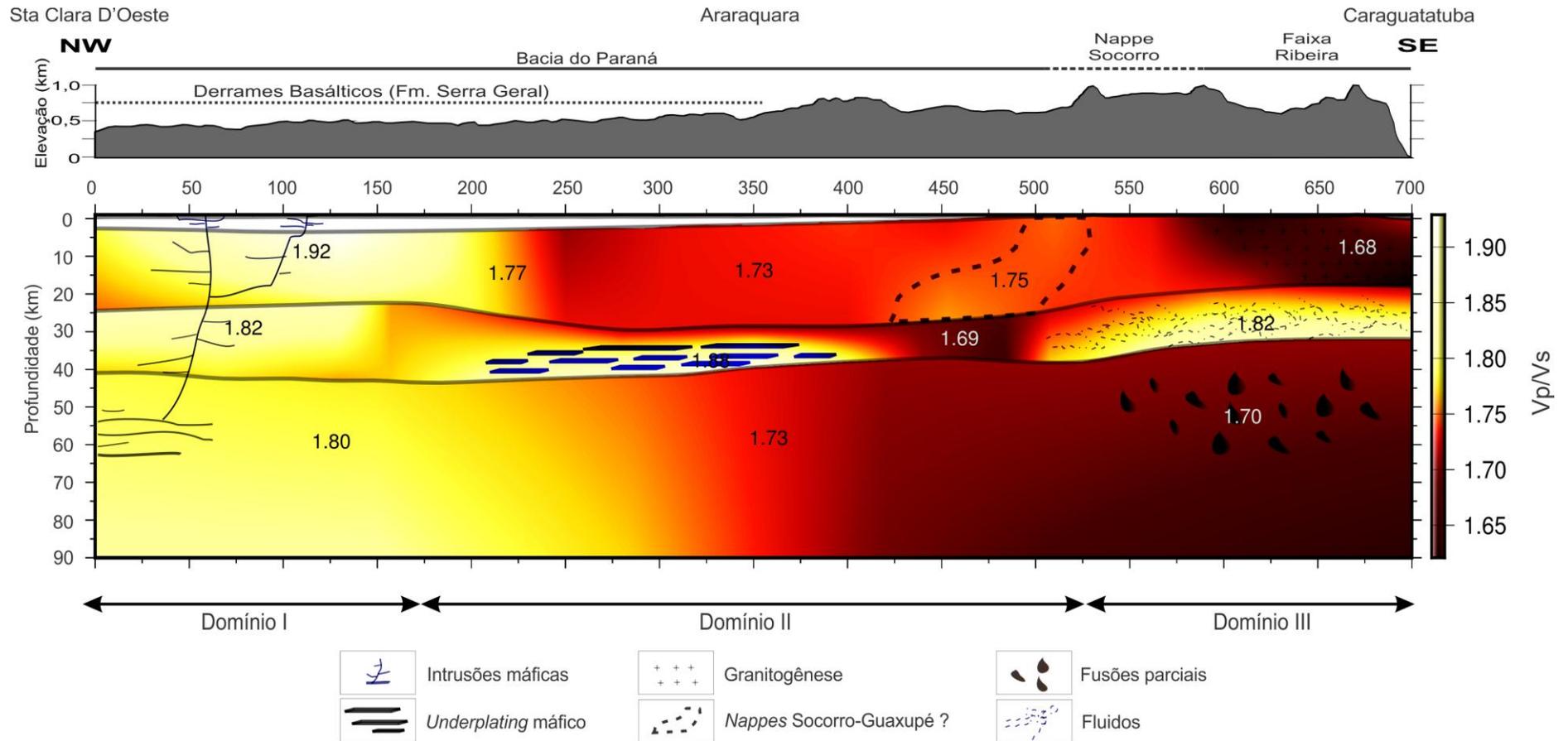


Figura 2.6 – Modelo Vp/Vs interpretado. Acima: perfil topográfico. Abaixo: Domínio I (0 – 170 km) intrusões máficas na crosta e manto competente/denso; Domínio II (170 – 525 km) crosta superior preservada com sutil aumento da Vp/Vs no final do domínio sugerindo correlação com a *Nappe Socorro*, *underplating* máfico na base da crosta inferior, manto transicional; Domínio III (525 – 700 km) crosta superior félsica indica granitogênese, crosta inferior hidratada e manto quente/menos competente.

## Domínio I

Nos primeiros 100 km da crosta (Figura 2.5d), os valores de razão  $V_p/V_s$  por volta de 1,80 evidenciam um contexto máfico para a crosta superior e inferior desse domínio (Christensen, 1996). Nessa mesma porção, o modelo de ondas P (Figura 2.5c) indica aumento da velocidade dentro da bacia e o perfil de função do receptor (Peixoto, 2015) mostra que as reverberações de grande amplitude nos traços de função do receptor são atenuadas nessa região. Esse conjunto de dados (alto  $V_p/V_s$  na crosta, superpostas as variações na onda P e função do receptor identificadas dentro da bacia), levou a considerar essa região como crosta intrudida por possíveis dutos que alimentaram o magmatismo Serra Geral (Figura 2.6).

Aparentemente, o rifte central que condicionou a evolução da Bacia do Paraná e o intenso magmatismo sofrido desde a sua implantação, está associado ao Rio Paraná situado no início do perfil. Dessa forma, a anomalia na distância de 120 km (Figura 2.6) estaria associada a possíveis ramificações secundárias do sistema de rifte principal, que provavelmente atravessam toda a crosta e atingem a bacia no km 120. Interpretação parecida foi sugerida por Bernardes (2015) e está sendo comprovada com esses novos resultados.

A velocidade relativamente alta do manto litosférico (8,3 km/s) (Assumpção *et al.*, 2004; Rocha *et al.*, 2004; Bernardes, 2015) e com razão  $V_p/V_s$  alta (1,80), associado à uma anomalia de baixa resistividade identificada no manto superior a 80 km de profundidade sob a bacia (Minei, 2015), sugerem que o manto litosférico nesta região tenha sido retrabalhado desde o Neoproterozóico.

A subducção do Cráton São Francisco e demais terrenos ao oeste que ocorreram por sob o atual embasamento da bacia, muito provavelmente não teriam ocorrido se o manto litosférico sob a bacia no Neoproterozóico fosse denso como se apresenta hoje. O entendimento é que o manto tenha sido enriquecido, possivelmente devido às múltiplas subduções por sob a bacia, e como consequência se tornado denso e competente.

## Domínio II

O domínio dois apresenta crosta de 39 km de espessura média (mais fina que a do domínio I), sendo caracterizado por apresentar crosta superior três vezes mais espessa que a crosta inferior. Os resultados de razão  $V_p/V_s$  também são peculiares, pois mostram crosta superior com valores de 1,73 e crosta inferior com  $V_p/V_s$  abaixo de 1,70, caracterizando uma inversão

nos valores de  $V_p/V_s$  para crosta continental. Duas anomalias de caráter local são identificadas, na crosta superior por volta do km 500 e na crosta inferior por volta de 200 km.

Na crosta superior, por volta da posição 500, o aumento localizado da razão  $V_p/V_s$  para valores em torno de 1,76 (Figura 2.6), tem correlação em superfície com as *Nappes* Socorro-Guaxupé. As *Nappes* são interpretadas como arco magmático exumado (Trouw *et al.*, 2013; Heilbron *et al.*, 2008) e devem ter continuidade por sob os sedimentos da bacia (Cordani, 2009). Embora a anomalia seja algo disperso, a posição da anomalia sugere relação com as *Nappes*.

Na crosta inferior, valores de  $V_p/V_s$  maiores que 1,80, por volta do km 300-320, marcam região de alta  $V_p$  e alta  $V_p/V_s$ , interpretada como material máfico acoplado ou intrudido na crosta inferior e evidencia o *underplating* máfico (Artemieva & Thybo, 2013) proposto na modelagem P.

A inversão nos valores de  $V_p/V_s$  entre crosta superior (1,73) e inferior ( $<1,70$ ), com a razão  $V_p/V_s$  da crosta inferior anormalmente baixa, somado a crosta superior três vezes mais espessa que a inferior, sugere que a crosta desse domínio foi retrabalhada no Cretáceo. Provavelmente a crosta inferior sofreu estiramento dúctil e a crosta superior (pré-Cambriana) manteve-se preservada (Figura 2.6).

O que os resultados de  $V_p/V_s$  sugerem, é que o retrabalhamento/estiramento da crosta inferior tenha levado à concentração de quartzo, reduzindo substancialmente o valor da razão  $V_p/V_s$  das rochas. Quanto maior o conteúdo de sílica das rochas, menor é a resistência ao estiramento (Lowry & Pérez-Gussinyé, 2011). Resultado semelhante foi reportado por Tavares (2014) no domínio Ceará Central, Província Borborema.

O manto litosférico, na porção central do modelo, marca a passagem do domínio mantélico sobre a bacia com razões  $V_p/V_s$  de 1,80, para o domínio da margem sudeste com  $V_p/V_s$  de 1,70 aproximadamente (Figura 2.6). Em termos de composição o manto é ultramáfico, no entanto, os valores de  $V_p/V_s$  de 1,70 encontrados com  $V_p$  de 7,91 km/s são interpretados como resultado do retrabalhamento do manto (aumento de temperatura e fluidização) relacionados à implantação do Atlântico Sul no Cretáceo.

### Domínio III

Na extremidade sudeste do perfil, a razão  $V_p/V_s$  na crosta superior decresce para valores menores que 1,70, e sugere crosta félsica, provavelmente relacionada à granitogênese cambriano-neoproterozoica existente na área (Granito Morro Azul/Igaratá). Em contrapartida a crosta inferior apresenta aumento gradual na razão  $V_p/V_s$  ( $> 1,80$ ) (Figura 2.6).

Nessa mesma porção da crosta inferior, a velocidade das ondas P é consideravelmente baixa (6,48 – 6,65 km/s) e não sustentam composição máfica para essa porção do modelo. A velocidade das ondas S também é baixa e apresenta gradiente negativo, com a velocidade diminuindo para a base da crosta (Figura 2.5).

Baixa  $V_p$  com baixa  $V_s$  e  $V_p/V_s$  alta, sugerem que os valores altos de  $V_p/V_s$  estejam associados à presença de fluido na crosta e não à rochas de composição máfica. A presença de anisotropia foi descartada pelos resultados de função do receptor de Peixoto (2015).

A presença de fluidos afeta as velocidades sísmicas, pois aumentam a pressão de poro, diminuem a rigidez da rocha e, conseqüentemente, reduzem de forma significativa a velocidade das ondas sísmicas, em especial da onda S (Goes & van der Lee, 2002; Lowry & Pérez-Gussinyé, 2011; Holbrook *et al.*, 1992).

A existência de fluidos na crosta inferior é comumente relacionada ao aumento de temperatura da litosfera que pode resultar na desidratação de minerais e gerar água livre (Hyndman & Shearer, 1989). As zonas de ascensão do manto são ótimas candidatas a mobilizar água para crosta inferior por fusões parciais (Hyndman & Shearer, 1989; Hyndman & Klemperer, 1989). A existência de microfraturas na crosta inferior (Mjelde *et al.*, 1995) é possível explicação para o alojamento/acomadação de fluidos livres.

Em consonância com a crosta inferior, o manto litosférico para este domínio apresenta uma  $V_p/V_s$  inferior à 1,71 (Figura 2.5). Pequenas quantidades de fusão parcial, distribuídas em finas rachaduras, são responsáveis por reduzir a velocidade sísmica no manto e experimentos com ondas S sugerem que pequenas frações de fusão parcial não afetam o módulo cisalhante, o que condiz com o comportamento da  $V_s$  no manto SE do perfil (Dixon *et al.*, 2004; Priestley & McKenzie, 2006).

A associação entre baixa velocidade da onda P (7,90 km/s), pouca variação na velocidade da onda S (Figura 2.5) e altas temperaturas (Bernardes, 2015), nos levam a sugerir que uma possível anomalia térmica no manto nesta porção do modelo, teria desencadeado os processos responsáveis pela hidratação do manto e da crosta inferior.

## 2.7 Conclusão

O imageamento da crosta com a razão  $V_p/V_s$ , complementa a análise realizada com as ondas P. No caso específico, permitiu quantificar e validar interpretações como por exemplo, crosta intrudida por rochas máficas e presença de fluidos.

O modelo  $V_p/V_s$  sugere que sob os primeiros 170 km do perfil sísmico, que corresponde à porção NE da Bacia do Paraná, a crosta foi retrabalhada por intrusões máficas, relacionadas ao intenso magmatismo sofrido pela bacia desde a sua implantação (Magmatismo Serra Geral e, possivelmente ao Magmatismo Três Lagoas).

Na porção central, a crosta inferior sofreu estiramento dúctil, tornando-se três vezes mais fina que a crosta superior, e hoje está mais félsica que a crosta superior. A crosta inferior fora da bacia (domínios das *Nappes* Socorro-Guaxupé e Faixa Ribeira) está hidratada, possivelmente resultado do retrabalhamento da litosfera dessa região devido à implantação do Oceano Atlântico Sul, no Cretáceo.

O manto está dividido em domínio de manto denso e competente ( $V_p$  8,3 km/s e  $V_p/V_s$  1,80), interpretado como enriquecido, sob a bacia e quente e menos competente (7,9 km/s e  $V_p/V_s$  1,70) próximo à margem continental.

De modo geral o regime distensivo da abertura do Oceano Atlântico Sul no Cretáceo, retrabalhou o manto litosférico e parte da crosta inferior das regiões próximas a margem continental. Nas porções mais internas, o manto competente conteve o alcance da deformação.

## 2.8 Referências

- Artemieva, I. M., & Thybo, H. (2013). EUNaseis: A seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region. *Tectonophysics*, 609, 97–153. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>
- Assumpção, M., Schimmel, M., Escalante, C., Barbosa, J. R., Rocha, M., & Barros, L. V. (2004). Intraplate seismicity in SE Brazil: Stress concentration in lithospheric thin spots. *Geophysical Journal International*, 159(1), 390–399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02357.x>
- Bernardes, R. B., (2015). Modelo de Velocidade Sísmica de Ondas P da Crosta e Manto Superior ao longo do Perfil PABBRISE, Estado de São Paulo. Dissertação de (Mestrado) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- Berrocal, J., Marangoni, Y., de Sá, N. C., Fuck, R., Soares, J. E. P., Dantas, E., ... Fernandes, C. (2004). Deep seismic refraction and gravity crustal model and tectonic deformation in Tocantins Province, Central Brazil. *Tectonophysics*, 388(1–4 SPEC. ISS.), 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.033>
- Christensen, N.I., 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *J. Geophys. Res.*101, 3139-3156.
- Cohen, K.M.; Finney, S.C.; Gibbard, P.L.; Fan, J. X.; (2013) updated. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36: 199-204.
- Cordani, U. G., Fuck, R. A., & Porto, R. (2009). direção regional e extensão para o sul do Lineamento Transbrasiliano Bacia do Paraná, 205–219
- Dardenne, M.A. (2000). The Brasilia Fold Belt. In: Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Org.). *Tectonic Evolution of South America*. 1st Ed. Rio de Janeiro: Brazil, 231-263.
- Dixon, J. E., Dixon, T. H., Bell, D. R., & Malservisi, R. (2004). Lateral variation in upper mantle viscosity: Role of water. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(2), 451–467. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.03.022>
- Evain, M., Afilhado, A., Rigoti, C., Loureiro, A., Alves, D., Klingelhoefer, F., ... Aslanian, D. (2015). Deep structure of the Santos Basin-São Paulo Plateau System, SE Brazil. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 120(8), 5401–5431. <https://doi.org/10.1002/2014JB011561>

- Fuck, R., Pimentel, M., Soares, J., & Dantas, E. (2005). Compartimentação da Faixa Brasília. *SBG, Simpósio de Geologia Do ...*, 26–27. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:COMPARTIMENTAÇÃO+DA+FAIXA+BRASÍLIA#1>
- Goes, S., & Van Der Lee, S. (2002). Thermal structure of the North American uppermost mantle inferred from seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3), 2050. <https://doi.org/10.1029/2000JB000049>
- Heilbron, M., Valeriano, C. M., Tassinari, C. C. G., Almeida, J., Tupinambá, M., Siga, O., & Trouw, R. (2008). Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 211–237. <https://doi.org/10.1144/SP294.12>
- Holbrook, W. S., Mooney, W. D., & Christensen, N. I. (1992). The seismic velocity structure of the deep continental crust. *Continental Lower Crust*, 1–43.
- Hyndman, R. ., & Klemperer, S. L. (1989). Lower-crustal porosity from electrical measurements and inferences about composition from seismic velocities. *Geophysical Research Letters*, 16, 255–258.
- Hyndman, R. ., & Shear P.M. (1989). Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results. *Geophys. J. Int.*, 98, 343–365.
- Julià, J., Assumpção, M., & Rocha, M. P. (2008). Deep crustal structure of the Paraná Basin from receiver functions and Rayleigh-wave dispersion: Evidence for a fragmented cratonic root. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(8), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2007JB005374>
- Lowry, A. R., & Pérez-Gussinyé, M. (2011). The role of crustal quartz in controlling Cordilleran deformation. *Nature*, 471(7338), 353–359. <https://doi.org/10.1038/nature09912>
- Mantovani, M. S. M., Quintas, M. C. L., Shukowsky, W., & Brito Neves, B. B. (2005). Delimitation of the Paranapanema Proterozoic block: A geophysical contribution. *Episodes*, 28(1), 18–22.
- Mantovani, M. S. M., & de Brito Neves, B. B. (2005). The Paranapanema lithospheric block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) supercontinent theories. *Gondwana Research*, 8(3), 303–315. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71137-0](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71137-0)

- Milani, E.J. (1997). Evolução Tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Ocidental. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 255 p.
- Milani, E. J., Henrique, J., Melo, G. De, Souza, P. A. De, Fernandes, L. A., & França, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências Da Petrobras*, 15(2), 265–287.
- Milani, E. J., & Ramos, V. A. (1998). Paleozoic orogenies in southwestern Gondwana and the subsidence cycles of the Parana Basin. *Orogenias paleozoicas no dominio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidencia da bacia do Parana*. *Revista Brasileira de Geociencias*, 28(4), 473–484. <https://doi.org/10.5327/rbg.v28i4.651>
- Minei, C. O. (2015). Imageamento Crustal e Litosférico no Nordeste da Bacia do Paraná por Sondagens Magnetotelúricas. *Imageamento Crustal e Litosférico no Nordeste da Bacia do Paraná por Sondagens Magnetotelúricas*.
- Mjelde, R., Sellevoll, M. A., Shimamura, H., Iwasaki, T., & Kanazawa, T. (1995). S-wave anisotropy off Lofoten, Norway, indicative of fluids in the lower continental crust? *Geophysical Journal International*, 120(1), 87–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb05912.x>
- Musacchio, G., Mooney, W. D., Luetgert, J. H., & 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, 15225–15241. <https://doi.org/10.1029/96jb03737>
- Peixoto, C.L.O. (2015). Caracterização sismológica da crosta sob o perfil PABBRISE: uma aproximação por função do receptor e razão espectral H/V. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- Priestley, K., & McKenzie, D. (2006). The thermal structure of the lithosphere from shear wave velocities. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1–2), 285–301. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.008>
- Quintas, M. C. L., Mantovani, M. S. M., Zalán, P. V. (1999). Contribuição ao estudo da evolução mecânica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(2), 217–226.
- Soares, J. E., 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: Solid Earth*, 111(12), 1–31. <https://doi.org/10.1029/2005JB003769>

- Tavares, E.J. (2014). 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). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- Trouw, R.A.J.; Heilbron, M.; Ribeiro, A.; Paciullo, F.; Valeriano, C.M.; Almeida, J.C.H.; Tupinambá, M.; Andreis, R.R. (2000). The central segment of the Ribeira Belt. In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A. (Eds.). *Tectonic Evolution of South America*, 355-365.
- Trouw, R. A. J., Peternel, R., Ribeiro, A., Heilbron, M., Vinagre, R., Duffles, P., ... Kussama, H. H. (2013). A new interpretation for the interference zone between the southern Brasília belt and the central Ribeira belt, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 48, 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.07.012>
- Zalán, P.V.; Wolff, S.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Conceição, J.C.J.; Appi, V.T.; Santos Neto, E.V.; Cerqueira, J.R.; Marques, A. (1990). The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M.W.; Kolata, D.R.; Oltz, D.F.; Eidel, J.J. (Eds.). *Interior cratonic basins*. AAPG Memoir, 51. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 681-708.
- Zalán, P. V., & Oliveira, J. A. B. de. (2005). Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *B. Geoci Petrobras*, 13(2), 269–300.
- Zalán, P.V. (2012). Origem e evolução das bacias cenozóicas do Sudeste. In: Hasui, Y.; Carneiro, C.D.R.; Almeida, F.F.M.; Bartorelli, A. (Eds.). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca. 900.
- Zandt, G., & Ammon, C. J. (1995). Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/374152a0>
- Zelt, C. A. (1999). Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltimes data. *Geophysical Journal International*, 139(1), 183–204. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00934.x>
- Zelt, C. A., Sain, K., Naumenko, J. V., & Sawyer, D. S. (2003). Assessment of crustal velocity models using seismic refraction and reflection tomography (vol 153, pg 609, 2003). *Geophysical Journal International*, 154(1), 230.
- Zelt, C. A., & Smith, R. B. (1992). Seismic traveltimes inversion for 2D crustal velocity structure. *Geophysical Journal International*, 108(1), 16–34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00836.x>

## ANEXO 1

### Traçado de raio e modelagem 2D das seções sísmicas

O Anexo 1 contempla o resultado da modelagem direta para todos os nove tiros disponíveis, juntamente com as seções sísmicas referente a cada um deles. De cima para baixo:

- a) Seção sísmica normalizada das componentes verticais para ondas S, filtro passa-banda de 2 a 8 Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s;
- b) Seção sísmica com a identificação das fases utilizadas na modelagem (curvas pretas);
- c) Ajuste dos dados observados às curvas de tempo de trânsito teórico, com identificação das fases sísmicas;
- d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo.

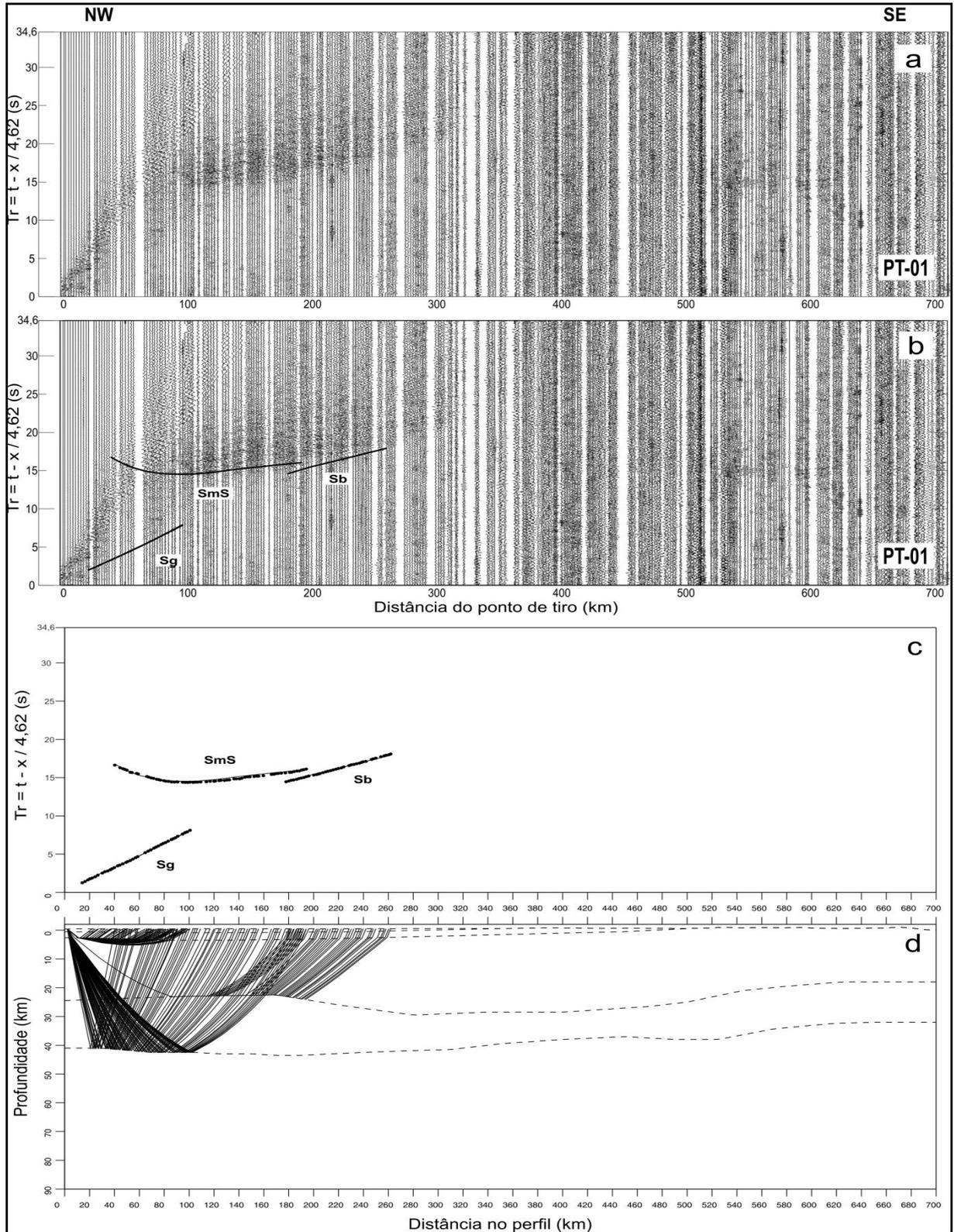


Figura 1 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-01 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

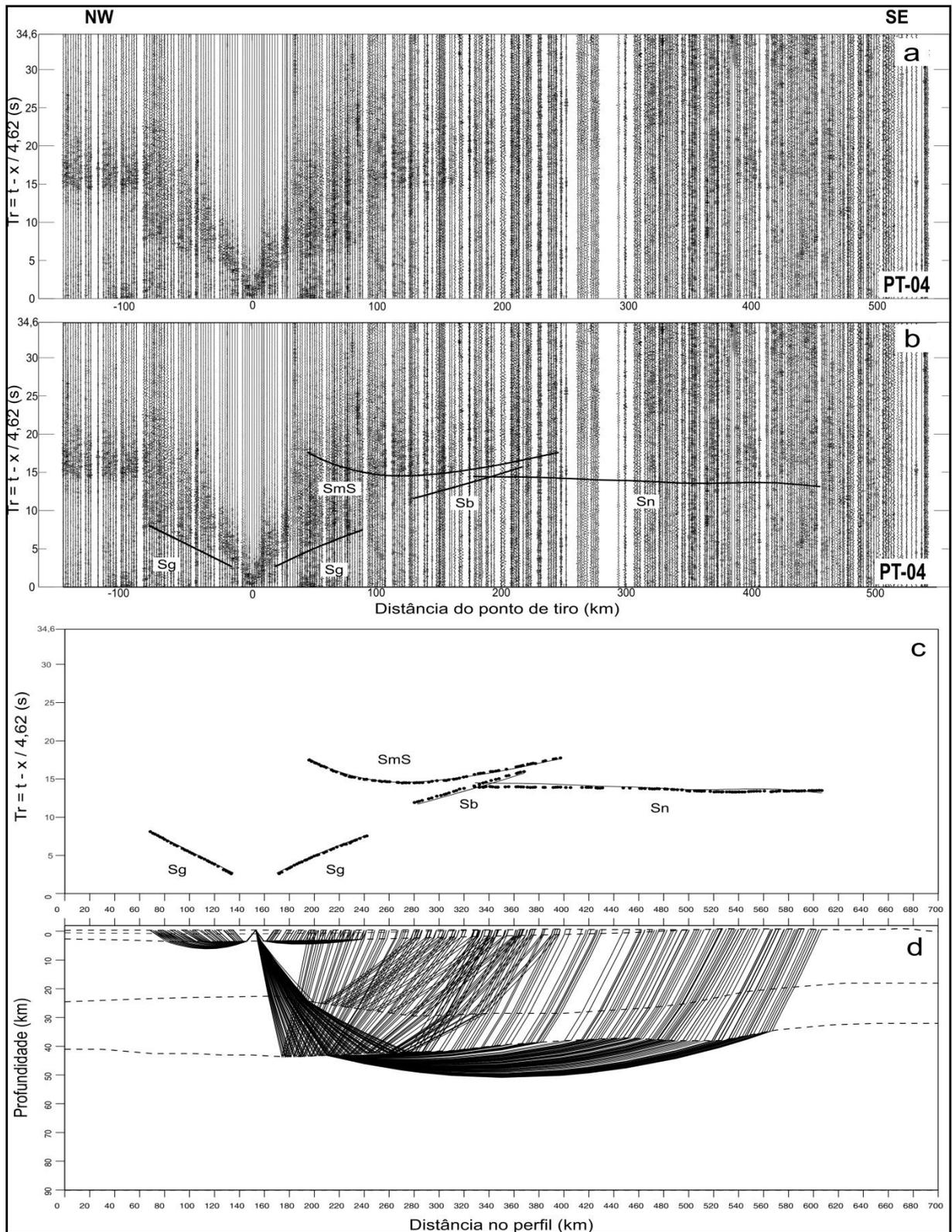


Figura 2 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-04 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

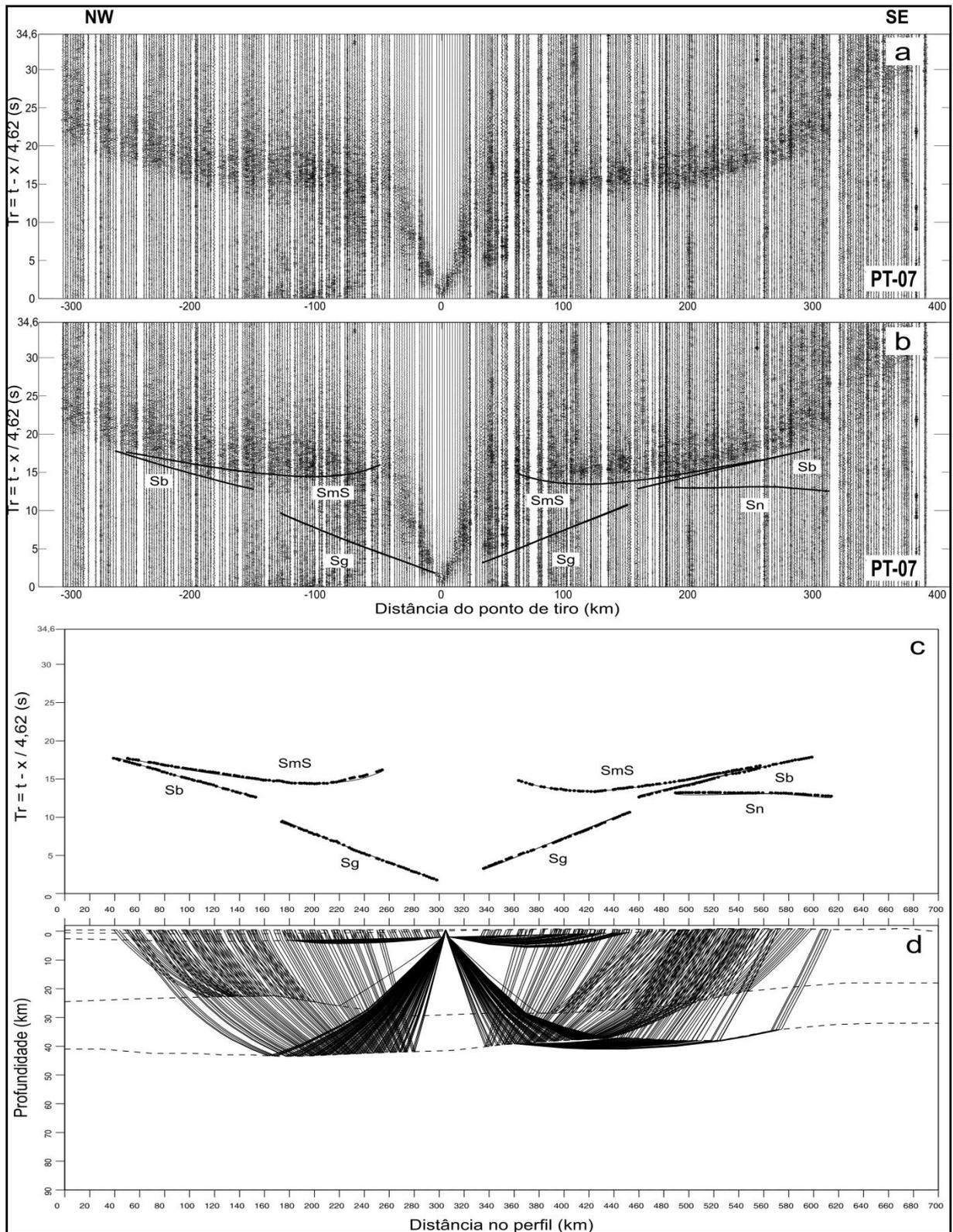


Figura 3 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-07 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

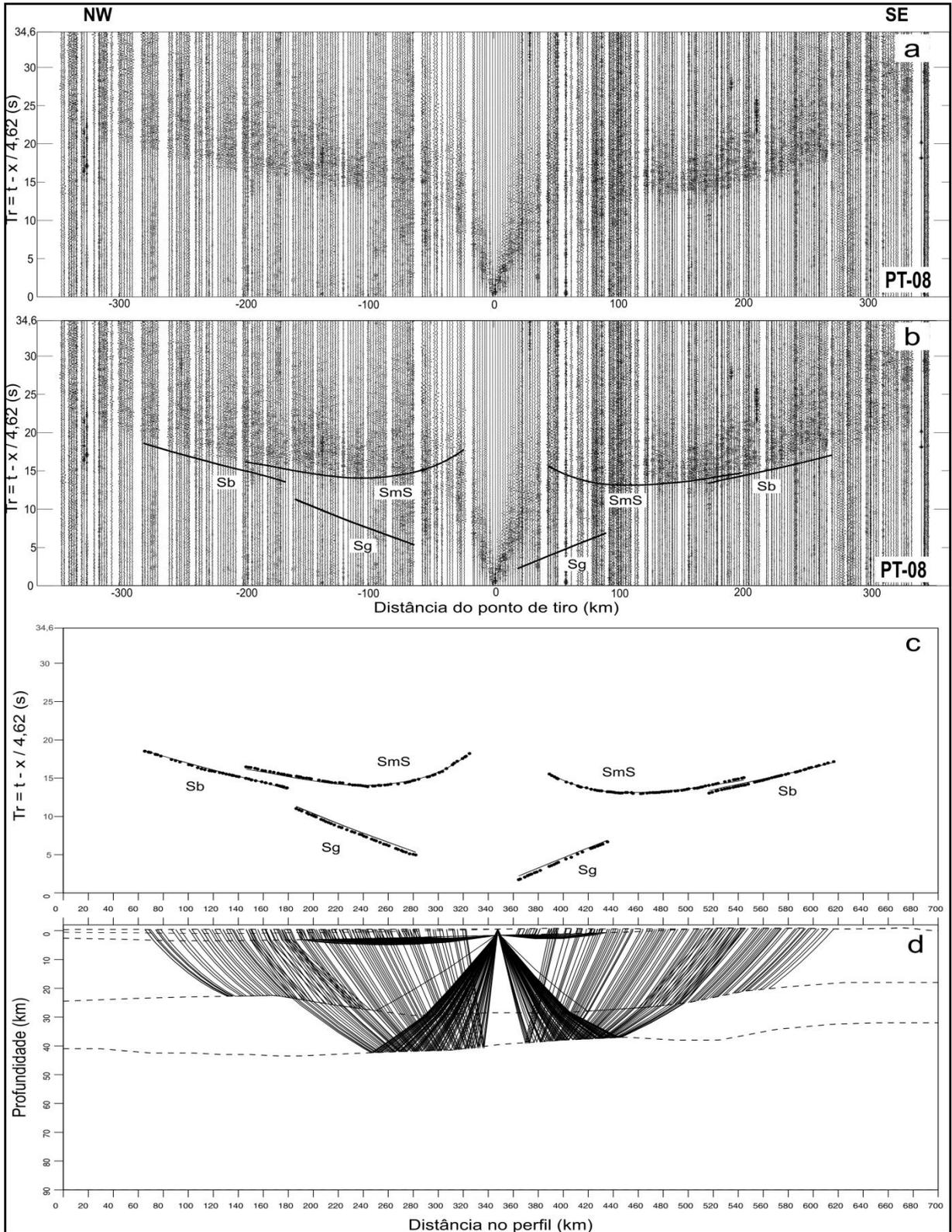


Figura 4 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-08 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

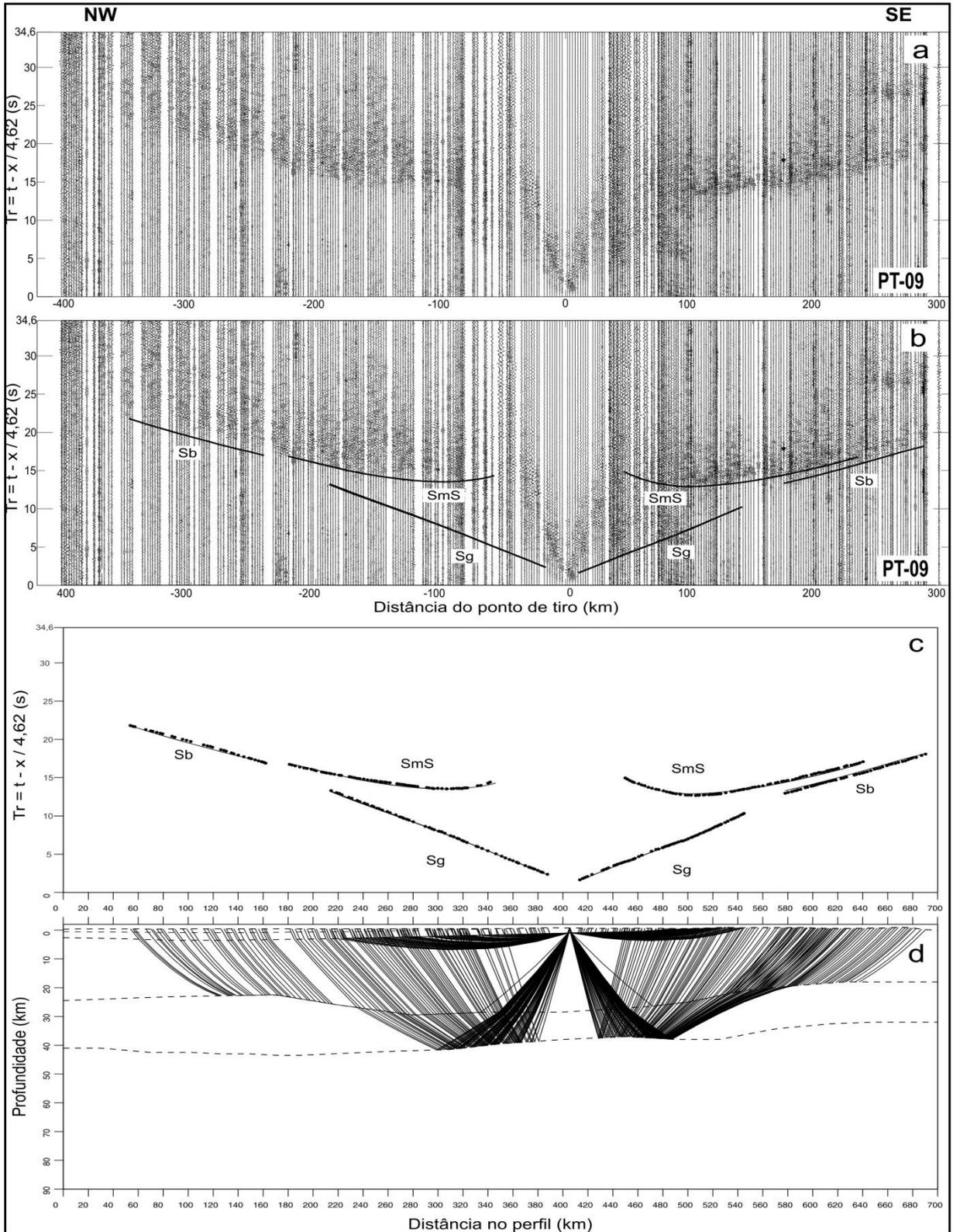


Figura 5 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-09 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

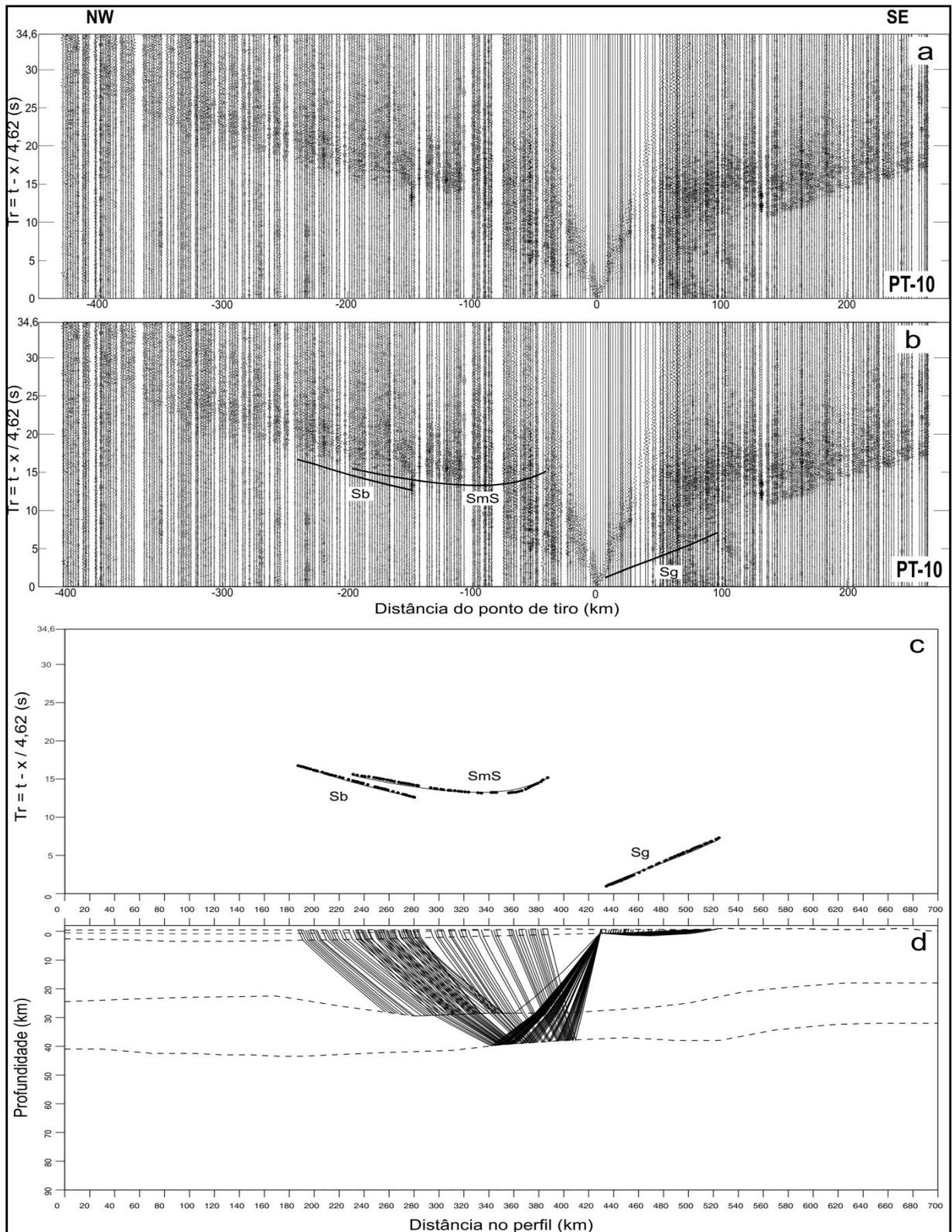


Figura 6 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-10 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

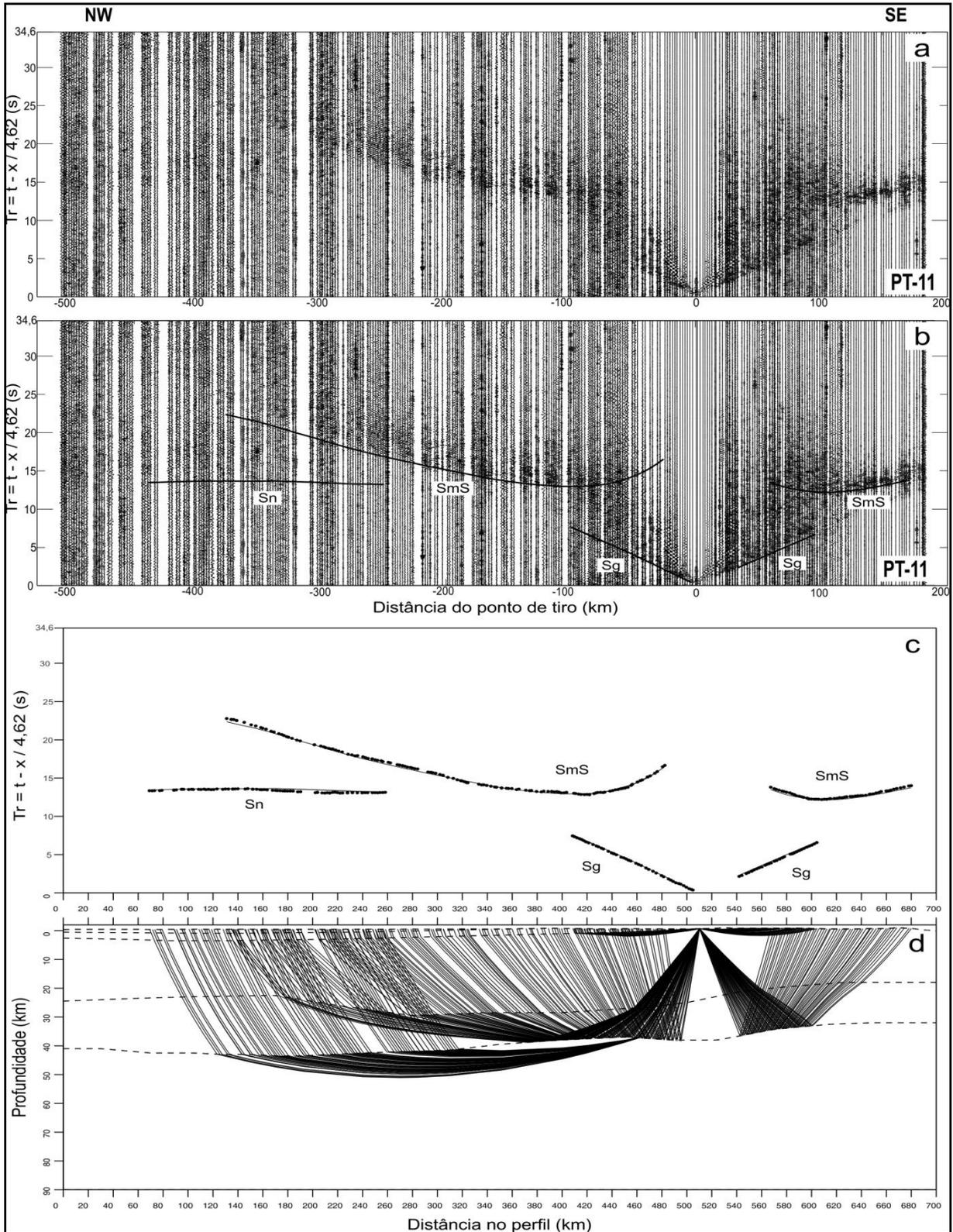


Figura 7 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-11 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

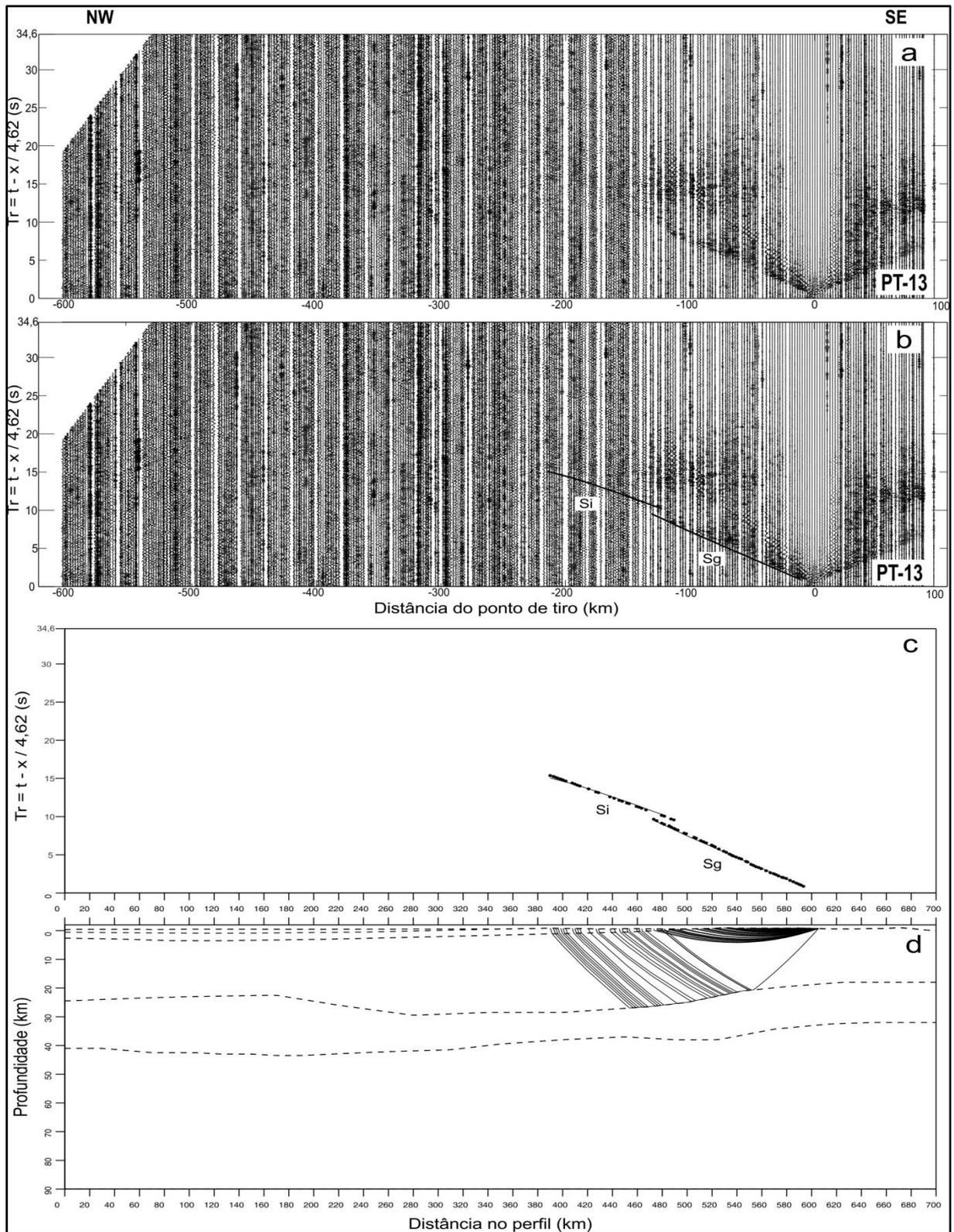


Figura 8 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-13 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.

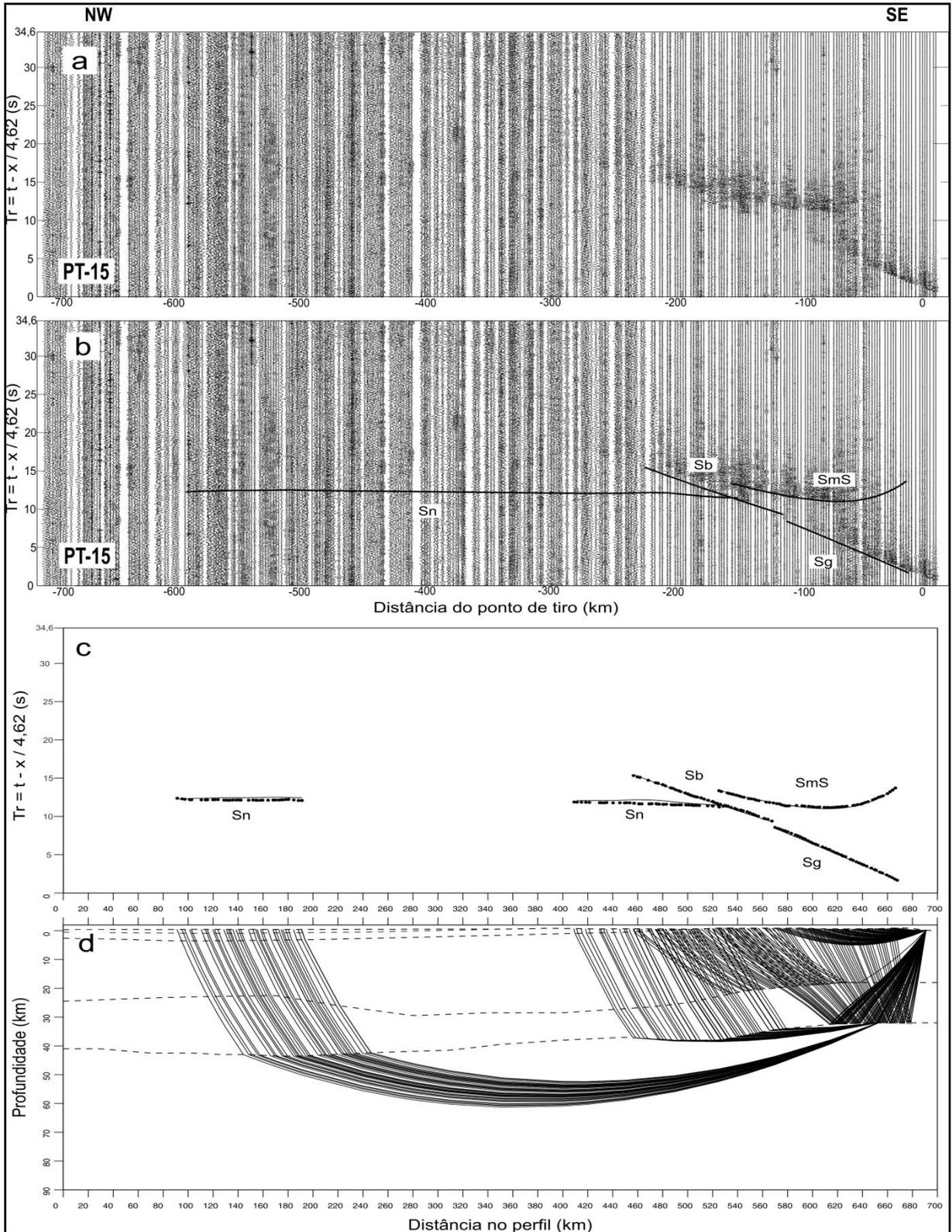


Figura 9 – Seção sísmica traço-normalizada dos componentes verticais para ondas S do ponto de tiro PT-15 e os ajustes obtidos na modelagem. Foi aplicado um filtro passa-banda de 2-8Hz e velocidade de redução de 4.62 km/s. a) Seção sísmica processada; b) Seção sísmica com a curva de ajuste utilizada na modelagem; c) Diagrama dos ajustes obtidos para os tempos de trânsito teóricos (linhas pretas); d) Diagrama de raios teóricos associados ao modelo obtido.